



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Τρωτότητα δικτύων κοινής ωφελείας έναντι σεισμού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΚΥΠΑΡΙΣΟΥΛΑΣ Κ. ΔΗΜΗΤΡΑΚΟΠΟΥΛΟΥ
ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Εμμ. ΜΑΝΤΑΔΑΚΗ

Επιβλέποντες: Εμμανουήλ Βουγιούκας
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Τρωτότητα δικτύων κοινής ωφελείας έναντι σεισμού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΚΥΠΑΡΙΣΟΥΛΑΣ Κ. ΔΗΜΗΤΡΑΚΟΠΟΥΛΟΥ
ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Εμμ. ΜΑΝΤΑΔΑΚΗ

Επιβλέποντες: Εμμανουήλ Βουγιούκας
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή.....

.....
Εμμανουήλ Βουγιούκας
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Τζουβαδάκης Ιωάννης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου
Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....σελ.	4
Ευρετήριο σχημάτων.....	7
Ευρετήριο εικόνων.....	10
Ευρετήριο πινάκων.....	11
Πρόλογος – Ευχαριστίες.....	12
Περίληψη – Abstract.....	13
Κεφαλαίο 1 - Εισαγωγή.....	14
Κεφαλαίο 2 - Η έννοια της τρωτότητας, οι καμπύλες τρωτότητας και η διεθνής εμπειρία.....	16
2.1.Τρωτότητα Δικτύων Κοινής Ωφελείας έναντι σεισμού.....	16
2.2.Σεισμική μηχανική Δικτύων Κοινής Ωφελείας (lifeline earthquake engineering).....	19
2.3.Διεθνής εμπειρία.....	24
2.4.Οικονομικά στοιχεία.....	32
Κεφάλαιο 3 - Περιγραφή δικτύων διανομής.....	33
3.1.Δίκτυο διανομής πόσιμου νερού (Υδρευση).....	33
3.2.Δίκτυο αποχέτευσης Αθήνας – Πειραιά.....	34
3.3.Φυσικό αέριο.....	37
Κεφάλαιο 4 - Υπόγειοι αγωγοί.....	39
4.1.Υλικό κατασκευής υπόγειων σωλήνων.....	40
4.2.Υπόγειοι αγωγοί και σεισμός.....	41
4.2.1.Γενικά.....	41
4.2.2.Εδαφική ταλάντωση.....	43
4.2.3.Ρευστοποίηση.....	44
4.2.4.Κατολίσθηση.....	44
4.2.5.Καθιζήσεις.....	46
4.3.Ιδιαιτερότητες του αντισεισμικού κανονισμού στα δίκτυα.....	46
4.4.Προσπάθειες ανάλυσης της συμπεριφοράς του φαινομένου του εγκιβωτισμού.....	48
Κεφάλαιο 5 - Διαδικασία εκτίμησης της τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας σύμφωνα με τους αμερικανικούς κανονισμούς.....	52
5.1.Εισαγωγή.....	52
5.2.Υδρευση.....	52
5.2.1.Εισαγωγή.....	52
5.2.2.Διαδικασία αποτίμησης σεισμικής τρωτότητας δικτύου ύδρευσης σύμφωνα με την American Lifelines Alliance, 2002.....	53
5.2.2.1.Απογραφή του συστήματος.....	53
5.2.2.2.Σεισμικοί κίνδυνοι.....	57
5.2.2.3.Διαδικασία εκτίμησης της απόκρισης του συστήματος ύδρευσης σε σεισμό.....	57
5.2.2.4.Εκτίμηση της τρωτότητας του συνόλου του συστήματος.....	67
5.3.Φυσικό αέριο.....	70
5.3.1.Εισαγωγή.....	70
5.3.2.Διαδικασία εκτίμησης συμπεριφοράς του συστήματος σε φυσικούς κινδύνους.....	70
5.3.2.1.Προετοιμασία για τους φυσικούς κινδύνους.....	71

5.3.2.2.Φάση 1 - Διαδικασία επισκόπησης σημαντικών κινδύνων και ευπάθειας του συστήματος.....	79
5.3.2.3.Φάση 2.....	82
Κεφάλαιο 6 - Μελέτες τρωτότητας δικτύων κοινής ωφελείας στον ελλαδικό χώρο...	86
6.1.Εισαγωγή.....	86
6.2.Γενική μεθοδολογία αποτίμησης τρωτότητας και διαχείρισης σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων κοινής ωφελείας και υποδομών.....	86
6.3.Παραδείγματα μελετών στον ελλαδικό χώρο.....	89
6.3.1.Δίκτυα κοινής ωφελείας μητροπολιτικής Θεσσαλονίκης, Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008....	89
6.3.2.Δίκτυο ύδρευσης Δήμου Θερμαϊκού Θεσσαλονίκης, Μ. Αλεξούδη, Ε. Ρήγα, Κ. Πιτιλάκης, 2008.....	95
6.3.3.Δίκτυο αποχέτευσης της πόλης των Γρεβενών – Σεισμικά σενάρια, Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010.....	98
6.3.4.Δίκτυο ύδρευσης της πόλης της Λευκάδας, Μ. Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2008	102
Κεφάλαιο 7 - Μεταφορικά δίκτυα.....	112
7.1.Περιγραφή μεταφορικών δικτύων.....	112
7.1.1.Οδικό δίκτυο.....	112
7.1.2.Δίκτυο ΜΕΤΡΟ Αθηνών – Πειραιά και Θεσσαλονίκης.....	114
7.1.2.1.Δίκτυο.....	114
7.1.2.2.Έδαφος, Υπέδαφος.....	115
7.1.2.3.Μετρό Θεσσαλονίκης.....	116
7.2.Γέφυρες.....	117
7.2.1.Εισαγωγή.....	117
7.2.2.Επισκόπηση μεθόδων αποτίμησης τρωτότητας γεφυρών.....	118
7.2.2.1.Μέθοδος της FHWA (Federal Highway Administration).....	119
7.2.2.2.Μέθοδος του WSDOT (Washington State Department of Transportation).....	119
7.2.2.3.Μέθοδος των Pezeshk et al.....	120
7.2.2.4.Μέθοδος των Kawashima & Unjoh.....	120
7.2.2.5.Μέθοδος του Kim.....	120
7.2.2.6.Μέθοδος του Ο.Α.Σ.Π., 2002.....	121
7.2.3. Αρχές διαμόρφωσης φορέων γεφυρών.....	122
7.3.Σηράγγες.....	122
7.3.1.Εισαγωγή.....	122
7.3.2.Επισκόπηση μεθόδων αποτίμησης τρωτότητας σηράγγων.....	123
7.3.3.Γενική θεώρηση σχεδιασμού.....	125
7.3.4.Χαρακτηριστικά υπόγειων σηράγγων στο σεισμό.....	125
7.3.5.Συμπεριφορά σηράγγων ανάλογα με το έδαφος θεμελίωσης.....	127
7.3.5.1.Σηράγγες σε βραχώδη εδάφη.....	127
7.3.5.2.Σηράγγες σε μαλακά εδάφη.....	127
7.3.6.Παραδείγματα σεισμικών αστοχιών για οδικό δίκτυο και ΜΕΤΡΟ.....	127
7.3.7.Σεισμός – στοιχεία που απαιτούν προσοχή.....	130
7.3.7.1.Διατομές σε περιοχές εγκάρσιας διασταύρωσης με ρήγμα.....	130
7.3.7.2.Θεώρηση σεισμικών δράσεων.....	132
7.3.8.Πρόγραμμα ενόργανης παρακολούθησης.....	135
7.3.9.Δυναμική απόκριση σηράγγων – αναλυτικές λύσεις.....	136
7.3.9.1.Ωοειδής παραμόρφωση «ελεύθερου πεδίου».....	136
7.3.9.2.Ωοειδής παραμόρφωση με αλληλεπίδραση εδάφους –	

Κατασκευής.....	137
7.3.10.Χαρακτηριστικά δικτύου ΜΕΤΡΟ στο σεισμό.....	138
Κεφάλαιο 8 - Μελέτες για το οδικό δίκτυο.....	140
8.1.Εισαγωγή.....	140
8.2.Μεθοδολογία αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης του οδικού δικτύου.....	140
8.2.1.Γενικά.....	140
8.2.2.Προτεινόμενη μέθοδος αποτίμησης τρωτότητας οδών έναντι κατάρρευσης κτηρίων.....	143
8.3.Εφαρμογές στο οδικό δίκτυο.....	145
8.3.1.Οδικό δίκτυο Θεσσαλονίκης έναντι σεισμού (οδοί και γέφυρες).....	145
8.3.2.Οδικό δίκτυο Θεσσαλονίκης έναντι κατάρρευσης κτηρίων.....	146
8.3.2.1.Σεισμικό σενάριο.....	147
8.3.2.2.Αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας κτηρίων έναντι κατάρρευσης.....	148
8.3.2.3.Αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των οδών έναντι κατάρρευσης κτηρίων.....	148
8.3.2.4.Αποτίμηση της σπουδαιότητας των οδών.....	149
8.3.3.Οδικό δίκτυο της πόλης των Γρεβενών.....	151
Συμπεράσματα.....	154
Βιβλιογραφία.....	155

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 2.1: Απεικόνιση της σχέσης «Σεισμική διέγερση και βλάβη».....	17
Σχήμα 2.2: Καμπύλη τρωτότητας για διάφορες καταστάσεις αστοχίας για μια αντισεισμικώς σχεδιασμένη σιδηροδρομική γέφυρα που υπόκειται στη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση.....	18
Σχήμα 2.3: Καμπύλη τρωτότητας για διάφορες καταστάσεις αστοχίας για μια αντισεισμικώς σχεδιασμένη σιδηροδρομική γέφυρα που υπόκειται σε μόνιμη εδαφική μετακίνηση.....	18
Σχήμα 2.4: Καμπύλες αποκατάστασης σιδηροδρομικών γεφυρών.....	19
Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας του HAZUS 2004.....	21
Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας SRMLIFE (2003-2007)	22
Σχήμα 4.1: Γενική μορφή των σχέσεων τρωτότητας για υπογείους αγωγούς.....	40
Σχήμα 4.2: Τομή εγκιβωτισμένου υπόγειου αγωγού.....	47
Σχήμα 4.3: Συσχετισμός της πραγματικής μετακίνησης του αγωγού με την ισοδύναμη πειραματική διάταξη.....	49
Σχήμα 4.4: παραμόρφωση του αγωγού που υπόκειται σε οριζόντια μετακίνηση ρήγματος - εδαφικές αντιδράσεις.....	49
Σχήμα 4.5: Μοντέλο υπολογισμού.....	50
Σχήμα 5.1: Διαδικασία λήψης αποφάσεων για την καθιέρωση αποδεκτών απαιτήσεων συμπεριφοράς δικτύου ύδρευσης που υπόκειται σε κάποιο φυσικό κίνδυνο.....	59
Σχήμα 5.2: Τύποι μοντέλων για τον υπολογισμό της τρωτότητας των στοιχείων του δικτύου ύδρευσης.....	61
Σχήμα 5.3: Διαδικασία αποφάσεων για την εξασφάλιση της επίτευξης της πρότυπης συμπεριφοράς.....	72
Σχήμα 5.4: Προσέγγιση σε δύο φάσεις, όπως αναλύεται από την American Lifelines Alliance, 2004.....	76
Σχήμα 5.5: Βασικός «χάρτης» για τη διαδικασία εκτίμησης της συμπεριφοράς του συστήματος.....	78
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας SRMLIFE (2003-2007).....	87
Σχήμα 6.2: Μέσες καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης (G/G_0) και της απόσβεσης (D_s) συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma(\%)$ σε στρεπτική ταλάντωση από δοκιμές συντονισμού για τις κύριες εδαφικές κατηγορίες στο πολεοδομικό συγκρότημα Θεσσαλονίκης.....	90
Σχήμα 6.3: Γεωτεχνικοί θεματικοί χάρτες της περιοχής Θεσσαλονίκης με καμπύλες μεταβολής του πάχους των κυρίων εδαφικών σχηματισμών (A, C, E και F και G). α) πάχος του σχηματισμού A («ιστορικές» επιχωματώσεις) και β) βάθος εμφάνισης του βραχώδους υποβάθρου (σχηματισμός G).....	91
Σχήμα 6.4: Χωρική κατανομή των μεσων τιμών α) της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης ($PGA:g's$) και β) της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας ($PGV:cm/s$)($T_m=475$ χρόνια).....	92
Σχήμα 6.5: Χωρική κατανομή των μέσων τιμών της «μέγιστης» μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης (καθιζήσεις) λόγω ρευστοποίησης - $\Delta v(cm)$ για το σενάριο των 475 χρόνων.....	92
Σχήμα 6.6: Χάρτης αποτελεσμάτων αποτίμησης της τρωτότητας και κατανομή βλαβών για το δίκτυο ύδρευσης της Θεσσαλονίκης ($T_m=475$ χρόνια)	

(Alexoudi et al, 2007).....	94
Σχήμα 6.7: Κατηγοριοποίηση των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής του δήμου Θερμαϊκού (SRM-LIFE, 2003-2007).....	95
Σχήμα 6.8: Χωρική μεταβολή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA (gal) στο βραχώδες υπόβαθρο για σεισμό με μέση περίοδο επαναφοράς : α) 100 έτη, β) 475 έτη, γ) 950 έτη (SRM-LIFE, 2003-2007).....	96
Σχήμα 6.9 : Αστοχίες αγωγών του δικτύου ύδρευσης του δήμου Θερμαϊκού για σεισμό με μέση περίοδο επανάληψης α) 100 έτη, β) 475 έτη, γ) 950 έτη.....	97
Σχήμα 6.10: Δίκτυο αποχέτευσης της πόλης των Γρεβενών – διάμετροι των αγωγών.....	99
Σχήμα 6.11: Χωρική κατανομή της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας σε βάθος -3m ($T_m=475$ έτη).....	100
Σχήμα 6.12: Χωρική κατανομή του i) άνω και ii) κάτω ορίου των αναμενόμενων τιμών μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων στην επιφάνεια λόγω κατολίσθησης ($T_m=475$ έτη).....	100
Σχήμα 6.13: Αποτίμηση της τρωτότητας του δικτύου αποχέτευσης της πόλης των Γρεβενών λόγω εδαφικής ταλάντωσης και κατολίσθησης για το άνω (i) και κάτω (ii) όριο των μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων ($T_m=475$ έτη).....	102
Σχήμα 6.14: Ψηφιοποιημένο δίκτυο ύδρευσης του ιστορικού κέντρου (Λευκάδα)..	103
Σχήμα 6.15: Κατανομή αστοχιών στο δίκτυο ύδρευσης/αποχέτευσης στο ιστορικό κέντρο της Λευκάδας.....	104
Σχήμα 6.16: Χάρτης παρατηρηθεισών καθιζήσεων και πλευρικών εξαπλώσεων στο ιστορικό κέντρο της Λευκάδας κατά το σεισμό του 2003.....	105
Σχήμα 6.17: Καταγεγραμμένες αστοχίες του βασικού και του δευτερεύοντος δικτύου ύδρευσης (Σύμβολα: p- βασικό δίκτυο, sec- συνδέσεις καταναλωτών).....	106
Σχήμα 6.18: Χωρική κατανομή της PGA_{EW} (gal) και PGV_{EW} (cm/sec) για το σεισμό Λευκάδας (14-08-2003) – (Pitilakis et al, 2005).....	108
Σχήμα 6.19: Αποτίμηση της τρωτότητας βάσει των σχέσεων τρωτότητας: α) των O'Rourke & Ayala (1993) και Honegger & Eguchi (1992), β) των Eidinger & Avila E (1999), γ) της A.L.A. (2001). Διακρίνονται με έντονο χρώμα οι αγωγοί οι οποίοι αναμένονται να αστοχήσουν.....	110
Σχήμα 7.1: Κύριοι οδικοί άξονες Ελλάδας.....	113
Σχήμα 7.2: Ευρωπαϊκοί αυτοκινητόδρομοι E90,E55,E65 και E75 σε σύνδεση με το ελληνικό δίκτυο.....	114
Σχήμα 7.3: Μεθοδολογία για την κατασκευή καμπυλών τρωτότητας σηράγγων μικρού βάθους.....	124
Σχήμα 7.4: Παραμόρφωση τύπου racking.....	126
Σχήμα 7.5: Διάταξη πυκνών εγκάρσιων αρμών σε ρηξιγενείς ζώνες.....	131
Σχήμα 7.6: Κίνηση ρήγματος παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας και μέτρα αντιμετώπισης καταπτώσεων.....	132
Σχήμα 7.7: Παραμόρφωση της διατομής της σήραγγας λόγω διάδοσης διατμητικού Κύματος.....	136
Σχήμα 8.1: Μεθοδολογία αποτίμησης σεισμικής διακινδύνευσης οδικού δικτύου...	141
Σχήμα 8.2: Μοντέλο προσδιορισμού του πλάτους κατάρρευσης (W_d) κτηρίων και ελεύθερου πλάτους οδού (W_{fr}).....	144
Σχήμα 8.3: Διαδικασία αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας οδών έναντι κατάρρευσης κτηρίων.....	145

Σχήμα 8.4: Κατανομή βλαβών για τις οδικές γέφυρες της Μητροπολιτικής περιοχής της Θεσσαλονίκης ($T_m=475$ χρόνια).....	146
Σχήμα 8.5: Κατανομή της μέσης κορυφαίας τιμής επιτάχυνσης ($PHGAz=0$: g's) στην επιφάνεια του εδάφους σύμφωνα με τα αποτελέσματα σεισμικής απόκρισης του εδάφους για το σεισμικό σενάριο με μέση περίοδο επανάληψης $T_m=475$ χρόνια.....	147
Σχήμα 8.6: Χωρική κατανομή της πιθανότητας υπέρβασης αποκλεισμού οδών κατά 50% του ενεργού πλάτους για το σεισμικό σενάριο με $T_m=475$ χρόνια.....	149
Σχήμα 8.7: Ιεράρχηση της σπουδαιότητας των οδών στην κεντρική περιοχή Θεσσαλονίκης κατά την περίοδο κρίσης.....	150
Σχήμα 8.8: Αποτίμηση της τρωτότητας του οδικού δικτύου των Γρεβενών λόγω κατολίσθησης για το άνω (i) και κάτω (ii) όριο των μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων ($T_m=475$ έτη), Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010.....	152
Σχήμα 8.9: Χωρική κατανομή των πιθανοτήτων των αναμενόμενων κλεισιμάτων των οδών (50% του πλάτους της οδού) στην πόλη των Γρεβενών ($T_m=475$ έτη).....	153

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2.1: Άποψη της φλεγόμενης πόλης του San Francisco.....	25
Εικόνα 2.2: Πυρκαγιά από διαρροή σωλήνων φυσικού αερίου στην πόλη του San Francisco.....	27
Εικόνα 2.3: Καταστροφές που σημειώθηκαν στον αυτοκινητόδρομο (Interstate 880 – Nimitz Freeway).....	27
Εικόνα 2.4: Καταστροφές στον αυτοκινητόδρομο Interstate 880-Nimitz Freeway.....	28
Εικόνα 2.5: Βλάβες στο δίκτυο ύδρευσης της πόλη Kobe.....	29
Εικόνα 2.6: Βλάβες στο σιδηροδρομικό δίκτυο Hanshin-Kobe, Ιαπωνία, σεισμός 1995. Το σιδηροδρομικό δίκτυο έμεινε εκτός λειτουργίας για περίπου 6 μήνες.....	29
Εικόνα 2.7: Πυρκαγιά από διαρροές στις σωληνώσεις φυσικού αερίου και καταστροφές στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (πόλη Kobe).....	29
Εικόνα 2.8: Καταστροφές στον αυτοκινητόδρομο Hanshin.....	30
Εικόνα 2.9: Καταστροφές στο οδικό δίκτυο της πόλης Kobe λόγω ρευστοποίησης....	30
Εικόνα 2.10: Κατεστραμμένος αυτοκινητόδρομος.....	31
Εικόνα 2.11: Διαφορική καθίζηση εδάφους στο οδικό δίκτυο.....	31
Εικόνα 7.1: Αστοχία της επένδυσης της σήραγγας.....	128
Εικόνα 7.2: Καθίζηση οδοστρώματος λόγω κατάρρευσης της οροφής του σταθμού Dakai, Kobe, Ιαπωνία.....	129
Εικόνα 7.3: Αστοχία κεντρικής συστοιχίας υποστυλωμάτων που οδήγησε στην κατάρρευση της πλάκας της οροφής του σταθμού Dakai, Kobe, Ιαπωνία.....	130

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 5.1: Ενδεικτικές τιμές των συντελεστών K_1, K_2	66
Πίνακας 5.2: Κριτήρια για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος.....	74
Πίνακας 5.3: συσχετισμός συνεπειών βλάβης με τα κατασκευαστικά στοιχεία του συστήματος.....	75
Πίνακας 5.4: Κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του επιπέδου κινδύνου.....	80
Πίνακας 5.5: Οδηγίες για την αξιολόγηση της τρωτότητας των συνιστωσών του συστήματος σε φυσικούς κινδύνους (σεισμό και εδαφικές μετακινήσεις).....	81
Πίνακας 5.6: Βαθμονόμηση συνεπειών.....	84
Πίνακας 5.7: Επιλογή του κατάλληλου επιπέδου ανάλυσης.....	85
Πίνακας 6.1: Τυπολογία δεξαμενών ύδρευσης.....	89
Πίνακας 6.2: Συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης (Pitilakis et al, 2004).....	96
Πίνακας 6.3: Αριθμός αναμενόμενων αστοχιών αγωγών του δικτύου ύδρευσης του δήμου Θερμαϊκού για τα 3 σεισμικά σενάρια.....	98
Πίνακας 6.4: Ποσοστό % των αποχετευτικών αγωγών που αναμένεται να υποστούν βλάβη λόγω εδαφικής ταλάντωσης και μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων.....	102
Πίνακας 6.5: Μόνιμες παραμορφώσεις λόγω του σεισμού της Λευκάδας.....	105
Πίνακας 6.6: Αποδεδειγμένες αστοχίες που καταγράφηκαν στο δίκτυο ύδρευσης της Λευκάδας	106
Πίνακας 6.7: Βάση δεδομένων αστοχιών των αγωγών του βασικού δικτύου ύδρευσης.....	107
Πίνακας 6.8: Σύγκριση των αστοχιών που εκτιμήθηκαν και των καταγεγραμμένων στο δίκτυο ύδρευσης.....	109
Πίνακας 8.1: Δείκτες αξιολόγησης σπουδαιότητας οδών.....	143

Πρόλογος

Οι κοινωνίες λειτουργούν όπως λειτουργεί το ανθρώπινο σώμα. Έτσι, όπως οι φλέβες και τα νεύρα είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του ανθρώπινου σώματος, έτσι και τα δίκτυα κοινής ωφελείας είναι απαραίτητα για τη λειτουργία της σύγχρονης κοινωνίας. Λόγω της αστικοποίησης των τελευταίων δεκαετιών, τα δίκτυα κοινής ωφελείας έχουν γίνει ιδιαίτερα μεγάλα και σύνθετα. Η λειτουργία των δικτύων αυτών, είναι κεφαλαιώδους σημασίας τόσο πριν, όσο και μετά από μία φυσική καταστροφή.

Ο σεισμός είναι ένα πολύ συχνό φυσικό φαινόμενο, ιδιαίτερα στη χώρα μας, και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία των δικτύων. Παρόλα αυτά, συχνά, τα δίκτυα αποτελούνται από στοιχεία από τα οποία απουσιάζει ο αντισεισμικός σχεδιασμός, εμφανίζοντας έτσι μεγάλη πιθανότητα αστοχίας. Έτσι, η σεισμική μηχανική των δικτύων κοινής ωφελείας, έχοντας ως στόχο την αποτίμηση και τη διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης των δικτύων, αποτελεί θέμα επίκαιρο, αλλά και στρατηγικής σημασίας κλάδο, ο οποίος βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη. Σε ολόκληρο τον κόσμο, αλλά ιδιαίτερα στη χώρα μας, υπάρχει έλλειψη τεκμηριωμένων και αξιόπιστων μελετών γύρω από τα θέματα τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας. Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να αναπτύσσεται ενδιαφέρον γύρω από το θέμα, τόσο διεθνώς, με πρωτοπόρες χώρες τις Η.Π.Α και την Ιαπωνία, όσο και στη χώρα μας, με πρωτοπόρο τον Κ. Πιτιλάκη και τους συνεργάτες του, οι οποίοι ασχολήθηκαν με την πόλη της Θεσσαλονίκης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, και αφού έχει δημιουργηθεί ένα σχετικό υπόβαθρο στα θέματα τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας, κρίνεται σκόπιμη η εξέλιξη των αναλύσεων στα θέματα αυτά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία καταγραφή των αξιόπιστων μεθόδων αποτίμησης τρωτότητας που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς, αλλά και στην Ελλάδα, και παρέχονται στοιχεία για κάθε δίκτυο που θεωρούνται κρίσιμα για την τρωτότητά του έναντι σεισμού.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά όλους εκείνους τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Καταρχήν, ευχαριστούμε τον Ο.Α.Σ.Π. για την παράθεση στοιχείων και ειδικότερα την κα. Λ. Πέλλη για το ενδιαφέρον που έδειξαν και την αμέριστη βοήθειά τους, όλους αυτούς τους μήνες. Ευχαριστούμε την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. και ειδικότερα τον κ. Α. Γκαβογιάννη για το χρόνο που μας αφιέρωσαν και τις πολύτιμες πληροφορίες γύρω από τα θέματα τρωτότητας του δικτύου ΜΕΤΡΟ που μας παρείχαν. Επίσης, την εταιρεία Δ.Ε.Σ.Φ.Α. και συγκεκριμένα την κα. Π. Γουργιώτη για τις πληροφορίες που μας προσέφερε για το δίκτυο παροχής φυσικού αερίου. Τέλος, ευχαριστούμε τον επιβλέποντα Εμμ. Βουγιούκα για τη συστηματική επιστημονική του καθοδήγηση και την ηθική του υποστήριξη.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση γύρω από το θέμα της σεισμικής τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας. Για το σκοπό αυτό, αναλύεται η σημασία της τρωτότητας, των καμπύλων τρωτότητας, της σεισμικής μηχανικής των δικτύων κοινής ωφελείας και της σεισμικής διακινδύνευσης. Παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνιστώσες κάθε δικτύου και περιγράφεται με αναλυτικές ή προσεγγιστικές λύσεις η απόκριση κάθε συνιστώσας στο σεισμό. Ακόμη, περιγράφονται μέθοδοι αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας των δικτύων που έχουν αναπτυχθεί τόσο διεθνώς, όσο και στην Ελλάδα. Τέλος, αναλύονται τα στοιχεία που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά τον σχεδιασμό των δικτύων, όπως αυτά προκύπτουν από την εμπειρία από σεισμικές αστοχίες που έχουν συμβεί διεθνώς.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας δόθηκε έμφαση στα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης και παροχής φυσικού αερίου, καθώς η συμπεριφορά των υπόλοιπων δικτύων κοινής ωφελείας είναι παρεμφερής. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη συμπεριφορά των υπόγειων αγωγών, που είναι η βασική συνιστώσα των περισσότερων δικτύων, εφόσον η σεισμική τους απόκριση παρουσιάζει ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις υπόλοιπες κατασκευές. Όσον αφορά στα μεταφορικά δίκτυα, γίνεται διερεύνηση για το οδικό δίκτυο, αλλά και για το δίκτυο ΜΕΤΡΟ. Οι σήραγγες και οι γέφυρες παρουσιάζουν ιδιαίτερη συμπεριφορά κατά τον σεισμό, η οποία περιγράφεται με προσεγγιστικές μεθόδους. Επίσης, μελετάται και η περίπτωση αστοχίας του οδικού δικτύου λόγω κατάρρευσης παρόδιων κτηρίων.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας, είναι η παρουσίαση του διαθέσιμου υποβάθρου γύρω από τα θέματα τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας, έτσι ώστε να υπάρξει εξέλιξη των μεθόδων και να γίνει η κατάλληλη προσαρμογή τους ώστε να ανταποκρίνονται στα ελληνικά δεδομένα.

Abstract

The present study reviews vulnerability issues of lifelines against earthquake. First, we define the notion of vulnerability and the major concepts of lifeline seismic engineering. Description of the main components of lifelines follows and analytical or approximate solutions are presented. Then, we give a presentation of the methods of assessment of seismic vulnerability that are developed not only internationally, but also in Greece. In the end, the elements that need special caution during the antiseismic design of lifelines, as shown by international experience, are highlighted.

Within the study, the emphasis was given to the water, waste water and gas utility system, since the behavior of the other lifelines is similar. Particular attention was given to the response of the underground pipelines to earthquake, since underground pipelines are the most important components of lifelines, and their response to earthquake presents specificities. In terms of transport lines, this study refers to the road network and the underground network. Tunnels and bridges present specific behavior in earthquake, which is described with approximate methods in this study. Failure of roads because of building collapses is also investigated.

The aim of this study is the presentation of the background that exists in the estimation of seismic vulnerability of lifelines, so that further progress is made and so that existing methods are adjusted to the Greek conditions.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση γύρω από το θέμα της αποτίμησης της τρωτότητας των δικτύων ζωής και η επισκόπηση των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς. Μέσα από τη μελέτη των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί και εμπειρίας από περιστατικά αστοχίας του παρελθόντος, εξάγονται συμπεράσματα για τον καθορισμό των κρίσιμων σημείων σε κάθε δίκτυο και τη βελτίωση των μεθόδων αποτίμησης τρωτότητας που ήδη υπάρχουν. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματεύεται κυρίως τα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης, φυσικού αερίου και το οδικό δίκτυο.

Δίκτυα Ζωής (Lifelines)

Ως δίκτυα ζωής ή αλλιώς γραμμές ζωής (lifelines) ορίζονται οι κοινωφελείς υπηρεσίες, οι οποίες περιλαμβάνουν κατασκευές και εξοπλισμούς, που συνθέτουν τις υποδομές μίας ευρύτερης περιοχής. Τα δίκτυα ζωής επηρεάζουν άμεσα τις κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες της περιοχής και είναι αναγκαία, καθώς καλύπτουν βασικές ανάγκες των χρηστών. Είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη της κοινωνίας και την οικονομική ευημερία της περιοχής. Υπάρχουν δύο κατηγορίες δικτύων ζωής:

- Τα δίκτυα κοινής ωφελείας, τα οποία περιλαμβάνουν το δίκτυο ύδρευσης, αποχέτευσης, το δίκτυο παροχής φυσικού αερίου και υγρών καυσίμων, το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και το δίκτυο τηλεπικοινωνιών.
- Τα μεταφορικά δίκτυα, τα οποία περιλαμβάνουν το οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο, καθώς και το δίκτυο ΜΕΤΡΟ, τα λιμάνια και τα αεροδρόμια.

Τα δίκτυα κοινής ωφελείας χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη έκτασή τους, καθώς εκτείνονται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, αλλά και από την πολυπλοκότητά της δομής τους, καθώς περιλαμβάνουν γραμμές και κόμβους διαφορετικών τύπων, όπως θαμμένους αγωγούς, αντλιοστάσια, εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων, κ.ά. Χαρακτηριστικές είναι, επίσης, οι κατασκευαστικές προδιαγραφές, η δομή, αλλά και η ποικιλία των υλικών κατασκευής τους (χάλυβας, τσιμέντο, πολυαιθυλένιο), τα οποία καθορίζουν τη συμπεριφορά τους σε διάφορους κινδύνους.

Τα δίκτυα ζωής, λόγω της έκτασής τους, είναι τρωτά σε μεγάλης έκτασης φυσικούς ή και ανθρωπογενείς κινδύνους. Η αστοχία ενός δικτύου ζωής μπορεί να προκαλέσει ανθρώπινα θύματα, άμεσες οικονομικές απώλειες, όπως το κόστος επιδιόρθωσης ή αντικατάστασης στοιχείων των δικτύων που υπέστησαν ζημιές, αλλά και έμμεσες οικονομικές απώλειες που προέρχονται από τη διακοπή της λειτουργίας του δικτύου λόγω αστοχίας, γεγονός που συνεπάγεται με διακοπή παροχής των υπηρεσιών που προσφέρει το δίκτυο και παρεμπόδιση της λειτουργίας του. Ακόμη, από αστοχία ενός δικτύου κοινής ωφελείας μπορεί να προκληθεί περιβαλλοντική μόλυνση ή και συμπληρωματικές απώλειες σε άλλα δίκτυα ή λειτουργίες, εξαιτίας αλληλεπίδρασης μεταξύ των συστημάτων. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η αναγκαιότητα λεπτομερούς μελέτης της συμπεριφοράς των δικτύων σε φυσικούς ή ανθρωπογενείς κινδύνους, ώστε να αποφεύγονται κατά το δυνατόν οι αστοχίες.

Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των εννοιών της τρωτότητας, της σεισμικής μηχανικής των δικτύων και των καμπύλων τρωτότητας. Γίνεται, επίσης, εκτενής αναφορά στη διεθνή εμπειρία αστοχιών δικτύων λόγω σεισμού.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά τα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης και παροχής φυσικού αερίου στην πόλη της Αθήνας.

Το 4^ο κεφάλαιο αναφέρεται στους υπόγειους αγωγούς και στις ιδιαιτερότητές τους, ενώ δίνονται προσεγγιστικές λύσεις για την απόκρισή τους στο σεισμό.

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής αναφορά στις κατευθυντήριες γραμμές που έδωσε η American Lifelines Alliance τη δεκαετία του 2000 για τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθήσουν οι εταιρείες διαχείρισης των δικτύων ύδρευσης και παροχής φυσικού αερίου, ώστε να αποτιμηθεί η σεισμική τους τρωτότητα.

Στο 6^ο κεφάλαιο αναφέρεται η μέθοδος που ακολουθείται στην Ελλάδα για την αποτίμηση της τρωτότητας και δίνονται παραδείγματα τέτοιων μελετών στην πόλη της Θεσσαλονίκης, των Γρεβενών και της Λευκάδας.

Στο 7^ο κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά το οδικό δίκτυο και το δίκτυο ΜΕΤΡΟ της Ελλάδας και γίνεται εκτενής αναφορά στις μεθόδους αποτίμησης τρωτότητας των γεφυρών, αλλά και στην απόκριση των σηράγγων σε περίπτωση σεισμού.

Στο 8^ο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία αποτίμησης τρωτότητας του οδικού δικτύου που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα και παρουσιάζονται ορισμένες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για το οδικό δίκτυο.

Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα για την περεταίρω εξέλιξη που μπορεί να πραγματοποιηθεί γύρω από τα θέματα αποτίμησης σεισμικής τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας στην Ελλάδα.

Κεφάλαιο 2

Η έννοια της τρωτότητας, οι καμπύλες τρωτότητας και η διεθνής εμπειρία

2.1. Τρωτότητα Δικτύων Κοινής Ωφελείας έναντι σεισμού

Με τον όρο τρωτότητα (vulnerability) νοείται η συμπεριφορά ενός υπό διακινδύνευση στοιχείου που οφείλεται σε ένα φαινόμενο με μεταβλητή ένταση. Ιδιαίτερα για την περίπτωση του σεισμού, φαινόμενο αρκετά συχνό στη χώρα μας, η εμπειρία έχει δείξει ότι τα δίκτυα κοινής ωφελείας είναι αρκετά τρωτά σε ισχυρούς σεισμούς. Η διεθνής εμπειρία έχει δείξει ότι ένα δίκτυο ύδρευσης ή αποχέτευσης παρουσιάζει θραύσεις ή διαρροές μετά από κάποιο σεισμό.

Οι αστοχίες που εμφανίζονται μετά από έναν σεισμό οφείλονται στα εξής φαινόμενα που προκαλεί ένας σεισμός:

- Εδαφική ταλάντωση, δηλαδή αιφνίδιες παραμορφώσεις του εδάφους που οφείλονται στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Οι αστοχίες που προκαλούνται από την εδαφική ταλάντωση εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής του δικτύου και άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου.
- Διασταυρώσεις με ρήγματα, στις περιοχές των ρηγμάτων εμφανίζονται τοπικές μόνιμες παραμορφώσεις. Είναι προτιμότερο, εάν αυτό είναι εφικτό, να αποφεύγεται η διασταύρωση του δικτύου με ρήγματα. Όπου αυτό δεν είναι δυνατόν, προτιμάται να μην κατασκευάζονται συνδέσεις και αλλαγές διευθύνσεων σε περιοχές ρηγμάτων και τα δίκτυα να βρίσκονται σε μικρό σχετικά βάθος, ώστε να παραμορφώνονται περισσότερο και να μην υφίστανται μεγάλες ζημιές.
- Καθιζήσεις, σε ζώνες μετάβασης από καλύτερο έδαφος σε χειρότερο, είναι συχνό φαινόμενο να συμβαίνουν διαφορικές καθιζήσεις, με αποτέλεσμα να συμβαίνουν αστοχίες στο δίκτυο.
- Κατολισθήσεις, δηλαδή μαζικές κινήσεις εδαφικών πρηνών λόγω αστοχίας του εδαφικού πρηνούς από διάτμηση κατά μήκος μιας επιφάνειας. Αστοχίες στα δίκτυα κοινής ωφελείας λόγω κατολισθήσεων οφείλονται κυρίως σε πτώση βράχων ή σε ολίσθηση πρηνούς που συμπαρασύρει το δίκτυο.
- Ρευστοποίηση, δηλαδή η μετατροπή κορεσμένου, μη συνεκτικού εδάφους από στερεά μορφή σε υγρή, ως αποτέλεσμα της αυξημένης πίεσης του νερού των πόρων που συνεπάγεται μερική ή ολική απώλεια της διατμητικής αντοχής. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης εμφανίζεται όταν χαλαρά, κορεσμένα, κοκκώδη εδάφη υπόκεινται σε ισχυρή εδαφική ταλάντωση. Η ρευστοποίηση, λόγω της άνωσης που αναπτύσσεται, έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση των υπόγειων κατασκευών και, σε περιπτώσεις όπως έντονη εδαφική κλίση ή μεγάλα επιφανειακά φορτία, την ανάπτυξη μόνιμων παραμορφώσεων που οδηγούν όλες τις κατασκευές που εδράζονται στο συγκεκριμένο έδαφος σε αστοχία.

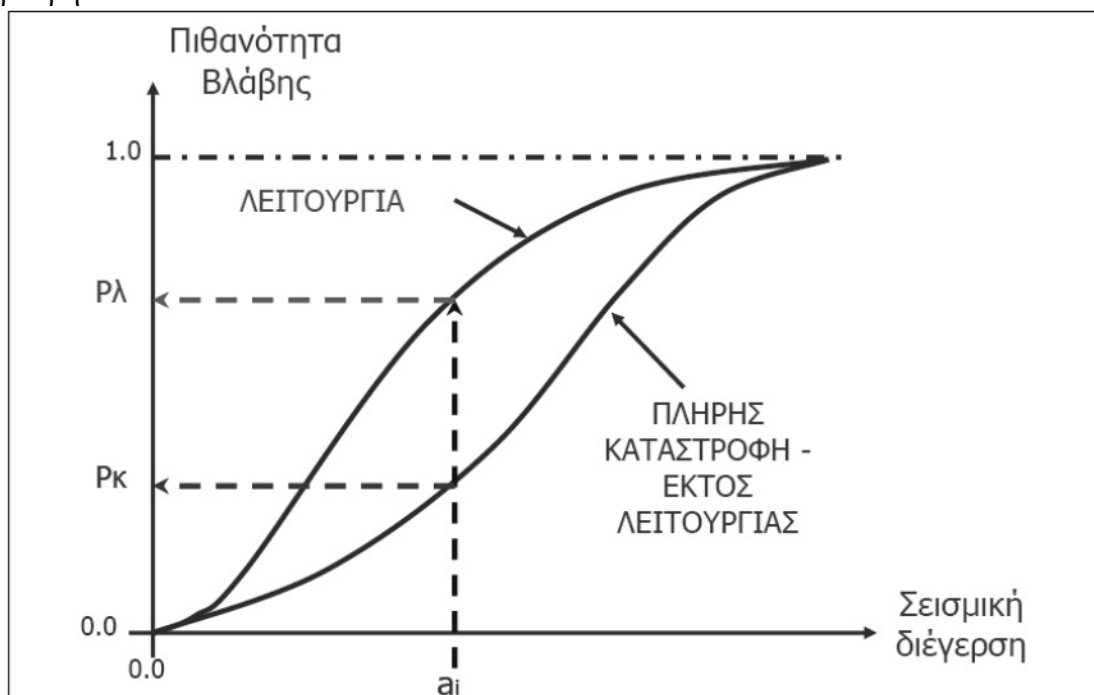
Για την αποφυγή εμφάνισης αστοχιών μετά από έναν ισχυρό σεισμό, απαιτείται λεπτομερής αντισεισμικός σχεδιασμός του συστήματος του δικτύου, αλλά και η εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης. Η εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης

των δικτύων κοινής ωφελείας και των διαφορετικού τύπου υποδομών που περιλαμβάνουν, είναι μια πολύπλοκη και σύνθετη διαδικασία, που απαιτεί πλήθος εξειδικευμένων μελετών. Η κλίμακα των έργων παίζει σημαντικό ρόλο και είναι το στοιχείο που διαφοροποιεί τη μελέτη από τα κτήρια στα οποία το πρόβλημα είναι σημειακό. Ως εκ τούτου, η σημασία της ποικιλίας των εδαφικών συνθηκών και η μεταβλητότητα της εδαφικής απόκρισης στο χώρο είναι κεφαλαιώδης στη μελέτη της σεισμικής τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας και την διαχείριση της σεισμικής τους διακινδύνευσης.

Ο σκοπός της αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας ενός δικτύου είναι να βρεθεί ο βαθμός βλάβης για ένα επίπεδο σεισμικής έντασης σε όλες τις συνιστώσες του δικτύου. Η σεισμική διακινδύνευση (Risk) εκφράζει τις απώλειες που οφείλονται στις άμεσες (ανθρώπινα θύματα, αστοχίες στις κατασκευές), αλλά και έμμεσες (διακοπή οικονομικών, κοινωνικών δραστηριοτήτων) συνέπειες ενός σεισμού σε μία περιοχή.

Για να υπολογιστεί η σεισμική διακινδύνευση (Risk), θα πρέπει πρώτα να εκτιμηθεί η τρωτότητα (Vulnerability), η σεισμική επικινδυνότητα (Hazard) και η σημαντικότητα (Importance) του στοιχείου που μελετάται.

Η τρωτότητα εκφράζει το βαθμό απωλειών ενός στοιχείου που εκτίθεται σε σεισμικό κίνδυνο, που προκύπτει για ένα δεδομένο επίπεδο σεισμικής διέγερσης. Συνήθως εκφράζεται με καμπύλες τρωτότητας. Οι καμπύλες αυτές, δίνουν την πιθανότητα το υπό εξέταση στοιχείο να βρίσκεται ή να έχει υπερβεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο βλάβης κάτω από την επίδραση μιας, συγκεκριμένης έντασης, σεισμικής διέγερσης. Οι καμπύλες αυτές δίνουν μία σαφή απεικόνιση της σχέσης σεισμική διέγερση και βλάβη.



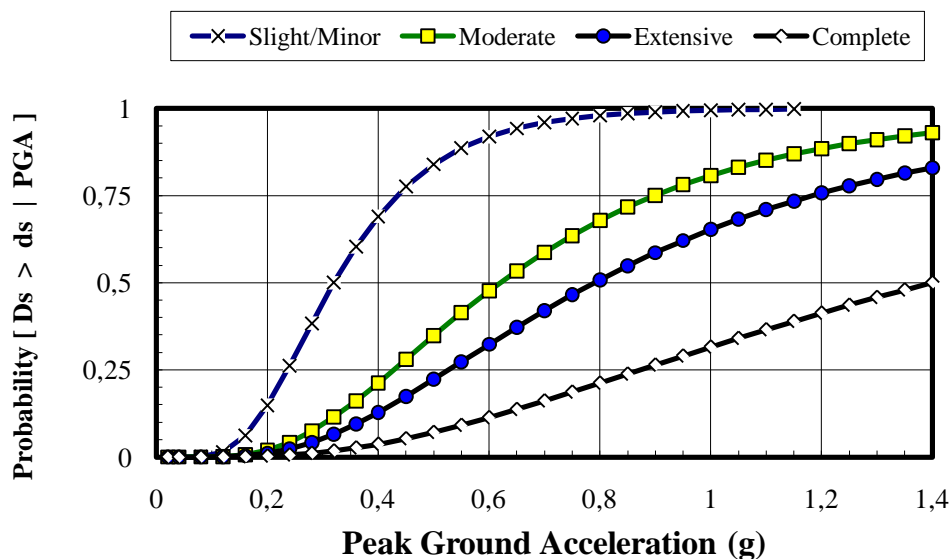
Σχήμα 2.1: Απεικόνιση της σχέσης «Σεισμική διέγερση και βλάβη», Σ. Φωτοπούλου, 2007.

Οι σχέσεις τρωτότητας είναι δυνατόν να έχουν διάφορες μορφές. Για κάθε δίκτυο καθορίζεται μία συγκεκριμένη σχέση τρωτότητας, ανάλογα με τη δεδομένη διάταξη των στοιχείων του δικτύου. Κάθε στοιχείο αποτελεί ένα τμήμα του δικτύου που έχει σταθερές ιδιότητες, όπως υλικό, διαστάσεις, είδος σύνδεσης, κ.τ.λ. και ομοιόμορφη έκθεση στο σεισμικό κίνδυνο. Οι σχέσεις τρωτότητας, αναμφίβολα, περιέχουν τους

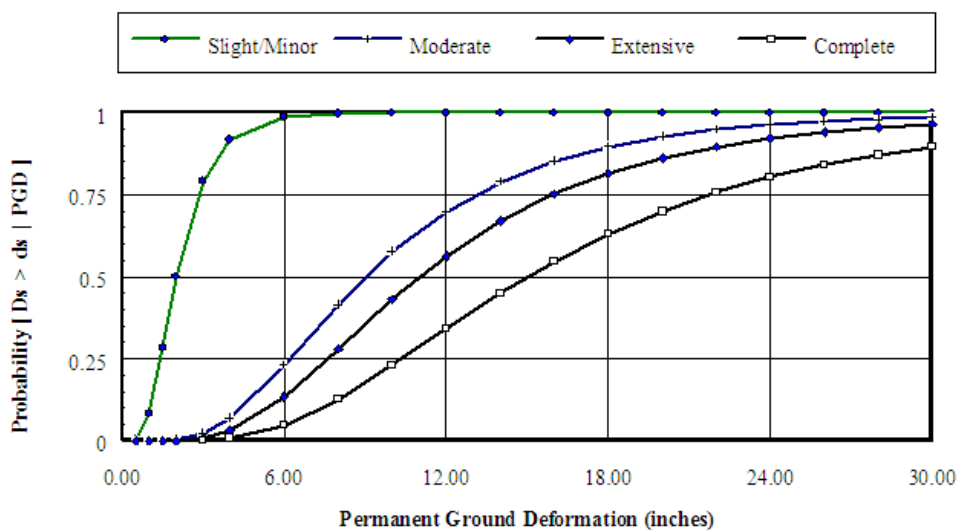
παράγοντες της αβεβαιότητας και της τυχαιότητας, οι οποίοι πηγάζουν από τον προσδιορισμό του σεισμικού κινδύνου αλλά και από την απόδοση του ίδιου του στοιχείου στο συγκεκριμένο επίπεδο κινδύνου.

Για την αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω καμπύλες:

- Καμπύλες βλάβης (Damage functions – Καμπύλες τρωτότητας): Καμπύλες που συσχετίζουν την πιθανότητα να βρεθεί η κατασκευή σε μια δεδομένη κατάσταση βλάβης για μια δεδομένη σεισμική απαίτηση (π.χ. μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ή μόνιμη εδαφική παραμόρφωση). Συνήθως, ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή, όπως για παράδειγμα η παρακάτω καμπύλη:

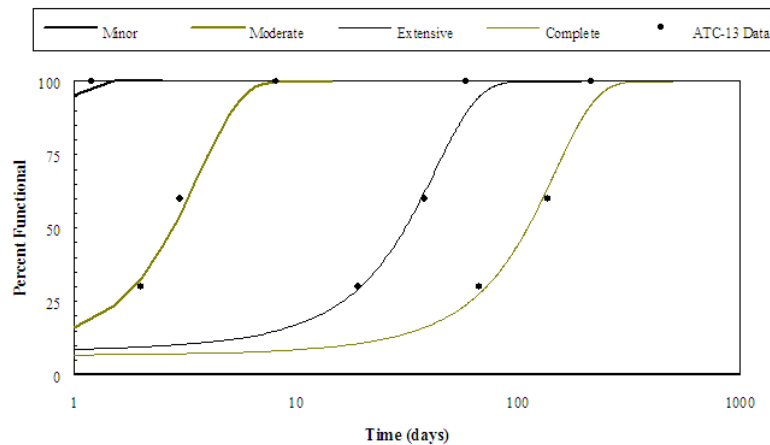


Σχήμα 2.2: Καμπύλη τρωτότητας για διάφορες καταστάσεις αστοχίας για μια αντισεισμικώς σχεδιασμένη σιδηροδρομική γέφυρα που υπόκειται στη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, Ε. Βουγιούκας, Κ. Τρέζος, 2005.



Σχήμα 2.3: Καμπύλη τρωτότητας για διάφορες καταστάσεις αστοχίας για μια αντισεισμικώς σχεδιασμένη σιδηροδρομική γέφυρα που υπόκειται σε μόνιμη εδαφική μετακίνηση, Ε. Βουγιούκας, Κ. Τρέζος, 2005.

- Καμπύλες αποκατάστασης: Καμπύλες που δίνουν το ποσοστό λειτουργικότητας του συστήματος συναρτήσει του χρονικού διαστήματος μετά τον σεισμό για τους διάφορους βαθμούς βλάβης. Παράδειγμα καμπύλης αποκατάστασης ακολουθεί στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.4: Καμπύλες αποκατάστασης σιδηροδρομικών γεφυρών, Ε. Βουγιούκας, Κ. Τρέζος, 2005.

Η σημαντικότητα συνδέεται με λειτουργικά, οικονομικά, κοινωνικά και άλλα κριτήρια. Η σεισμική επικινδυνότητα εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί σεισμική δόνηση συγκεκριμένης έντασης σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στην εξεταζόμενη περιοχή. Η σεισμική διακινδύνευση υπολογίζεται με τη χρήση του παρακάτω μαθηματικού τύπου:

$$[\text{Risk}] = [\text{Hazard}] \times [\text{Vulnerability}] \times [\text{Importance}]$$

2.2.Σεισμική μηχανική Δικτύων Κοινής Ωφελείας (lifeline earthquake engineering)

Τα τελευταία χρόνια τα Δίκτυα Κοινής Ωφελείας (Δ.Κ.Ω.) έχουν γίνει μεγάλα και σύνθετα, ως αποτέλεσμα της μεγάλης αστικοποίησης. Η λειτουργία των δικτύων τόσο πριν, όσο και αμέσως μετά από ένα σεισμό είναι ζωτικής σημασίας για την υποστήριξη των περιοχών που έχουν πληγεί. Τα δίκτυα αποτελούνται τόσο από νεότερες κατασκευές, όσο και από παλαιότερες υποδομές, για τις οποίες δεν υπάρχει αντισεισμική μελέτη. Ως εκ τούτου, η σεισμική μηχανική των δικτύων κοινής ωφελείας αποτελεί έναν κλάδο επίκαιρο. Ο κλάδος αυτός, ασχολείται με την εκτίμηση της τρωτότητας και της σεισμικής επικινδυνότητας, με στόχο την αποτίμηση και τη διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης των δικτύων. Στόχος της αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων είναι η εκτίμηση των, υλικών και μη, απωλειών, η κατά το δυνατόν μείωσή τους και ο καθορισμός προτεραιοτήτων κατά τη διαχείρισή του σεισμικού κινδύνου. Ως εκ τούτου συμβάλλει και στον καθορισμό των επεμβάσεων σε προ-σεισμικό και μετά-σεισμικό επίπεδο που αφορούν στην ενίσχυση του συστήματος.

Το αντικείμενο του κλάδου της σεισμικής μηχανικής των δικτύων κοινής ωφελείας, είναι αρκετά σύνθετο και η μέχρι τώρα εφαρμογή του αμελητέα. Αυτό γιατί, δεν υπάρχουν μέχρι σήμερα αξιόπιστες πηγές καταγραφής ζημιών στα δίκτυα κοινής

ωφελείας από προηγούμενους σεισμούς. Σε αυτό προστίθεται και το γεγονός ότι τα υπό εξέταση συστήματα είναι πολύπλοκα, κατανέμονται και μεταβάλλονται εκτεταμένα στο χώρο. Τα τελευταία, όμως, χρόνια, κατέστη δυνατή η καταγραφή απωλειών στα δίκτυα κοινής ωφελείας, λόγω ισχυρών σεισμών που συνέβησαν και έτσι υπάρχει πλέον η δυνατότητα συλλογής πολύτιμων στοιχείων για την αποτίμηση τρωτότητας. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί πολλές μεθοδολογίες για την αποτίμηση τρωτότητας των δικτύων σε αστικό περιβάλλον.

Η διαδικασία αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης των δικτύων κοινής ωφελείας προϋποθέτει την επιλογή της βέλτιστης σχέσης τρωτότητας, η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το υλικό κατασκευής του δικτύου, το είδος του δικτύου, την ηλικία του και τις προδιαγραφές κατασκευής του. Επειδή σε Ελληνικό και Ευρωπαϊκό επίπεδο υπάρχει έλλειψη μίας ενιαίας τυπολογίας και ενός κοινού θεσμικού πλαισίου που σχετίζεται με τις μεθόδους αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης, έχει επικρατήσει η χρήση της αμερικάνικης τυπολογίας. Η αμερικάνικη τυπολογία διαφέρει κατά πολύ από τις ευρωπαϊκές και ελληνικές πρακτικές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υιοθετούνται σχέσεις τρωτότητας που δημιουργήθηκαν με βάση αμερικάνικους και ιαπωνικούς σεισμούς. Στην Ευρώπη, όπου δεν υπάρχουν καταγεγραμμένες αστοχίες στα δίκτυα, η ορθότητα των αποτελεσμάτων μεθοδολογιών που χρησιμοποιούν σχέσεις τρωτότητας από αμερικάνικους και ιαπωνικούς σεισμούς, είναι αμφίβολη.

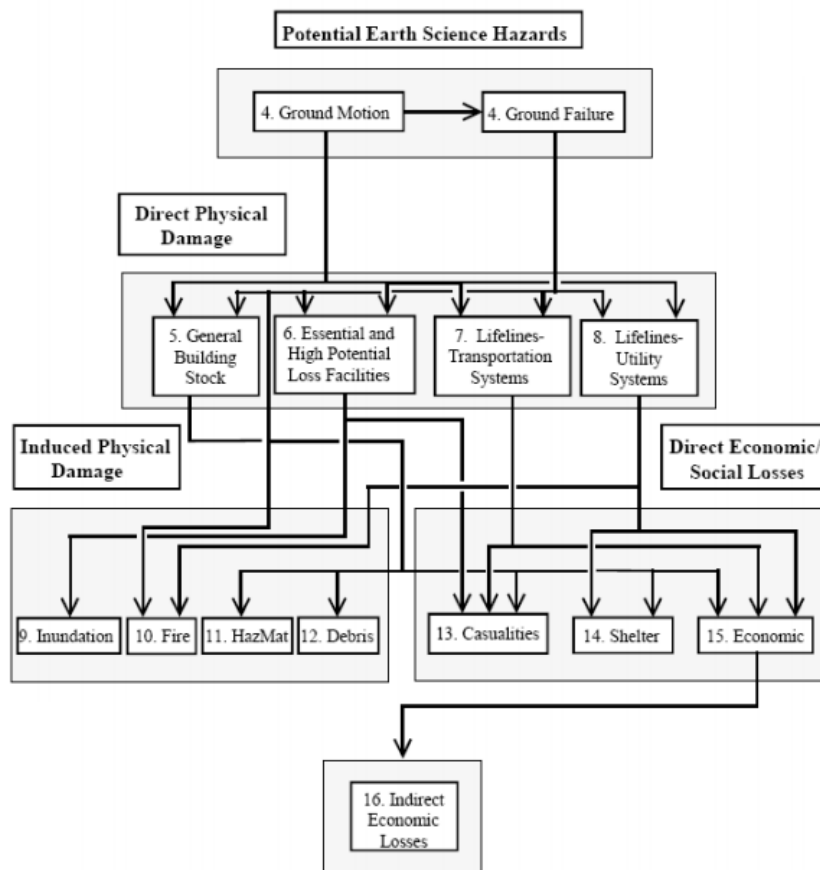
Μελέτες σεισμικής διακινδύνευσης Δικτύων Κοινής Ωφελείας

Η FEMA (Federal Emergency Management Agency), το 1994, ταξινόμησε τις μελέτες ανάλυσης της σεισμικής διακινδύνευσης των Δικτύων Κοινής Ωφελείας σε πέντε κατηγορίες:

- Γενικές μελέτες τρωτότητας στοιχείων και συστημάτων,
- Μελέτες σεναρίων χωρίς αναλύσεις εξυπηρετικότητας,
- Μελέτες σεναρίων με αναλύσεις εξυπηρετικότητας,
- Μελέτες καθορισμού προτεραιοτήτων αποκατάστασης μετά το σεισμό,
- Άλλες μελέτες που λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση των δικτύων.

Τυπικά παραδείγματα της πρώτης κατηγορίας μελετών είναι η μεθοδολογία του ATC-13, που διατυπώθηκε το 1985 και η μεταγενέστερη του ATC-25, που διατυπώθηκε το 1991 για την εκτίμηση των συνεπειών, άμεσων και έμμεσων, αλλά και την εκτίμηση της λειτουργικότητας των Δικτύων Κοινής Ωφελείας. Οι μεθοδολογίες αυτές μπορούν να προσφέρουν ένα ικανοποιητικό επίπεδο κατανόησης των απωλειών και της επίδρασης του σεισμού στα δίκτυα και το επίπεδο λεπτομερειών που παρέχουν είναι κατάλληλο για ανάλυση τύπου σεναρίων. Το 1999, διατυπώθηκε η μεθοδολογία RADIUS, επίσης μεθοδολογία πρώτης κατηγορίας, η οποία κάνει εκτεταμένη χρήση της τεχνολογίας των GIS.

Παράδειγμα μελέτης της δεύτερης κατηγορίας, θεωρείται η μεθοδολογία HAZUS (NIBS 1997,1999,2002), η οποία ωστόσο μπορεί να θεωρηθεί, εν μέρει και τέταρτης κατηγορίας. Η παραπάνω μεθοδολογία θεωρείται η πιο ολοκληρωμένη μεθοδολογία υπολογισμού απωλειών λόγω σεισμού. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιεί τη λογική των σεισμικών σεναρίων και αξιοποιεί βάσεις δεδομένων για ορισμένα στοιχεία. Οι σχέσεις τρωτότητας που χρησιμοποιεί είναι εμπειρικές και αποτιμάται μέσω αυτών το επίπεδο αστοχίας και ο απαιτούμενος χρόνος αποκατάστασης, ενώ παράλληλα, παρέχει λεπτομερείς χάρτες κατάλληλους για διαχείριση του σεισμικού κινδύνου και προτείνει συγκεκριμένα εργαλεία για τον υπολογισμό τόσο των άμεσων, όσο και των έμμεσων απωλειών και των συνεπειών στην κοινωνία.



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας του HAZUS 2004, Σ. Φωτοπούλου, 2007.

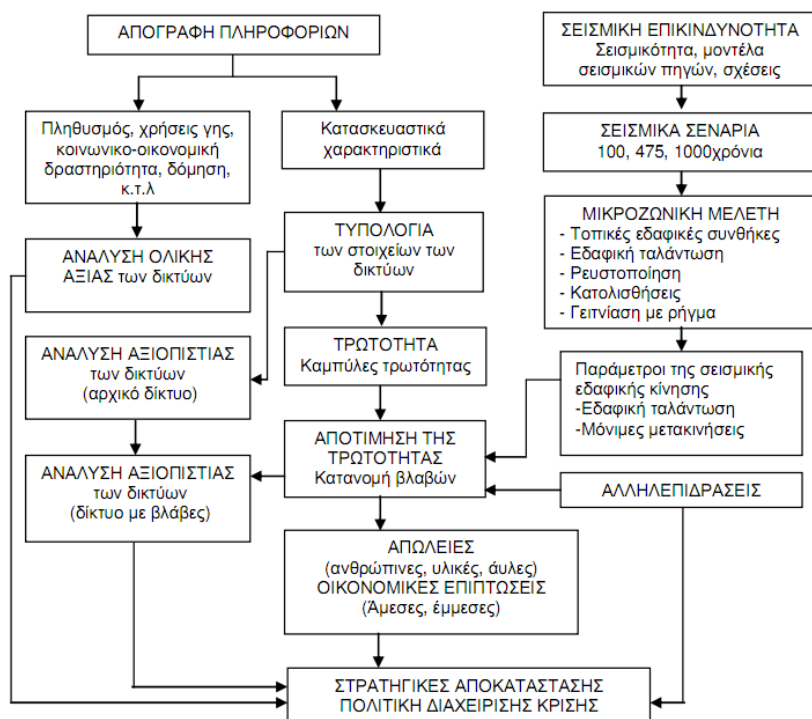
Το παραπάνω διάγραμμα ροής περιγράφει τη μεθοδολογία HAZUS και περιλαμβάνει τις εξής συνιστώσες:

- Αναμενόμενος σεισμικός κίνδυνος (potential earth science hazard),
- Απογραφή πληροφοριών (inventory),
- Άμεσες φυσικές απώλειες (direct physical damage),
- Έμμεσες φυσικές απώλειες (induced physical damage),
- Άμεσες κοινωνικο – οικονομικές απώλειες (direct economic – social damage),
- Έμμεσες οικονομικές απώλειες (indirect economic loss).

Στη γενική περίπτωση, απαιτείται ο υπολογισμός όλων των παραπάνω συνιστωσών για τον πλήρη υπολογισμό των απωλειών. Παρόλα αυτά, αυτό μπορεί να διαφέρει και να μην ενδείκνυται ο υπολογισμός όλων των συνιστωσών ανάλογα με την πολυπλοκότητα και το αντίστοιχο κόστος. Για να ανταποκριθεί, λοιπόν, η μεθοδολογία στις ανάγκες των χρηστών της, θα πρέπει οι συνιστώσες της να έχουν πολλαπλά επίπεδα ακρίβειας και λεπτομέρειας. Η μεθοδολογία HAZUS 2004, χρησιμοποιείται από τις ΗΠΑ, αλλά και διεθνώς, για την κατάρτιση σχεδίων έκτακτων αναγκών σε εθνικό επίπεδο. Η αστοχία των στοιχείων, κατά HAZUS, περιγράφεται με πέντε επίπεδα (μηδενική αστοχία, μικρή, μεσαία, εκτεταμένη και ολοκληρωτική καταστροφή). Οι καμπύλες τρωτότητας υπολογίζουν την πιθανότητα υπέρβασης ενός συγκεκριμένου επιπέδου βλάβης για ένα καθορισμένο επίπεδο σεισμικής έντασης.

Πρόσφατα, αναπτύχθηκε στην Ευρώπη μία νέα μεθοδολογία, παρόμοια με την μεθοδολογία HAZUS, με την ονομασία RISK-UE, η οποία περιλαμβάνει εξελιγμένες μεθόδους αποτίμησης της επικινδυνότητας, αναγνώρισης των ιδιαιτεροτήτων και της τυπολογίας των ευρωπαϊκών κατασκευών και δικτύων, αποτίμησης των διεθνώς χρησιμοποιούμενων καμπύλων τρωτότητας κ.τ.λ..

Κατά την περίοδο 2003-2007 και στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος SRMLIFE, αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης των δικτύων κοινής ωφελείας. Η μεθοδολογία αυτή θεωρείται ότι ανταποκρίνεται στα δεδομένα και στις ανάγκες της Ελληνικής πρακτικής. Το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας SRMLIFE (2003-2007), Κ. Πιτλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008.

Μετά τη συλλογή των πληροφοριών για το δίκτυο, γίνεται ψηφιοποίηση του δικτύου και δημιουργία της αντίστοιχης βάσης δεδομένων, τυπολογία των στοιχείων του δικτύου και εκτίμηση των απωλειών. Η εκτίμηση των απωλειών γίνεται με βάση κατάλληλες σχέσεις τρωτότητας για σεισμικά σενάρια με περίοδο επαναφοράς 100, 475 και 1000 έτη αντίστοιχα. Επίσης, πραγματοποιείται μελέτη σεισμικής απόκρισης των εδαφικών σχηματισμών βάση της οποίας εκτιμούνται οι παράμετροι της σεισμικής εδαφικής κίνησης (εδαφική ταλάντωση) για τα τρία σενάρια των 100, 475 και 1000 ετών που χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των υπό κίνδυνο στοιχείων.

Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται είναι τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Είναι απαραίτητη η χωρική απεικόνιση όλων των στοιχείων του συστήματος, όπως και η σεισμική επικινδυνότητα της εν λόγω περιοχής, καθώς το δίκτυο καταλαμβάνει μεγάλες εκτάσεις. Έτσι, δημιουργούνται χάρτες με το υπό μελέτη δίκτυο, που περιλαμβάνουν και την αντίστοιχη βάση δεδομένων. Επίσης, δημιουργούνται χάρτες που προκύπτουν από τη μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας και την επιρροή των

τοπικών εδαφικών συνθηκών, που περιλαμβάνουν τη χωρική κατανομή της αναμενόμενης σεισμικής έντασης, εκφρασμένες σε όρους μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας ή φασματικών τιμών. Με βάση την ταξινόμηση των συνιστωσών του δικτύου, εφαρμόζεται η σχετική μεθοδολογία και εκτιμάται η τρωτότητα του κάθε στοιχείου, αλλά και η τρωτότητα όλου του συστήματος συνολικά. Στο τέλος, εντοπίζονται όλα τα στοιχεία του συστήματος που θεωρούνται ευπαθή και γίνονται εκτιμήσεις για τη συμπεριφορά και το επίπεδο των υπηρεσιών του συστήματος αμέσως μετά το σεισμό, αλλά και αναλύσεις για την περίοδο αποκατάστασης του δικτύου.

Σε γενικές γραμμές, η αποτίμηση της τρωτότητας ενός δικτύου ακολουθεί τα εξής στάδια:

- Συλλογή πληροφοριών για το σύστημα,
- Ψηφιοποίηση του δικτύου/ δημιουργία βάσης δεδομένων,
- Τυπολογία,
- Μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας,
- Μελέτη επιρροής τοπικών εδαφικών συνθηκών (μικροζωνική μελέτη),
- Εφαρμογή των κατάλληλων σχέσεων τρωτότητας,
- Εκτίμηση αναμενόμενων βλαβών,
- Ανάλυση της ολικής αξίας και ιεράρχηση της σπουδαιότητας των συνιστωσών του δικτύου με βάση τα κατάλληλα κριτήρια,
- Ανάλυση αξιοπιστίας/εξυπηρετικότητας/συνδετικότητας συστήματος και εκτίμηση επιπέδου παρεχόμενων υπηρεσιών,
- Εκτίμηση του χρόνου αποκατάστασης των βλαβών,
- Εκτίμηση των απωλειών και των οικονομικών επιπτώσεων,
- Δημιουργία σεναρίων και ανάπτυξη στρατηγικών και πολιτικής για τη διαχείριση της κρίσης, με βάση τον συνδυασμό των αναμενόμενων βλαβών και της σπουδαιότητας.

Μία άλλη γενική μελέτη τρωτότητας αναπτύχθηκε το 1991 στην πόλη Everett, Washington, (Ballantyne & Heubach), για τρία σεισμικά σενάρια για τα δίκτυα φυσικού αερίου, ύδρευσης, αποχέτευσης, τηλεπικοινωνιών και ηλεκτρικής ενέργειας. Στη μελέτη αυτή αποτιμήθηκε το οικονομικό κόστος ως το κόστος επισκευής πιθανών βλαβών (θραύσεων, διαρροών, αντικαταστάσεων). Οι εκτιμήσεις ειδικών που επισκέφτηκαν τη συγκεκριμένη περιοχή ήταν εκείνες που έδωσαν τα τελικά αποτελέσματα της μελέτης.

Το 1994, η FEMA παρουσιάζει μία σημαντική μελέτη για το σύστημα ύδρευσης της Κομητείας του San Diego Country και για τη μητροπολιτική περιοχή της Νότιας Καλιφόρνιας. Διατυπώθηκαν δύο σεισμικά σενάρια που ανταποκρίνονταν στον πιθανότερο και στον μέγιστο σεισμό, σύμφωνα με τα οποία υπολογίστηκε η σεισμική επικινδυνότητα.

Εκτεταμένη μελέτη τόσο για την αξιοπιστία των στοιχείων του δικτύου, όσο και του συνολικού συστήματος, πραγματοποιήθηκε από τους Ballantyne et al., το 1990 για το σύστημα διανομής του δικτύου ύδρευσης του Seattle. Για να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις των αστοχιών στο δίκτυο, πραγματοποιήθηκε υδραυλική ανάλυση με χρήση του υδραυλικού πακέτου KYPIPE. Στη μελέτη αυτή έγινε και μια πρώτη προσπάθεια να συμπεριληφθούν και δεδομένα αστοχιών - βλαβών από αρκετούς προηγούμενους σεισμούς, ενώ παράλληλα αποτιμήθηκε και η συμπεριφορά των αγωγών σε περιοχές με μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης.

Ο O' Rourke, το 1989, ανέπτυξε ένα λογισμικό που βασίζεται στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών για την εκτίμηση της εξυπηρετικότητας των δικτύων

ύδρευσης. Στο λογισμικό αυτό, λαμβάνονται υπόψη και παράγοντες όπως οι αβεβαιότητες του σεισμικού κινδύνου, τα χαρακτηριστικά των αγωγών, οι δυναμικές ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών, οι απαιτήσεις των καταναλωτών και οι απαιτήσεις στην περίπτωση σεναρίου πυρκαγιάς. Η εκτίμηση της εξυπηρετικότητας του δικτύου σε αυτή τη μεθοδολογία πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού των παροχών και των πιέσεων σε συγκεκριμένα και πλήρως ορισμένα σημεία του δικτύου. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής πραγματοποιήθηκε στο σύστημα ύδρευσης του San Francisco.

Ανάλογο πρόγραμμα βασισμένο σε GIS αναπτύχθηκε το 1991 από τους Sato & Shinozuka και Okumura & Shinozuka με στόχο την αποτίμηση της αξιοπιστίας των δικτύων ύδρευσης. Η ανάλυση αξιοπιστίας βασίζεται στη μέθοδο Monte – Carlo, ενώ η εκτίμηση της εξυπηρετικότητάς του βασίστηκε στον υπολογισμό των παροχών και του επιπέδου συνδετικότητας στο οποίο βρίσκεται το δίκτυο. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής πραγματοποιήθηκε στο σύστημα ύδρευσης του Memphis.

Πρόσφατα, το 2002, οι Menoni et al., πρότειναν μία μεθοδολογία αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης, για τα συστήματα ύδρευσης, αποχέτευσης, φυσικού αερίου, τηλεπικοινωνιών και ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και για το οδικό δίκτυο και τα νοσοκομεία σε εθνικό επίπεδο. Η τρωτότητα των επιμέρους στοιχείων και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων συστημάτων και του αστικού περιβάλλοντος ανάλογα με την περίοδο λειτουργίας του (κανονική ή κρίσιμη κατάσταση) είναι αυτά που καθορίζουν την τρωτότητα όλου του συστήματος. Η μελέτη εφαρμόστηκε στην Lombardi (Ιταλία) και είχε ως στόχο τη δημιουργία στρατηγικών αποκατάστασης που βασίζονται στην τρωτότητα και στις αλληλεπιδράσεις των συστημάτων.

2.3.Διεθνής εμπειρία

Το υποκεφάλαιο αυτό αναφέρεται σε διάφορα περιστατικά σεισμών που έχουν συμβεί κατά καιρούς στη χώρα μας, αλλά και σε όλο τον κόσμο, στα οποία σημειώθηκαν προβλήματα στα δίκτυα κοινής ωφελείας, ή δεν σημειώθηκαν προβλήματα λόγω της καλής σεισμικής απόκρισής τους. Η καταγραφή αυτών των γεγονότων είναι σημαντική για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των δικτύων στο σεισμό και χρησιμοποιείται για τις έρευνες που γίνονται για την καθιέρωση μοντέλων τρωτότητας σε όλα τα δίκτυα έναντι σεισμού.

Μια πόλη είναι ένα σύνολο καλά συντονισμένο από δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά, θα πρέπει να λειτουργούν ανεξάρτητα το καθένα, αλλά και σε άμεση συσχέτιση μεταξύ τους. Σε πολλές περιπτώσεις, προκλήθηκαν τεράστια προβλήματα έπειτα από σεισμούς λόγω της μη έγκαιρης ενημέρωσης μεταξύ των διαχειριστών των διαφόρων δικτύων. Είναι φανερό πως ιδιαίτερη σημασία και μελέτη στην κατασκευή πρέπει να δοθούν στα δίκτυα καθώς, εκτός από τις καταστροφές που μπορούν να υποστούν, είναι πιθανό να προκαλέσουν περαιτέρω προβλήματα (πυρκαγιά, πλημμύρα κ.ά.). Όλα τα δίκτυα απαιτούν άμεση αποκατάσταση και ιδιαίτερος αυτά από τα οποία εξαρτάται άμεσα η διατήρηση της ζωής στην περιοχή της καταστροφής.

Το δίκτυο ύδρευσης πρέπει να λειτουργεί σωστά τόσο για τη τροφοδοσία της πόλης με πόσιμο νερό (αποφυγή μολύνσεων), όσο και για συμβολή στην κατάσβεση των πυρκαγιών. Επίσης το δίκτυο αποχέτευσης για να μην εκδηλωθούν πλημμύρες και πολύ περισσότερο για να μην υπάρχουν διαρροές που θα «μολύνουν» το νερό του δικτύου ύδρευσης.

Κάθε βλάβη στο δίκτυο αερίου-φωταερίου-υγραερίου μπορεί να προκαλέσει διαρροές και αυτές να είναι καταστροφικές, καθώς είναι επικίνδυνες για τη δημόσια υγεία και

υπάρχει ο κίνδυνος ανάφλεξης και εκδήλωσης πυρκαγιάς (σε αρκετές περιπτώσεις οι καταστροφές από πυρκαγιά είναι μεγαλύτερες από αυτές του ίδιου του σεισμού). Τα τελευταία χρόνια (ιδιαίτερα μετά από μεγάλες καταστροφές του περασμένου αιώνα) τα πράγματα στο συνολικό δίκτυο του φυσικού αερίου έχουν βελτιωθεί αισθητά και αυτά το κάνουν έναν από τα σχετικά ακίνδυνα δίκτυα σε περιπτώσεις σεισμού.

Βλάβες στο οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο, στις σήραγγες και στο δίκτυο του ΜΕΤΡΟ μπορούν να προκαλέσουν, εκτός από τα άμεσα προβλήματα, στην πρόσβαση και στην παροχή βοήθειας στις περιοχές, όπου επλήγησαν από τον σεισμό. Ωστόσο, ίσως δεν γίνεται ακόμα επαρκής μελέτη για τα δίκτυα αυτά λόγω του ότι είναι εύκολη η αποκατάσταση των βλαβών τους, εκτός και αν πρόκειται για σήραγγες οδών-σιδηροδρόμων και πολύ περισσότερο σήραγγες του ΜΕΤΡΟ, όπου το κοινό δεν μπορεί να απομακρυνθεί αρκετά γρήγορα.

Οι βλάβες στους θαμμένους σωληναγωγούς κατά τη διάρκεια ενός σεισμού προέρχονται από τα ακόλουθα φαινόμενα:

- εδαφική κίνηση
- μετατόπιση επιφανειακού ρήγματος
- καθίζηση
- κατολίσθηση
- ρευστοποίηση εδαφών

• Σεισμός San Francisco

Στις 18 Απριλίου του 1906 στο San Francisco σημειώθηκε σεισμός 7,9 βαθμών της κλίμακας Richter και πιστεύεται πως είναι η αιτία για τον θάνατο από 3.000 έως 5.500 ανθρώπων(και αυτό γιατί δεν υπάρχουν ακριβείς πληροφορίες καθώς οι αρχές ανακοίνωσαν μόνο 375 θανάτους, γιατί φοβούνταν ότι η αποκάλυψη του ακριβούς αριθμού των θυμάτων θα προκαλούσε πανικό και θα έπληττε την εικόνα της πόλης, που εκείνη την εποχή ήταν η ταχύτερα αναπτυσσόμενη περιοχή των Η.Π.Α.. Επιπλέον, εκατοντάδες θύματα στην περίφημη κινέζικη γειτονιά της «Τσάιναταουν» αγνοήθηκαν για ρατσιστικούς λόγους). Μετά το σεισμό μία πυρκαγιά έκαιγε για 3 ολόκληρες μέρες και προξένησε αρκετούς από τους θανάτους και τεράστιες καταστροφές (πάνω από 25.000 κτήρια καταστράφηκαν ολοσχερώς), πολύ μεγαλύτερες από αυτές του ίδιου του σεισμού. Ήταν μία από τις αιτίες που απαίτησαν την καθιέρωση ενός πιο σύγχρονου και «απαιτητικού» αντισεισμικού κανονισμού. Ο ισχυρός αυτός σεισμός μετέτρεψε σε ερείπια το 80% των κτηρίων του San Francisco και σ' αυτό συνέβαλε ιδιαίτερος η πυρκαγιά που προκλήθηκε από τους σπασμένους σωλήνες του γκαζιού, τα καλώδια του ηλεκτρικού και τις υπάρχουσες ξυλόσομπες.



Εικόνα 2.1: Άποψη της φλεγόμενης πόλης του San Francisco, www.consrv.ca.gov/cgs/geologic_hazards/earthquakes/Pages/SanFrancisco_1906.aspx

Αποτέλεσμα, οι άστεγοι να πλησιάσουν τους 300.000, σε μια πόλη που αριθμούσε 410.000 κατοίκους. Οι ειδικοί θεωρούν ότι το 90% των θυμάτων και των ζημιών οφείλεται στις φωτιές που άναψαν λόγω του σεισμού. Σε οικονομικά μεγέθη οι ζημιές ανήλθαν σε 400 εκατομμύρια δολάρια (6,5 δισεκατομμύρια δολάρια σε τιμές του 2006) και οι ασφαλιστικές αποζημιώσεις σε 235 εκατομμύρια δολάρια (4,9 δισεκατομμύρια δολάρια σε τιμές του 2005). Οι αποζημιώσεις αφορούσαν μόνο ασφάλιση πυρός, καθώς δεν ασφαλιζόνταν κίνδυνοι από σεισμό. Αν και το San Francisco ανοικοδομήθηκε ταχύτατα, ίσως η μεγάλη καταστροφή που προκλήθηκε να ήταν η μετακίνηση της εμπορικής και βιομηχανικής δραστηριότητας προς τον νότο, στο Los Angeles, το οποίο έγινε το σημείο αναφοράς για την πολιτεία της California, κάτι που αναδεικνύει ότι οι «έμμεσες» καταστροφές κοστίζουν πολλαπλάσια των άμεσων (κατάρρευση κτηρίων ή καταστροφή εγκαταστάσεων).

- **Σεισμός San Fernando**

Ο σεισμός σημειώθηκε στις 9 Φεβρουαρίου 1971 και είχε μέγεθος 6,6 Richter. Ως αποτέλεσμα είχε 66 νεκρούς και 1.000 τραυματίες, ενώ η οικονομική καταστροφή εκτιμήθηκε σε 1 δις \$ (1971). Στην περιοχή υπήρχαν 1.110 km αγωγοί μεταφοράς και διανομής. Αναφέρθηκαν 456 βλάβες σε αγωγούς, από αυτές οι 76 συνέβησαν σε παλαιούς χαλύβδινους αγωγούς με συνδέσεις οξυγονοκόλλησης. Οι υπόλοιπες βλάβες έγιναν σε δίκτυα διανομής από χυτοχάλυβα, από τις οποίες 137 σε παροχτευτικούς αγωγούς. Η έκταση των βλαβών στα δίκτυα διανομής επεκτάθηκε σε μια περιοχή 31 τετραγωνικών χιλιομέτρων. 16.300 καταναλωτές έμειναν χωρίς αέριο λόγω θραύσης αγωγών ενώ άλλοι 9.500 έχασαν την τροφοδοσία τους λόγω της σκόνης που σηκώθηκε μέσα στους αγωγούς. Μετά τον σεισμό για τη σωστή λειτουργία του δικτύου αντικαταστάθηκαν 15,3km αγωγών.

- **Σεισμός Whittier Narrows**

Την 1^η Οκτωβρίου 1987, σημειώθηκε ο σεισμός μεγέθους 5,9 R. 3 άνθρωποι βρέθηκαν νεκροί και 1.000 τραυματίες. Σε παραπάνω από 10.000 κτήρια παρουσιάστηκαν βλάβες, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπήρξαν βλάβες στο σύστημα μεταφοράς αερίου. Οι διαρροές στο δίκτυο διανομής ήταν 22, όλες εξ αυτών σε δίκτυο κατασκευασμένο από χυτοχάλυβα και όλες αποδίδονται σε διαβρωμένους αγωγούς. Επίσης σημειώθηκαν 300 διαρροές σε παροχτευτικούς αγωγούς, η πλειοψηφία των οποίων λόγω διάβρωσης. 1.700 διαρροές εντός κατοικιών, 75% λόγω κακής στήριξης της εσωτερικής εγκατάστασης. 27.000 πελάτες έμειναν χωρίς αέριο, από αυτούς οι 21.000 διότι έκλεισαν την κεντρική βάνα αερίου από φόβο χωρίς πραγματική αιτία.

- **Σεισμός Loma Prieta**

Σημειώθηκε στις 17 Οκτωβρίου 1989, με ένταση 7,1 R. 62 νεκροί και 3.757 τραυματίες, με τις υπολογισμένες ζημιές να ανέρχονται σε 10 δις \$ σε μία επιφάνεια 8.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Το δίκτυο μεταφοράς αερίου δεν είχε βλάβες. Το δίκτυο διανομής αερίου μέσης πίεσης και το δίκτυο χαμηλής πίεσης ήταν κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο, χάλυβα και πολυαιθυλένιο. Μεγάλες καταστροφές με μεγάλη πυρκαγιά έγιναν στην περιοχή Marina District του San Francisco. Η πυρκαγιά προκλήθηκε μετά από σπάσιμο σωληνώσεων και διαρροή στο δίκτυο του αερίου για οικιακή χρήση. Λόγω της δόνησης μεγάλοι θερμοσίφωνες και αερόθερμα μετακινήθηκαν κόβοντας την σύνδεση τους και προκαλώντας διαρροές ή φωτιές. Το κυριότερο πρόβλημα όμως των οικιακών συσκευών ήταν οι καταρρεύσεις

καπναγωγών και καμινάδων. Το 1989 στο San Francisco είχε εγκατασταθεί σύγχρονο σύστημα με βαλβίδες ασφαλείας και έτσι απομονώθηκαν τα σημεία στα οποία υπήρχε βλάβη με σημαντικό περιορισμό των προβλημάτων και των καταστροφών .

Το δίκτυο νερού ήταν από χυτοσίδηρο. Μεγάλες καταστροφές υπήρξαν στην κοινότητα Watsonville, όπου 200 σπίτια κατέρρευσαν «εκ θεμελίων» καταστρέφοντας και του παροχετευτικούς αγωγούς.

156.000 καταναλωτές θα μείνουν χωρίς αέριο κλείνοντας τις κεντρικές βάνες τους με παρακίνηση από τα ΜΜΕ χωρίς αυτό να απαιτείται και πολλοί περισσότεροι χωρίς πόσιμο νερό, λόγω των καταστροφών.



Εικόνα 2.2: Πυρκαγιά από διαρροή σωλήνων φυσικού αερίου στην πόλη του San Francisco, <http://www.portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/>



Εικόνα 2.3: Καταστροφές που σημειώθηκαν στον αυτοκινητόδρομο (Interstate 880 - Nimitz Freeway), <http://littleshell.earthsourcemedia.org/category/uncategorized/>



Εικόνα 2.4: Καταστροφές στον αυτοκινητόδρομο Interstate 880 - Nimitz Freeway, <http://www.vibrationdata.com/earthquakes/lomaprieta.htm>

- **Σεισμός Kobe, Ιαπωνία**

Ημερομηνία 17 Ιανουαρίου 1995. Μέγεθος σεισμού: 6,8 R

Το επίκεντρο του σεισμού ήταν υποθαλάσσιο δίπλα στην πόλη KOBE. Μαζικές ρευστοποιήσεις εδαφών οδήγησαν στην πλήρη καταστροφή 80.000 κατασκευών και 5.500 θανάτους. Ο σεισμός έπληξε τις πόλεις Kobe, Ashiya, Amagasaki και Nishinomiya.

Κατά τον σεισμό δεν υπήρξαν βλάβες στους σταθμούς και δεξαμενές LNG (φυσικό αέριο). Το δίκτυο μεταφοράς πίεσης 4 bar είναι κατασκευασμένο από χαλυβδοσωλήνες με ηλεκτροσυγκόλληση πλήρους διείδυσης. Δεν υπήρξαν βλάβες στο δίκτυο μέσης πίεσης παρά μόνο 14, σε συνδέσεις αγωγών πριν το 1952. Επίσης, παρατηρήθηκαν διαρροές σε φλαντζωτές συνδέσεις. Το δίκτυο χαμηλής πίεσης (συνολικού μήκους 43.895 km) υπέστη τις μεγαλύτερες καταστροφές. Παρουσιάστηκαν 36 θραύσεις αγωγών από χυτοσίδηρο, 5.190 βλάβες σε βιδωτές συνδέσεις, 10.161 βλάβες σε παροχετευτικούς αγωγούς και 11.108 βλάβες σε σωληνώσεις κτηρίων. Στο δίκτυο χαμηλής πίεσης ανάμεσα στις χαλύβδινες σωληνώσεις υπήρχαν τμήματα πολυαιθυλενίου για να υπάρχει ελαστικότητα στους σεισμούς.

Το σύστημα αερίου στις 5 από τις 8 μεγάλες περιοχές της πόλης, διακόπηκε έξι ώρες μετά το σεισμό. Οι «έξυπνοι» μετρητές όπου δεν καταστράφηκαν μαζί με τα κτήρια λειτούργησαν καλά. Το ηλεκτρικό διακόπηκε αμέσως και επανήλθε 2 ώρες μετά. Στην πόλη σημειώθηκε ολική καταστροφή του δικτύου ύδρευσης. Τις πρώτες μέρες μετά το σεισμό οι κάτοικοι χρησιμοποιούσαν νερό που ήταν επικίνδυνο για τη δημόσια υγεία.



Εικόνα 2.5: Βλάβες στο δίκτυο ύδρευσης της πόλη Kobe, <http://www.diktyoseismos.gr/about-earthquakes/earthquakes-consequences.php>



Εικόνα 2.6: Βλάβες στο σιδηροδρομικό δίκτυο Hanshin-Kobe, Ιαπωνία, σεισμός 1995. Το σιδηροδρομικό δίκτυο έμεινε εκτός λειτουργίας για περίπου 6 μήνες, <http://www.diktyoseismos.gr/about-earthquakes/earthquakes-consequences.php>

Αυτοί οι παραπάνω παράγοντες (διαρροές στο δίκτυο φυσικού αερίου, καταστροφές στο δίκτυο του ηλεκτρικού, κατεστραμμένο δίκτυο ύδρευσης) σε συνδυασμό με τα ξύλινα παραδοσιακά σπίτια και το κατεστραμμένο οδικό δίκτυο οδήγησαν σε μεγάλες φωτιές, που δεν μπορούσαν να κατασβεστούν εύκολα, προκαλώντας μεγάλες καταστροφές.



Εικόνα 2.7: Πυρκαγιά από διαρροές στις σωληνώσεις φυσικού αερίου και καταστροφές στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (πόλη Kobe), <http://www.diktyoseismos.gr/about-earthquakes/earthquakes-consequences.php>



Εικόνα 2.8: Καταστροφές στον αυτοκινητόδρομο Hanshin, <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/quakes/kobe/kobe.html>



Εικόνα 2.9: Καταστροφές στο οδικό δίκτυο της πόλης Kobe λόγω ρευστοποίησης, <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/quakes/kobe/kobe.html>

• Σεισμός Kocaeli ή Μαρμαρά

Ημερομηνία: 17 Αυγούστου 1999, μέγεθος 7,4 Richter.

Ο σεισμός χτύπησε την βιομηχανική καρδιά της Τουρκίας. 35.000 κατοικίες κατεστραμμένες, δίκτυα ύδρευσης κατεστραμμένα, βλάβες σε βιομηχανίες, φωτιές σε διυλιστήρια, βλάβες σε τηλεπικοινωνίες, δίκτυα ηλεκτρισμού και δίκτυα μεταφορών. Η πόλη με τις μεγαλύτερες καταστροφές είναι η Izmit. Ο σεισμός παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την Ελλάδα από πλευράς αερίου διότι τα δίκτυα των πόλεων Izmit και Κωνσταντινούπολης σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με την ίδια φιλοσοφία με τα ελληνικά δίκτυα αερίου και την ίδια εποχή. Ο αγωγός μεταφοράς αερίου Ρωσία – Τουρκία διέρχεται από την περιοχή και δεν έπαθε καμία βλάβη. Στην πόλη Izmit το δίκτυο καλύπτει 26.000 πελάτες και είναι κατασκευασμένο με τον ίδιο τρόπο με τα ελληνικά δίκτυα. Με τον σεισμό θα διακοπεί η παροχή αερίου προς την πόλη υπό τον φόβο καταστροφών. Μετά από έλεγχο θα διαπιστωθεί ότι δεν υπάρχει καμία βλάβη στα δίκτυα εκτός από του ότι 15% των ρυθμιστών παροχής είναι

κατεστραμμένοι λόγω κατάρρευσης των κτηρίων. Το ίδιο ποσοστό αναφέρεται και στην Κωνσταντινούπολη. Δεν παρατηρήθηκαν διαρροές αερίου. Το δίκτυο αερίου ήταν το μόνο διαθέσιμο δίκτυο προς λειτουργία αμέσως μετά το σεισμό.

- **Σεισμός του Ωρωπού**

Διακοπή λειτουργίας σιδηροδρόμου μετά τον σεισμό του Ωρωπού ($M=6.0$) το 1938 από βλάβες στην περιοχή της Μαλακάσας.

- **Σεισμός Σκύρου**

Στις 26 Ιουλίου 2001, δημιουργήθηκαν προβλήματα στην υδροδότηση και λειψυδρία της πόλης από τη σταδιακή μείωση της παροχής νερού της πηγής Αναβάλλουσα.

- **Σεισμός της Πάρνηθας**

Ημερομηνία 7 Σεπτεμβρίου 1999, μέγεθος 5,9 Richter.

Ο σεισμός άφησε πίσω του 143 νεκρούς και 1600 τραυματίες, ενώ πάνω από 40.000 οικογένειες έμειναν άστεγες. Δεν παρατηρήθηκε κανένα πρόβλημα ούτε στον αγωγό μεταφοράς αερίου που διέρχεται από την περιοχή ούτε στο δίκτυο αερίου της τότε ΔΕΠΑ (Δημόσια Επιχείρηση Παροχής Αερίου).

- **Σεισμός στο νησί Honshu της Ιαπωνίας, στις 21 Μαρτίου 2011, μεγέθους 8,9 βαθμών της κλίμακας Richter**



Εικόνα 2.10: Κατεστραμμένος αυτοκινητόδρομος, <http://www.greecejapan.com/>



Εικόνα 2.11: Διαφορική καθίζηση εδάφους στο οδικό δίκτυο, <http://www.kasmeri.gr/tag/etiketes/fotografia-seismos-iaponia>

2.4.Οικονομικά στοιχεία

Η οικονομία κάθε περιοχής στις σύγχρονες κοινωνίες, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ομαλή λειτουργία των δικτύων διανομής. Έτσι, από κάποιο σεισμό μπορεί να προκληθούν οικονομικές καταστροφές είτε στις υπάρχουσες κατασκευές που απαιτούν αποκατάσταση, είτε με τη διαφοροποίηση των συνθηκών διαβίωσης των πληγέντων. Εκτός δηλαδή από το κόστος επισκευής, στο συνολικό κόστος συνυπολογίζεται ένα κόστος ακόμη, το οποίο αναφέρεται στην επαναδιοργάνωση της καθημερινότητας της κοινωνίας. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του σεισμού στο San Francisco, όπου η ζωή του San Francisco άλλαξε εντελώς κοινωνικο-οικονομικά καθώς η πόλη προοριζόταν να γίνει το κοινωνικο-πολιτικο-οικονομικό κέντρο της πολιτείας της California και έπειτα από το σεισμό ο σχεδιασμός άλλαξε άρδην, θέτοντας το Los Angeles ως διοικητικό κέντρο με τις διαστάσεις που έχει λάβει η πόλη στις μέρες μας. Μετά από κάθε ισχυρό σεισμό ο οποίος επιφέρει καταστροφές στις κατασκευές και στις υποδομές, δημιουργούνται νέες συνθήκες στη διαβίωση των ανθρώπων και στη συνέχιση της παραγωγής. Δεν υπάρχουν θέσεις εργασίας είτε λόγω των καταστροφών των κτηρίων στα οποία στεγάζονται οι επιχειρήσεις και της δυσλειτουργίας των δικτύων, είτε λόγω του ότι δεν υπάρχει αρκετό προσωπικό λόγω τραυματισμών ή ελλιπούς ενημέρωσης. Πέρα από αυτά παρατηρούνται ακραίες αυξήσεις στις τιμές σε όλα τα αγαθά και στα ενοίκια.

Η πρόληψη είναι ένας σημαντικός παράγοντας όχι μόνο στο κόστος επισκευών των καταστροφών ενός σεισμού, αλλά και στην κατάστροψη στρατηγικού σχεδίου αντιμετώπισης κρίσεων σε περιόδους σεισμού. Πολλές βλάβες σημειώνονται λόγω κακής χρήσης των συστημάτων και κακής συνεννόησης μεταξύ των φορέων διαχείρισης.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στα δίκτυα και στις εγκαταστάσεις αερίου, είναι ότι κάθε εγκατάσταση στην οποία κλείνει η βάνα και απομονώνεται η εγκατάσταση πρέπει να επαναπληρωθεί με αέριο με πλήρη διαδικασία σαν νέα εγκατάσταση. Αυτό, οδηγεί σε μεγάλους χρόνους αποκατάστασης της πλήρους τροφοδότησης των καταναλωτών, οι οποίοι κυμαίνονται στους προηγούμενους σεισμούς από 15 ημέρες έως τρεις μήνες. Το αέριο στις περιοχές αυτές μπορεί να είναι το κύριο οικιακό καύσιμο. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία οι οικονομικές επιπτώσεις των σεισμών, για την Ελλάδα ανά δεκαετία, ανέρχονται σε 590 εκατ. ευρώ περίπου (200 δισεκ. δραχμές). Όμως ο ιδιαίτερα καταστροφικός σεισμός στην Αθήνα το 1999 έδειξε ότι μερικές φορές αναθεωρούνται τα δεδομένα.

Στο σημείο αυτό, είναι δόκιμο να επισημανθεί η χρησιμότητα της έννοιας της τρωτότητας και των καμπυλών τρωτότητας. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να γίνει αρχικός σχεδιασμός και επένδυση ώστε να αποφευχθούν οι έκτακτες και πολύ περισσότερο δαπανηρές καταστάσεις που θα εκδηλωθούν ύστερα από κάποιον σεισμό.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή δικτύων διανομής

Τα δίκτυα διανομής ίσως είναι ο σημαντικότερος παράγοντας λειτουργίας κάθε σύγχρονης κοινωνίας και πολύ περισσότερο των σύγχρονων αστικών κοινωνιών, με τον τρόπο που αυτές έχουν αναπτυχθεί. Είναι προφανές ότι, η ομαλή λειτουργία και η ανάπτυξη κάθε κοινωνίας εξαρτάται άμεσα από τη ύπαρξη και τη σωστή λειτουργία των δικτύων διανομής. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των δικτύων που πραγματεύεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία τόσο με γενικά, όσο και τεχνικά στοιχεία που αφορούν τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες και τις προδιαγραφές σύμφωνα με τις οποίες αυτά έχουν κατασκευαστεί.

3.1.Δίκτυο διανομής πόσιμου νερού (Υδρευση)

Με τον όρο δίκτυο ύδρευσης, εννοείται το σύνολο των αγωγών που μεταφέρουν το διυλισμένο νερό από τις κατά τόπους Μονάδες Επεξεργασίας Νερού (Μ.Ε.Ν.) μέχρι τους υδρομετρητές των καταναλωτών.

Το συνολικό μήκος των εξωτερικών υδραγωγείων στην πόλη της Αθήνας είναι 496 χιλιόμετρα. Το δίκτυο, εκτός των αγωγών, περιλαμβάνει αντλιοστάσια και δεξαμενές πίεσης. Ογδόντα ένα (81) αντλιοστάσια είναι σε λειτουργία για την υδροδότηση των υψηλών υψομετρικά περιοχών. Πενήντα πέντε (55) δεξαμενές πόλεως συνολικής χωρητικότητας 885.000 κυβικών μέτρων βρίσκονται διάσπαρτες σε ψηλά σημεία της πόλης από τις οποίες το νερό μέσω του δικτύου φτάνει στους καταναλωτές.

Το ολικό μήκος του δικτύου της Ε.ΥΔ.Α.Π. είναι 9.500 χιλιόμετρα. Από αυτά, τα 2.000 χιλιόμετρα είναι κύριοι τροφοδοτικοί αγωγοί (από Φ300 mm έως Φ2000) και τα 7.500 χιλιόμετρα είναι δευτερεύοντες αγωγοί διανομής.

Όσον αφορά το υλικό κατασκευής του δικτύου διανομής, το 55% του ολικού μήκους των αγωγών αποτελείται από σωλήνες αμιαντοσιμέντου (Α/Σ), το 20% από χαλυβδοσωλήνες, το 15% από χυτοσίδηρους σωλήνες και το 10% από πλαστικούς σωλήνες (PVC και κυρίως πολυαιθυλένιο). Για ασφάλεια, στο δίκτυο είναι εγκατεστημένες 90.000 δικλείδες (βάνες) απομόνωσης και 500 βάνες ελέγχου πίεσης. Το δίκτυο παρέχει πόσιμο νερό σε περιοχές με υψόμετρο από +0,00 έως και +600,00 μέτρα και έχει «διαιρεθεί» σε 210 ζώνες πίεσης (ανά 30 μέτρα με επιθυμητή πίεση 4 με 5 bar στον καταναλωτή). Υποχρέωση της Ε.ΥΔ.Α.Π. είναι να παρέχει νερό με πίεση από 2 έως 12 bar στη θέση του υδρομετρητή, σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του δικτύου ύδρευσης. Βέλτιστη επιθυμητή πίεση: 3 έως 4 bar.

Ο συνολικός αριθμός των υδρομετρητών ανέρχεται σε 2.020.000 περίπου. Αυτόματο 24ωρο σύστημα τηλεέγχου - τηλεχειρισμού (SCADA) παρακολουθεί τη λειτουργία του δικτύου ύδρευσης και εργαστήριο ελέγχου υδρομετρητών διαπιστευμένο κατά ISO 17025. Σε 100 κομβικά σημεία του δικτύου ύδρευσης (δεξαμενές, αντλιοστάσια, μονάδες επεξεργασίας νερού) παρακολουθούνται και καταγράφονται συνεχώς πιέσεις, στάθμες και παροχές. Οι περισσότεροι όμως χειρισμοί γίνονται επιτόπου από το προσωπικό της ΕΥΔΑΠ.

Παράλληλα, υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα καταγραφής και τηλεμετάδοσης με τεχνολογία GSM σε 800 σημεία του δικτύου ύδρευσης που περιλαμβάνουν ρυθμιστικές διατάξεις καθώς και υδρομετρητές ειδικών καταναλωτών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι εξυπηρετούνται περίπου 4.300.000 άνθρωποι. Η κατανομή της κατανάλωσης είναι:

- 63% αστική κατανάλωση
- 20% ενίσχυση Ο.Τ.Α.
- 10% βιομηχανία
- 7% δημόσια, φιλανθρωπικά και άλλα

Οι πιέσεις λειτουργίας των αγωγών έχουν μέγιστο όριο τα 25 bar (ατμόσφαιρες) και ελάχιστο τα 2 bar.

3.2.Δίκτυο αποχέτευσης Αθήνας – Πειραιά

Το δίκτυο αποχέτευσης αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Εσωτερικά δίκτυα και εσωτερικές εγκαταστάσεις αποχέτευσης ακινήτου εντός του χώρου του ακινήτου και μέχρι την ρυμοτομική γραμμή του. Η σύνδεση των εσωτερικών δικτύων αποχέτευσης ενός ακινήτου με τους αντίστοιχους αγωγούς αποχέτευσης του οριστικού δικτύου, σε οποιοδήποτε σύστημα αποχέτευσης, (χωριστικό ή παντοροϊκό), πρέπει να υπάρχει εντός του ακινήτου, παρά την ρυμοτομική γραμμή και πάντοτε πριν από το φρεάτιο προσαρμογής και ελέγχου, προς την πλευρά του ακινήτου, αυτόματη αλλά και χειροκίνητη δικλείδα ασφαλείας. Η δικλείδα αυτή, αποτελεί μέρος των εσωτερικών εγκαταστάσεων. Οι συνδέσεις των εσωτερικών δικτύων αποχέτευσης ενός ακινήτου με τους αντίστοιχους αγωγούς αποχέτευσης του οριστικού δικτύου γίνονται απ' ευθείας χωρίς την μεσολάβηση βόθρων, στεγανών ή μη. Ευθύνη του κυρίου του ακινήτου.
- Το «οριστικό δίκτυο» αποχέτευσης, που αποτελείται από τους αγωγούς ακαθάρτων και όμβριων υδάτων, τους παντοροϊκούς, τα αντλιοστάσια, τους καταθλιπτικούς αγωγούς, τους υπερχειλιστές, τα διευθετημένα (ανοικτά ή καλυμμένα) ρέματα και γενικά κάθε έργο που έχει σκοπό τη συλλογή και μεταφορά των ακαθάρτων και όμβριων υδάτων μέχρι τους τελικούς αποδέκτες και έχει κατασκευαστεί από τους αρμόδιους φορείς σύμφωνα με τις εγκεκριμένες μελέτες. Αγωγοί και εξωτερικές διακλαδώσεις ακαθάρτων που έχουν κατασκευασθεί από τους Ο.Τ.Α. ή άλλους δημόσιους φορείς ή τρίτους είναι μέρη του «οριστικού δικτύου» αποχέτευσης. «Παντοροϊκό σύστημα αποχέτευσης» είναι το σύστημα αποχέτευσης που περιλαμβάνει κοινούς αγωγούς και κοινές εξωτερικές διακλαδώσεις για την αποχέτευση των όμβριων και των ακαθάρτων υδάτων.
- «Εξωτερικές διακλαδώσεις» ακαθάρτων ή όμβριων υδάτων είναι οι αγωγοί που κατασκευάζονται εξωτερικά του ακινήτου, κατά πλάτος του δρόμου από την ρυμοτομική γραμμή μέχρι την θέση του αγωγού αποχέτευσης ακαθάρτων ή όμβριων υδάτων, για την σύνδεση του εσωτερικού δικτύου του ακινήτου με τον αντίστοιχο αγωγό αποχέτευσης. Κάθε εξωτερική διακλάδωση υποχρεωτικά περιλαμβάνει τον αγωγό όμβριων ή ακαθάρτων υδάτων κατά πλάτος της εγκεκριμένης οδού (από το ακίνητο προς τον κεντρικό αγωγό), το φρεάτιο προσαρμογής του εσωτερικού δικτύου όμβριων ή ακαθάρτων υδάτων με τον αντίστοιχο αγωγό ακαθάρτων ή όμβριων υδάτων και τη σύνδεση του αγωγού όμβριων ή ακαθάρτων υδάτων κατά πλάτος της οδού με τον

αντίστοιχο αγωγό όμβριων ή ακαθάρτων υδάτων που διέρχεται κατά μήκος της εγκεκριμένης οδού, εμπροσθεν του ακινήτου.

Το αποχετευτικό δίκτυο του Λεκανοπεδίου είναι χωριστικό εκτός από το κέντρο της Αθήνας όπου το δίκτυο είναι παντοροϊκό. Οι αγωγοί ακαθάρτων μεγάλης διατομής (Κεντρικός Αποχετευτικός Αγωγός, Συμπληρωματικός Κεντρικός Αποχετευτικός Αγωγός κ.ά.) διέρχονται από περιοχές των οποίων οι κλίσεις επιτρέπουν τη φυσική ροή των λυμάτων λόγω της βαρύτητας (αγωγοί βαρύτητας). Εξαιρέση αποτελεί ο Παραλιακός Συλλεκτήρας της ακτής Σαρωνικού, η λειτουργία του οποίου γίνεται με μια αλληλουχία 42 ενδιάμεσων αντλιοστασίων.

Περίπου 6.000 χιλιόμετρα μήκος δικτύου καλύπτει το 92% των αποχετευτικών αναγκών της Αττικής. Εξυπηρετούνται περίπου 1.982.434 πελάτες αποχέτευσης με 400.000 συνδέσεις αποχέτευσης.

Η κατανάλωση κατά κατηγορία (μέσος όρος 2009):

- Οικίες: 61,42%
- Ο.Τ.Α.: 20,24%
- Βιομηχανικό - επαγγελματικό: 6,00%
- Δημόσιο – Δημοτικό - Κοινοτικό: 5,61%
- Λοιπά: 6,73%

Λειτουργία Δικτύου

Η αποχέτευση του λεκανοπεδίου Αττικής πραγματοποιείται με αγωγούς όμβριων και ακαθάρτων. Οι μεν αγωγοί όμβριων καταλήγουν με φυσική ροή στη θάλασσα, οι δε αγωγοί ακαθάρτων καταλήγουν στη θαλάσσια περιοχή της Ψυτάλλειας αφού προηγηθεί ο βιολογικός καθαρισμός των λυμάτων στο Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυτάλλειας.

Συλλεκτήρες

- Κεντρικός Αποχετευτικός Αγωγός (ΚΑΑ). Είναι ο παντοροϊκός αγωγός με τον οποίο γίνεται η παροχέτευση όμβριων και ακαθάρτων του παντοροϊκού συστήματος από το τέρμα της οδού Πατησίων μέχρι τον Ακροκέραμο Κερασινίου όπου και γινόταν η εκβολή προς τη θάλασσα. Η διατομή του αγωγού αρχίζει με ωσειδή διατομή 0,70 μ. x 1,05 μ. και καταλήγει σε ορθογωνική διατομή 3,60 μ. x 3,60 μ.. Στην Κοκκινιά ο αγωγός δέχεται δια αντλήσεως τα αστικά λύματα των χαμηλών περιοχών Φαλήρου - Μοσχάτου - Καλλιθέας - Πειραιώς και μέσω σήραγγας κάτω από το Λόφο Καραβά καταλήγει στον Ακροκέραμο. Ο αγωγός αυτός είναι επισκέψιμος με πεζοδρόμιο πλάτους 90 εκ. και από τις δύο πλευρές. Με την κατασκευή του Κ.Α.Α. δρομολογήθηκε η οριστική διάταξη του παρόντος δικτύου αποχέτευσης. Με την κατασκευή του Κ.Α.Α. οι τοπικοί συλλεκτήρες συνολικού μήκους 60 χλμ. κρίθηκαν διατηρητέοι και εντάχθηκαν στο νέο δίκτυο αποχέτευσης που μελετήθηκε και κατασκευάστηκε.
- Κεντρικός Παραλιακός Συλλεκτήρας της ακτής Σαρωνικού. Ο Παραλιακός Συλλεκτήρας, ξεκινά από την περιοχή της Βάρκιζας και τελειώνει στην περιοχή της Αμφιθέας και έχει μήκος περίπου 13 χλμ.. Για τη λειτουργία του Παραλιακού Συλλεκτήρα κατασκευάστηκε μια αλληλουχία ενδιάμεσων αντλιοστασίων, τα οποία σταδιακά ανυψώνουν τα λύματα των χαμηλών παραλιακών περιοχών προς τους καταθλιπτικούς αγωγούς και αγωγούς βαρύτητας για να καταλήξουν στον Κ.Α.Α. και από κει στην εκβολή του

Ακροκεράμου. Η μέγιστη διατομή του Παραλιακού Συλλεκτήρα είναι 1,10 x 1,65 μ.

- Παρακηφίσιος Συλλεκτήρας Ακαθάρτων. Ο Παρακηφίσιος Συλλεκτήρας, ξεκινά από τον ΚΑΑ στο ύψος της περιοχής του Αγ. Ιωάννη Ρέντη και τελειώνει στην περιοχή της Εκάλης. Η διατομή του στην εκβολή είναι 2,42 μ. x 2,72 μ., σκουφοειδής σε μήκος 3,6 χλμ. Το μήκος του φτάνει τα 26 περίπου χιλιόμετρα. Σήμερα βρίσκεται υπό κατασκευή το τελευταίο τμήμα του που καταλήγει στον Άγιο Στέφανο.
- Συμπληρωματικός Κεντρικός Αποχετευτικός Αγωγός (Σ.Κ.Α.Α.). Αρχίζει από τον Κ.Α.Α. από σημείο του στο τμήμα που διέρχεται από την περιοχή της Αγίας Άννης στο Δήμο Αγ. Ιωάννου Ρέντη και απολήγει στον Ακροκέραμο. Είναι κυκλικός αγωγός από οπλισμένο σκυρόδεμα μήκους 7,5 χλμ. Στην αρχή του ΣΚΑΑ είναι εγκατεστημένα θυροφράγματα ρύθμισης και εκτροπής των παροχών. Ο ΣΚΑΑ έχει διάμετρο 3,3 μ. Κατά μήκος του Σ.Κ.Α.Α. υπάρχουν φρεάτια επισκέψεως διαμέτρου 1,0 μ. και 3 θάλαμοι επισκέψεως διαμέτρου 6μ. για τη συντήρηση του αγωγού.
- Ανακουφιστικός Καταθλιπτικός Αγωγός (Α.Κ.Θ.). Ο αγωγός αυτός άγει τα λύματα των περιοχών του Μοσχάτου, της Νέας Σμύρνης, του Παλαιού Φαλήρου στον Κ.Α.Α. ανακουφίζοντας τις περιοχές αυτές που εξυπηρετούνται σήμερα από τον Κεντρικό Παραλιακό Συλλεκτήρα της ακτής Σαρωνικού. Η διατομή του στην εκβολή είναι 2,9 μ. και το συνολικό μήκος του φτάνει τα 6 χλμ..

Λειτουργία αντλιοστασίων

Έπρεπε να κατασκευασθούν δύο καταθλιπτικοί αγωγοί για κάθε αντλιοστάσιο και να εξασφαλιστεί η αδιάλειπτη, σε περίπτωση βλάβης του ενός αγωγού, ροή των ακαθάρτων. Λειτουργούν 42 αντλιοστάσια, από τη Βάρκιζα μέχρι το Πέραμα, με αποδέκτη την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων στην Ψυτάλλεια.

Τα παραπάνω αντλιοστάσια λειτουργούν είτε κατά ομάδες είτε με διάταξη αλυσίδας. Στην πρώτη περίπτωση τα λύματα μερικών τοπικών αντλιοστασίων ωθούνται προς ένα επικεφαλής αντλιοστάσιο από το οποίο ωθούνται προς τον Κ.Α.Α. (Κεντρικό αποχετευτικό αγωγό). Στη δεύτερη περίπτωση τα λύματα αντλούνται διαδοχικά από το ένα αντλιοστάσιο στο επόμενο με δίδυμους καταθλιπτικούς αγωγούς καταλήγοντας τελικά στον Κ.Α.Α. (τα αντλιοστάσια της παραλίας από Βάρκιζα μέχρι Αμφιθέα και από Πέραμα μέχρι Μοσχάτο). Τα αντλιοστάσια λειτουργούν με ηλεκτροκίνητες αντλίες οι οποίες λειτουργούν αυτόματα, δηλαδή η έναρξη και η παύση λειτουργίας τους γίνεται μέσω ηλεκτρονικών αισθητηρίων στάθμης ανάλογα με τα επιθυμητά όρια. Ο έλεγχος της λειτουργίας τους γίνεται μέσω ενός Σύγχρονου Συστήματος Τηλεέγχου - Τηλεχειρισμού, το οποίο βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Νέου Φαλήρου. Αυτό το σύγχρονο σύστημα, λειτουργεί με προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLC) στους τοπικούς σταθμούς των αντλιοστασίων. Αυτοί, μέσω μισθωμένων τηλεφωνικών γραμμών (Ο.Τ.Ε.), παρακολουθούνται επί 24ωρου βάσεως σε όλες τις βασικές λειτουργίες τους από το Κέντρο Ελέγχου Νέου Φαλήρου, από όπου και τους τηλεχειρίζονται. Στο παραπάνω σύγχρονο σύστημα λειτουργίας γίνονται συνεχείς έλεγχοι, συντηρήσεις, επισκευές, κατασκευές καθώς και επεμβάσεις στα αντλιοστάσια επί 24ώρου βάσεως από συνεργεία που εδρεύουν στο Νέο Φάληρο, προκειμένου να διασφαλίζεται η αδιάλειπτη λειτουργία τους.

3.3.Φυσικό αέριο

Τα σημεία εισόδου του συστήματος μεταφοράς φυσικού αερίου είναι τρία. Το πρώτο είναι στα ελληνοβουλγαρικά σύνορα, από όπου εισέρχεται στον κεντρικό αγωγό φυσικό αέριο από τη Ρωσία. Το δεύτερο σημείο εισόδου είναι στα ελληνοτουρκικά σύνορα, όπου το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου διασυνδέεται με το τουρκικό σύστημα μεταφοράς. Το τρίτο σημείο εισόδου φυσικού αερίου βρίσκεται στη νήσο Ρεβυθούσα στον κόλπο Πάχης Μεγάρων, όπου υπάρχουν οι εγκαταστάσεις εκφόρτωσης, αποθήκευσης και επαναεριοποίησης του Υγροποιημένου φυσικού αερίου.

Σήμερα, το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου περιλαμβάνει:

- Τον κεντρικό αγωγό μεταφοράς αερίου. Ο κεντρικός αγωγός έχει συνολικό μήκος 512 χλμ. και είναι υψηλής πίεσης 70 bar. Εκτείνεται από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα (Προμαχώνας) έως το Λαύριο Αττικής και από την Θεσσαλονίκη έως τα ελληνοτουρκικά σύνορα (Κήποι).
- Κλάδους μεταφοράς, συνολικού μήκους 689 χλμ.. Οι κλάδοι ξεκινούν από τον κεντρικό αγωγό και τροφοδοτούν με φυσικό αέριο τις περιοχές της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, της Θεσσαλονίκης, του Πλατέος Ημαθίας, του Βόλου, της Βοιωτίας, των Οινοφύτων, της Αττικής και της Κορίνθου. Εντός του 2007, ξεκίνησαν έργα για κατασκευή κλάδων προς Δυτική Θεσσαλία και Εύβοια πρόσθετου μήκους 119 χλμ..
- Τους Μετρητικούς και Ρυθμιστικούς σταθμούς φυσικού αερίου.
- Δύο Σταθμούς Ανεφοδιασμού Λεωφορείων στα Άνω Λιόσια και στην Ανθούσα Αττικής.
- Το Κέντρο Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου.
- Κέντρα Λειτουργίας και Συντήρησης στην Αττική, τη Θεσσαλονίκη, τη Θεσσαλία και στην Ξάνθη.

Ο υποθαλάσσιος αγωγός Ελλάδας - Ιταλίας αποτελεί τμήμα του ευρύτερου συστήματος αγωγών Τουρκίας – Ελλάδας - Ιταλίας μέσω του οποίου θα διακινηθεί φυσικό αέριο από τις χώρες της Κασπίας και της Κεντρικής Ασίας προς την αγορά της Ιταλίας και εν συνεχεία της Δυτικής Ευρώπης. Η Ελλάδα, με την συμμετοχή της στον αγωγό καθίσταται σημαντικός κόμβος διαμεταφοράς φυσικού αερίου από την ευρύτερη περιοχή της Κασπίας όπου βρίσκεται το 20% των παγκόσμιων αποθεμάτων φυσικού αερίου, προς την Ευρώπη.

Ο υποθαλάσσιος αγωγός Ελλάδας - Ιταλίας έχει μήκος 203 χιλιόμετρα, ξεκινά από τη Θεσπρωτία και καταλήγει στο Οτράντο της Ιταλίας. Η διάμετρος του αγωγού είναι 32 ίντσες, η πίεση σχεδιασμού είναι 150 bar και η μεταφορική ικανότητά του φθάνει τα 10 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα ετησίως. Στις χερσαίες εγκαταστάσεις του υποθαλάσσιου αγωγού συμπεριλαμβάνονται ένας Μετρητικός Σταθμός και ένας Σταθμός Συμπίεσης.

Το χερσαίο τμήμα του αγωγού Τουρκίας – Ελλάδας - Ιταλίας, θα ξεκινά από την Κομοτηνή και θα καταλήγει στη Θεσπρωτία διανύοντας απόσταση 590 χιλιομέτρων. Η διάμετρος του αγωγού είναι 42 ίντσες, η πίεση σχεδιασμού 80 bar και η μεταφορική του ικανότητα φθάνει τα 15 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα το χρόνο. Ο αγωγός περιλαμβάνει δύο σταθμούς συμπίεσης στην Κομοτηνή και στη Νέα Μεσημβρία Θεσσαλονίκης.

Στη Ρεβυθούσα, στον κόλπο των Μεγάρων Αττικής, λειτουργεί ένας από τους πιο σύγχρονους σταθμούς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου σε όλη τη Μεσόγειο. Το αέριο που προέρχεται από την Αλγερία, παραλαμβάνεται σε υγρή μορφή, αποθηκεύεται σε δύο δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 130.000 κυβικών μέτρων

και στη συνέχεια στις ειδικές εγκαταστάσεις της μονάδας, μετατρέπεται ξανά σε αέριο και τροφοδοτεί τους αγωγούς του Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου.

Το δίκτυο

Το φυσικό αέριο εισάγεται στη χώρα μας μέσω αγωγών υψηλής πίεσης. Η πορεία του συνεχίζεται μέσα από δίκτυα μέσης πίεσης (19bar), που έχουν αποδέκτες βιομηχανικούς καταναλωτές, καθώς και μέσα από δίκτυα χαμηλής πίεσης (4bar) που εξυπηρετούν οικιακές, εμπορικές και βιομηχανικές χρήσεις.

Σήμερα το δίκτυο φυσικού αερίου της Ε.Π.Α. Αττικής περιλαμβάνει περίπου 3.000 χλμ. αγωγών χαμηλής πίεσης σε πάνω από 60 δήμους στην Αττική. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 1.800 νέα χλμ. (με ονομαστική πίεση λειτουργίας 4bar και υλικό κατασκευής πολυαιθυλένιο) με κατασκευή από το 2002 και έπειτα, 700 χλμ. (με ονομαστική πίεση 4 bar) που παρέλαβε η Ε.Π.Α. Αττικής από τη Δ.Ε.Π.Α. το 2002, έλεγξε και ενεργοποίησε, καθώς και 500 χλμ. παλαιού δικτύου (με ονομαστική πίεση λειτουργίας 23 mbar και υλικό κατασκευής πολυαιθυλένιο ή χυτοσίδηρο) που παρέλαβε η Ε.Π.Α. Αττικής από τη Δ.Ε.Φ.Α. (το παλαιό δίκτυο συναντάται κυρίως στην περιοχή του κέντρου της Αθήνας και σταδιακά αντικαθίσταται).

Κεφάλαιο 4

Υπόγειοι αγωγοί

Η χρήση των υπόγειων αγωγών στα δίκτυα κοινής ωφελείας είναι πολύ διαδεδομένη. Τα δίκτυα ύδρευσης, άρδευσης και αποχέτευσης χρησιμοποιούν υπόγειους αγωγούς. Επίσης, υπόγειοι αγωγοί χρησιμοποιούνται και στα δίκτυα παροχής φυσικού αερίου, υγρών καυσίμων, ηλεκτρικού και τηλεπικοινωνιών. Σαν υπόγειοι αγωγοί, ακόμη, μπορούν να μελετηθούν οι οδικές σήραγγες, οι σιδηροδρομικές σήραγγες, αλλά και οι σήραγγες του μετρό. Στο κεφάλαιο αυτό, αναπτύσσονται κυρίως τα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης και παροχής φυσικού αερίου.

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός κρίνεται απαραίτητος στους υπόγειους αγωγούς, αν λάβουμε υπόψη τη σπουδαιότητα των δικτύων που χρησιμοποιούν υπόγειους αγωγούς, αλλά και τη μεγάλη σεισμικότητα που χαρακτηρίζει τον ελληνικό χώρο. Αστοχίες που οφείλονται σε σεισμό, πρέπει να αποφεύγονται, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διακοπή της λειτουργίας των δικτύων έχει σοβαρές συνέπειες. Σε αυτό πρέπει να προστεθεί και το γεγονός ότι από τους υπόγειους αγωγούς επηρεάζονται και υπερκείμενα κτήρια και κατασκευές. Για παράδειγμα, αστοχία σε έναν υπόγειο αγωγό μπορεί να προκαλέσει πιθανή βλάβη, ή ακόμα και κατάρρευση ενός υπερκείμενου κτιρίου, το οποίο ενδεχομένως, δε θα είχε πληγεί από το σεισμό.

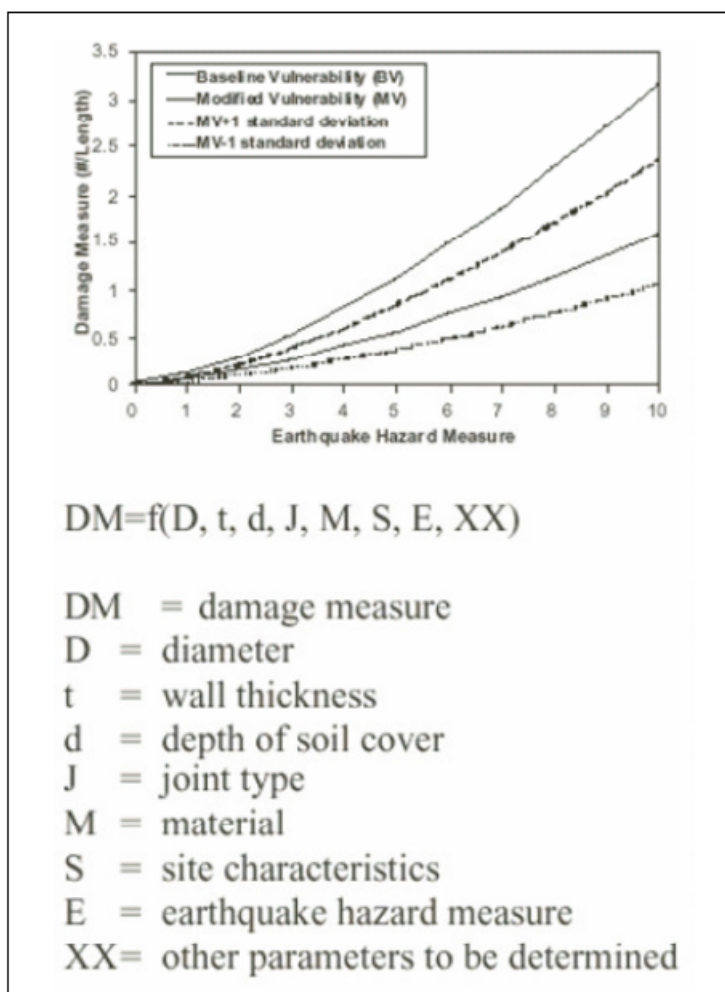
Οι σωληνώσεις και τα ειδικά τεμάχια που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία των δικτύων πρέπει να διαθέτουν ικανοποιητικά χαρακτηριστικά αντοχής, μορφής, εγγυημένης ποιότητας κατασκευής και καταλληλότητας υλικών. Ειδικότερα, πρέπει:

- να διαθέτουν επαρκή μηχανική αντοχή σε σχέση με τις πιέσεις που επικρατούν στις εγκαταστάσεις,
- να είναι κατασκευασμένες από υλικό κατάλληλο για το στοιχείο που διοχετεύουν,
- να μη διευκολύνουν τη συσσώρευση αλάτων ή καταλοίπων στο εσωτερικό των αγωγών,
- να έχουν διαστάσεις κατάλληλες για τις παροχές για τις οποίες προορίζονται,
- να επαρκούν σε περιστασιακά αυξημένες παροχές του δικτύου,
- να αντέχουν στις προβλεπόμενες πιέσεις, θερμοκρασίες και την πιθανή τοξική συμπεριφορά των υλικών του δικτύου,
- να παρέχουν αδιαπερατότητα και στεγανότητα των στοιχείων του δικτύου και των συνδέσεων και
- να συμβάλλουν στη συνεχή και ομαλή απομάκρυνση των αερίων, τα οποία μπορεί να προκύψουν (κατάλληλη κλίση και σύστημα αερισμού).

Είναι, επίσης, γνωστό ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση των εδαφικών σχηματισμών και συνακόλουθα και των υπόγειων δικτύων αγωγών. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η διερεύνηση της επιρροής τους στην τρωτότητα των δικτύων και η επιλογή της κατάλληλης σχέσης τρωτότητας που ταιριάζει με τα ελληνικά δεδομένα και την κατασκευαστική πρακτική.

Εκ των ανωτέρω, προκύπτει ότι η αποτίμηση της τρωτότητας ενός συστήματος υπόγειων αγωγών είναι μία πολύπλοκη διαδικασία και είναι πολλοί οι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη δημιουργία των καμπύλων τρωτότητας ενός τέτοιου συστήματος. Οι σχέσεις τρωτότητας είναι δυνατόν να έχουν διάφορες

μορφές. Έτσι, στους υπόγειους αγωγούς χρησιμοποιείται συνήθως μία σχέση, η καμπύλη της οποίας έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.1: Γενική μορφή των σχέσεων τρωτότητας για υπόγειους αγωγούς, Σ. Φωτοπούλου, 2007.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι απώλειες σε έναν υπόγειο αγωγό είναι συνάρτηση ορισμένων χαρακτηριστικών του σωλήνα, όπως η διάμετρος, το πάχος τοιχωμάτων και το υλικό κατασκευής, ορισμένων χαρακτηριστικών των εδαφικών συνθηκών, όπως μέγεθος κινδύνου για σεισμό ή χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών του τοπίου, χαρακτηριστικών του τρόπου έδρασης - σύνδεσης του συστήματος αγωγών, όπως τύπος σύνδεσης σωλήνων και βάθος εδαφικού υλικού πάνω από τον αγωγό και άλλων χαρακτηριστικών που προσδιορίζονται κάθε φορά από την κρίση του μελετητή.

4.1.Υλικό κατασκευής υπόγειων σωλήνων

Στη συμπεριφορά των υπόγειων αγωγών σε σεισμό, σημαντικό ρόλο παίζει το υλικό κατασκευής τους. Υπάρχουν αγωγοί από τσιμέντο, που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο ύδρευσης, αγωγοί από χάλυβα υψηλής ποιότητας ή πολυαιθυλένιο, που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο παροχής φυσικού αερίου. Η συμπεριφορά του υλικού κατασκευής των δικτύων σε μεγάλες παραμορφώσεις, καθορίζει τη συμπεριφορά του υπόγειου αγωγού. Υλικά με ψαθυρή συμπεριφορά, όπως το τσιμέντο, θα

προκαλέσουν θραύση στους αγωγούς σε περίπτωση σεισμού και ως αποτέλεσμα, θα προκληθεί διαρροή στο δίκτυο. Σε αντίθετη περίπτωση, υλικά με πλάστιμη συμπεριφορά, όπως το πολυαιθυλένιο, έχουν μεγάλη αντοχή στις παραμορφώσεις, χαρακτηριστικό που θα προστατεύσει το δίκτυο από ενδεχόμενη αστοχία.

Για παράδειγμα, στο **δίκτυο ύδρευσης**, παλαιότερα οι αγωγοί ήταν μεταλλικοί, πλέον είναι πλαστικοί. Όσο παλαιότεροι είναι οι αγωγοί τόσο περισσότερο νερό διαρρέει και χάνεται στο έδαφος. Οι παλιοί αγωγοί σπάνε και το νερό εκτοξεύεται στην επιφάνεια. Με κριτήριο το βασικό υλικό (πρώτη ύλη) κατασκευής σωλήνων ύδρευσης που επιτρέπεται να επιλεγούν για την κατασκευή δικτύων ύδρευσης (σωλήνες και εξαρτήματα σύνδεσης, διακλάδωσης κ.τ.λ.) ,σύμφωνα με την Τ.Ο. του Τ.Ε.Ε. υπ' αριθμόν 2411/86, γίνεται αναφορά σε:

- Χαλκοσωλήνες
- Χαλυβδοσωλήνες
- Χυτοσίδηρους σωλήνες
- Πλαστικούς σωλήνες

α. Από μη πλαστικοποιημένο πολυβινυλοχλωρίδιο (U-PVC)

β. Από σκληρό πολυαιθυλένιο (HDPE)

γ. Από πολυπροπυλένιο (PP)

δ. Από πολυβουτένιο (PB)

ε. Από δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (VPE)

στ. Από χλωριωμένο πολυβινυλοχλωρίδιο (C-PVC)

- Από σκυρόδεμα
- Πηλοσωλήνες εφυσωμένοι

Κάθε κατηγορία από τις παραπάνω παρουσιάζει ιδιαιτερότητες που επηρεάζουν την καταλληλότητα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι πολλά έχουν αλλάξει από την εποχή σύνταξης της Τ.Ο. του Τ.Ε.Ε. υπ' αριθμόν 2411/86 και στην αγορά διατίθενται πιστοποιημένοι σωλήνες και εξαρτήματα με βελτιωμένες ιδιότητες και για χρήσεις που δεν προβλέπονται από την συγκεκριμένη Τ.Ο. του Τ.Ε.Ε.

Πιο συγκεκριμένα, για το δίκτυο ύδρευσης το 55% του ολικού μήκους των αγωγών αποτελείται από σωλήνες αμιαντοτσιμέντου, το 20% από χαλυβδοσωλήνες, το 15% από χυτοσίδηρους σωλήνες και το 10% από πλαστικούς αγωγούς (PVC και κυρίως πολυαιθυλένιο). Στην περίπτωση των τσιμεντένιων αγωγών, πολύ συχνά, εμφανίζονται ρωγμές και θραύσεις, με αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη διαρροή του νερού. Μόνο το 10% των αγωγών είναι από πλαστικό, υλικό το οποίο είναι ανθεκτικό στην εδαφική ταλάντωση και προλαμβάνει τέτοιου είδους αστοχίες.

Κάποια γενικά χαρακτηριστικά των υλικών των σωλήνων είναι τα εξής:

- Πλαστικοί σωλήνες από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC): ελαφρύ και εύκαμπτο υλικό, η πλέον οικονομική επιλογή για σωλήνες μικρής διαμέτρου ($\Phi < 400\text{mm}$) και ονομαστικής πίεσης έως 16 atm.
- Πλαστικοί σωλήνες από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE): εξαιρετικά ελαφροί, εύκαμπτοι, αντικαθιστούν σταδιακά τους αγωγούς από PVC.
- Χαλυβδοσωλήνες (X/Σ): δαπανηροί, επιλέγονται για διαμέτρους $\Phi > 1000\text{mm}$.
- Αμιαντοτσιμεντοσωλήνες: στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα, αλλά σήμερα έχει περιοριστεί η χρήση τους, καθώς έχουν εκφραστεί φόβοι για δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία.

Σύμφωνα με την Τ.Ο. του Τ.Ε.Ε. υπ' αριθμόν 2412/86 (§ 4.6 / σελ. 34) στα **δίκτυα αποχέτευσης και ομβρίων** χρησιμοποιούνται:

1. Πηλοσωλήνες

2. Αμιαντοτσιμεντοσωλήνες
3. Τσιμεντοσωλήνες (από οπλισμένο ή όχι σκυρόδεμα)
4. Χυτοσίδηροι σωλήνες με ή χωρίς μούφα
5. Χαλυβδοσωλήνες
6. Χαλυβδοσωλήνες γαλβανισμένοι
7. Χαλκοσωλήνες
8. Πλαστικοί Σωλήνες από HT – A.B.S. / A.S.A. (Ακρυλονιτρίλιο – Βουταδένιο – Στυρένιο)
9. Πλαστικοί σωλήνες από HDPE (υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο)
10. Πλαστικοί σωλήνες από U PVC (μη πλαστικοποιημένο PVC)
11. Πλαστικοί σωλήνες από HT – PP (πολυπροπυλένιο)

Στο δίκτυο παροχής φυσικού αερίου το υλικό που χρησιμοποιείται είναι κυρίως χάλυβας υψηλής ποιότητας ή πολυαιθυλένιο, τα οποία διαθέτουν αρκετά υψηλότερη αντοχή σε θραύση από ότι τα υλικά των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης (τσιμέντο κυρίως). Αυτό συμβαίνει διότι το δίκτυο παροχής αερίου δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην Ελλάδα πολύ πιο πρόσφατα σε σχέση με τα δίκτυα ύδρευσης - αποχέτευσης και επίσης, διότι οι απαιτήσεις ασφαλείας για το δίκτυο αυτό είναι αρκετά μεγαλύτερες, δεδομένης της μεγάλης επικινδυνότητας σε περίπτωση θραύσης και διαρροής ενός σωλήνα. Για το λόγο αυτό, εκτός από το γεγονός ότι έχουν θεσπιστεί αυστηρές προδιαγραφές για το σύστημα παροχής αερίου και η επίβλεψη κατά την κατασκευή είναι απαραίτητη, εφαρμόζεται και επιθεώρηση του δικτύου πριν τη λειτουργία του από εξωτερικό ιδιωτικό οργανισμό.

Σύγκριση των υλικών

Η τεχνολογία εφαρμογής της χρήσης του πολυαιθυλενίου (PE) στα δίκτυα έχει σοβαρά πλεονεκτήματα έναντι της χρήσης άλλων υλικών, τα οποία οφείλονται στις ιδιαιτερότητες του PE. Κύρια χαρακτηριστικά των σωλήνων από PE είναι:

- η ευκαμψία, που αποτελεί μοναδικό χαρακτηριστικό του PE σε σύγκριση με τους αγωγούς από άλλα υλικά. Η ευκαμψία του PE βοηθάει στην έδραση των αγωγών σε οποιοδήποτε εδαφικό υπόβαθρο και στην καλύτερη αντοχή έναντι εντατικών καταπονήσεων,
- η δυνατότητα παραλαβής αξονικών δυνάμεων,
- στους αγωγούς από PE οι συνδέσεις είναι εξαιρετικά αξιόπιστες και εξασφαλίζουν απόλυτη στεγανότητα και αντοχή.

Η εφαρμογή των χαλυβδοσωλήνων στα δίκτυα, οφείλεται κυρίως στην αντοχή τους σε μεγάλες πιέσεις. Βασικό, όμως, πρόβλημα των χαλυβδοσωλήνων είναι ότι διαβρώνονται εύκολα.

4.2.Υπόγειοι αγωγοί και σεισμός

4.2.1.Γενικά

Τα φαινόμενα που μπορούν να επηρεάσουν έναν αγωγό λόγω σεισμού είναι:

- η εδαφική ταλάντωση που οφείλεται στη μετάδοση των σεισμικών κυμάτων και
- οι μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις, η καθίζηση, η κατολίσθηση και η ρευστοποίηση.

Η ταλάντωση του εδάφους θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στα τμήματα των σωλήνων που βρίσκονται στην επιφάνεια, ή πάνω από το έδαφος. Η απόκριση των θαμμένων

αγωγών στο σεισμό επηρεάζεται περισσότερο από τις μεγάλες, μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις. Η ταλάντωση του σεισμού δεν είναι ικανή από μόνη της να προκαλέσει τάσεις στα ευθύγραμμα τμήματα των θαμμένων αγωγών, παρά μόνο σε περιπτώσεις όπου τμήματα των αγωγών βρίσκονται κοντά στο επίκεντρο του σεισμού. Τα τμήματα αλλαγής κατεύθυνσης (στροφές αγωγών) είναι περισσότερο τρωτά. Τα αποτελέσματα της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης σε έναν θαμμένο αγωγό είναι δύσκολο να εκτιμηθούν με απλούς υπολογισμούς. Απαιτείται ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Για να εκτιμηθεί η πιθανότητα σεισμικής διέγερσης στην περιοχή έδρασης ενός συστήματος υπόγειων αγωγών, απαιτούνται γεωλογικές/σεισμολογικές έρευνες και ανάλυση σεισμικών ιστορικών δεδομένων, τα οποία πρέπει να συγκροτηθούν σε πιθανοτικά ή ντετερμινιστικά μοντέλα για να προκύψει η σεισμική πυκνότητα στην περιοχή.

Οι συνέπειες που έχει η σεισμική ελαστική παραμόρφωση στους θαμμένους αγωγούς μπορούν να εκτιμηθούν με τη χρήση απλοποιητικών αναλυτικών προσεγγίσεων ή αριθμητικών μεθόδων. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου πρέπει να γίνεται με βάση τον τύπο και τη σημασία του συστήματος σωλήνων που σχεδιάζονται και την ποιότητα των διαθέσιμων γεωλογικών δεδομένων. Οι απλοποιητικές μέθοδοι είναι επαρκείς μόνο για ένα προκαταρκτικό στάδιο της μελέτης. Όταν τα αποτελέσματα αυτών των μεθόδων δείξουν ότι θα απαιτηθούν ειδικές προληπτικές δράσεις ώστε να εξασφαλιστεί ικανοποιητική συμπεριφορά των αγωγών, ή ότι το σύστημα είναι πολύ σημαντικό ή πολύ πολύπλοκο, τότε είναι απαραίτητη η χρήση αυστηρών αναλύσεων.

4.2.2.Εδαφική ταλάντωση

Η εδαφική ταλάντωση χαρακτηρίζεται από τα εξής:

- Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (peak ground acceleration, PGA),
- Μέγιστη εδαφική ταχύτητα (peak ground velocity, PGV) και
- Φάσμα απόκρισης (response spectra, RS): δίνει την πιθανότητα να ξεπεραστούν διάφορα μεγέθη σεισμικής διέγερσης σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους.

Εκτός από ελάχιστες ειδικές περιπτώσεις, τα τρία παραπάνω μεγέθη υποθέεται ότι αναφέρονται στην οριζόντια συνιστώσα της κίνησης. Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και το φάσμα απόκρισης αναφέρονται στις συνιστώσες του συστήματος που βρίσκονται πάνω από το έδαφος, ενώ η μέγιστη εδαφική ταχύτητα αναφέρεται στους θαμμένους αγωγούς. Όταν το επίκεντρο του σεισμού είναι δεδομένο, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα και το φάσμα απόκρισης του σεισμού μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση «μοντέλων εξασθένισης». «Μοντέλα εξασθένισης» έχουν αναπτυχθεί για διάφορους τύπους σεισμικής δόνησης, για διάφορους τύπους εδαφών (βράχος ή μαλακά εδάφη) και με βάση άλλους ειδικούς παράγοντες, όπως η ύπαρξη κατακόρυφης δύναμης. Κάθε «μοντέλο εξασθένισης» που χρησιμοποιείται πρέπει να ορίζει ένα μέσο επίπεδο εδαφικής ταλάντωσης και το μέτρο της διασποράς. Η παράμετρος της διασποράς είναι πολύ σημαντική, καθώς παίζει σπουδαίο ρόλο στον καθορισμό ανώτατων και κατώτατων ορίων πιθανής απόκρισης σε σεισμό των διαφόρων συνιστωσών ενός συστήματος θαμμένων αγωγών.

Κάθε «μοντέλο εξασθένισης» που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των απωλειών πρέπει να παρέχει κατ' ελάχιστο τις παρακάτω πληροφορίες:

- Το μέσο επίπεδο εδαφικής ταλάντωσης που αναμένεται σε μία περιοχή, δεδομένου ενός συγκεκριμένου μεγέθους σεισμού και

- μία εκτίμηση της διασποράς από το μέσο επίπεδο εδαφικής ταλάντωσης. Η πιο συνηθισμένη διατύπωση στην πράξη υποθέτει ότι η διασπορά ακολουθεί λογαριθμική κατανομή.

Η εδαφική ταλάντωση αναφέρεται στην παροδική παραμόρφωση του εδάφους που οφείλεται στη μετάδοση των σεισμικών κυμάτων. Η εδαφική ταλάντωση επηρεάζει μία ευρεία περιοχή και μπορεί να προκαλέσει ζημιές σε όλη την περιοχή που επηρεάζει. Το επίπεδο της εδαφικής ταλάντωσης σε μία περιοχή όπου υπάρχει σύστημα υπόγειων αγωγών μετράται με βάση την μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα.

4.2.3. Ρευστοποίηση

Η ρευστοποίηση είναι ένα φαινόμενο το οποίο συμβαίνει σε χαλαρά, κορεσμένα, κοκκώδη εδάφη, όταν αυτά υπόκεινται σε διαρκή, μεγάλου μεγέθους εδαφική ταλάντωση. Γενικά, η άμμος τείνει να γίνεται συμπαγής και να καθιζάνει σε τέτοιες συνθήκες. Αν αυτή η άμμος είναι κορεσμένη καθώς γίνεται συμπαγής και καθιζάνει, τότε αντικαθίστανται οι πόροι του νερού, το οποίο βγαίνει στην επιφάνεια. Αν η πίεση στους πόρους αυξηθεί και φτάσει σε ένα ορισμένο επίπεδο, είναι πιθανόν μέρος εδαφικής μάζας να εκτιναχθεί στην επιφάνεια. Αυτό θα δημιουργήσει εκτεταμένες καθιζήσεις στην περιοχή.

Ο ιδανικός τρόπος να εκτιμηθεί ο κίνδυνος ρευστοποίησης κατά μήκος ενός αγωγού, είναι να πραγματοποιηθούν αναλύσεις σε κάθε μία συγκεκριμένη περιοχή από την οποία περνά ο αγωγός. Σε ορισμένες χώρες του κόσμου, όπως στις Η.Π.Α., έχουν συνταχθεί χάρτες που απεικονίζουν την πιθανότητα ανάπτυξης του φαινομένου της ρευστοποίησης για κάθε περιοχή. Μία ανάλυση ρευστοποίησης σε μία περιοχή θα πρέπει να παρέχει μία εκτίμηση της πιθανότητας να αναπτυχθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης στην περιοχή και, αν η πιθανότητα είναι μεγάλη, να υπολογίζεται το ποσοστό της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης που αναμένεται. Η μόνιμη εδαφική παραμόρφωση που μπορεί να αναπτυχθεί λόγω ρευστοποίησης μπορεί να είναι κατακόρυφη (καθίζηση), ή πλευρική (πλευρική εξάπλωση), ή συνδυασμός των δύο. Αν υπάρχει συνδυασμός των παραπάνω φαινομένων, θα πρέπει να υπολογιστεί το διανυσματικό άθροισμα των δύο συνιστωσών της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης, για να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία των καμπύλων τρωτότητας ενός αγωγού.

Η πλευρική εξάπλωση είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να ακολουθήσει τη ρευστοποίηση. Σε μερικές περιοχές, τα στρώματα των ρευστοποιημένων υλικών παραμένουν σε μία μικρή απόσταση κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Αν η περιοχή αυτή έχει μία στοιχειώδη κλίση, η ρευστοποίηση μπορεί να αναγκάσει την υγροποιημένη εδαφική μάζα να ολισθήσει στην πλαγιά. Η εξάπλωση αυτή μπορεί να προκαλέσει σοβαρές διαταραχές σε ένα σύστημα υπόγειων αγωγών.

Η ρευστοποίηση έχει την πιθανότητα να συμβεί σε συγκεκριμένα εδάφη και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μόνιμη παραμόρφωση του εδάφους. Σε περιοχές ρευστοποίησης υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση ρηγμάτων. Ο προσανατολισμός των σωλήνων σε σχέση με την εδαφική κίνηση καθορίζει το μέγεθος της απώλειας στο δίκτυο υπόγειων αγωγών.

4.2.4. Κατολίσθηση

Ο κίνδυνος για τα δίκτυα κοινής ωφελείας λόγω κατολίσθησης περιλαμβάνει διάφορους τύπους κατολίσθησης. Την περιστροφή, την αποκοπή, την ολίσθηση εδάφους και την κατάπτωση - πτώση βράχων. Όλες οι μορφές κατολισθήσεων επηρεάζουν με

διαφορετικό τρόπο τις διάφορες συνιστώσες ενός δικτύου. Ιδιαίτερα για τους θαμμένους αγωγούς, οι μορφές κατολίσθησης που τους απειλούν περισσότερο, είναι η περιστροφή και η αποκοπή. Προηγούμενες προσπάθειες υπολογισμού των ζημιών που προκλήθηκαν από κατολίσθηση, έδειξαν ότι οι θαμμένοι αγωγοί πλήττονται κυρίως από τις βαθιές κατολισθήσεις. Ολισθήσεις και καταπτώσεις δεν αποτελούν απειλή για τους θαμμένους αγωγούς.

Τα τρία βασικά βήματα για την εκτίμηση του κινδύνου λόγω κατολίσθησης είναι:

- Ανάπτυξη χαρτών ευαισθησίας σε κατολίσθηση. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να δημιουργηθούν από γεωλόγους εξοικειωμένους με τη γεωλογία της περιοχής. Οι μέθοδοι για τη δημιουργία αυτών των χαρτών περιλαμβάνουν από χρήση αεροφωτογραφιών, μέχρι έρευνα στο πεδίο και αξιολόγηση μέσω γεωτρήσεων. Το κόστος για τη μέθοδο αυτή είναι μεγάλο, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν άλλοι χάρτες διαθέσιμοι. Χάρτες τέτοιου τύπου έχουν ήδη δημιουργηθεί για ορισμένες πολιτείες των Η.Π.Α..
- Υπολογισμός της πιθανότητας κατολίσθησης, δεδομένου ενός σεισμού σχεδιασμού.
- Υπολογισμός του ποσοστού και του εύρους της κίνησης, δεδομένου ότι η κατολίσθηση θα συμβεί.

Οι κατολισθήσεις είναι μόνιμες παραμορφώσεις εδαφική μάζας και μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές στους υπόγειους αγωγούς. Ο κίνδυνος κατολισθήσεων λόγω σεισμού είναι μεγαλύτερος όταν ο σεισμός συμβαίνει σε περίοδο βροχοπτώσεων. Ενώ ορισμένες κατολισθήσεις μπορεί να είναι μικρές και να μετακινηθούν μόνο μερικά εκατοστά εδάφους, άλλες μπορεί να είναι μετακινήσεις χιλιάδων κυβικών μέτρων και η εδαφική μάζα να μετατοπίζεται εκατοντάδες μέτρα προκαλώντας ζημιές σε μία ολόκληρη περιοχή υπόγειων αγωγών. Το επίπεδο της εδαφικής μετακίνησης μετράται με βάση τη μόνιμη εδαφική παραμόρφωση.

Το μέγεθος των τάσεων που προκαλεί μία κατολίσθηση σε έναν υπόγειο αγωγό, εξαρτάται από το εύρος της εδαφικής μάζας που ολισθαίνει, το μέγεθος και τον προσανατολισμό της κίνησης, την ανάπτυξη τριβής ανάμεσα στο έδαφος και το υλικό κατασκευής του αγωγού και το βάθος θεμελίωσης του αγωγού. Για να προσδιορίσουμε τις τάσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό, θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα κατασκευαστικό μοντέλο του αγωγού με το περιβάλλον έδαφος, είτε για έναν μόνο αγωγό, είτε για ένα ολόκληρο σύστημα αγωγών. Αν ο αγωγός βρίσκεται εντός της ολισθαίνουσας μάζας, η επιρροή του εδάφους στον αγωγό μπορεί να περιγραφεί σαν κατανεμημένο φορτίο, λόγω της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Αν ο αγωγός βρίσκεται έξω από την μάζα που ολισθαίνει, το έδαφος συγκρατεί την κίνηση του αγωγού. Στην περίπτωση αυτή, η αλληλεπίδραση αγωγού - εδάφους παίζει καθοριστικό ρόλο. Για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης αγωγού - εδάφους, θα πρέπει να επιλεγεί μία φόρμουλα για τον υπολογισμό των δυνάμεων και των περιορισμών που ασκούνται από το έδαφος στο σύστημα των αγωγών. Το μέγεθος των περιορισμών και των φορτίων που ασκούνται στον αγωγό έχουν μη-γραμμική σχέση με το μέγεθος της σχετικής μετακίνησης μεταξύ του εδάφους και του αγωγού. Στην περίπτωση όπου ο αγωγός είναι παράλληλος με την κατεύθυνση της ολίσθησης, δημιουργείται ένα πεδίο καμπτικών τάσεων στον άξονα του αγωγού από τη δύναμη τριβής μεταξύ εδάφους και αγωγού. Συνεπώς, ο αγωγός μπορεί να συμπεριστεί σοβαρά.

4.2.5.Καθιζήσεις

Οι υπόγειοι αγωγοί κινδυνεύουν σε θραύση εξαιτίας των διαφορικών καθιζήσεων που μπορεί να δημιουργηθούν σε ζώνες μετάβασης από χειρότερα σε καλύτερα εδάφη και σε περιοχές με εδάφη με πρόσφατες αποθέσεις που είναι επιρρεπείς σε τοπικές ρευστοποιήσεις. Η καθίζηση προκαλεί μεγάλες τάσεις στον αγωγό ακριβώς στην περιοχή μετάβασης από χειρότερα σε καλύτερα εδάφη, εφόσον δημιουργείται μια διαφορά ύψους στο υπόβαθρο του αγωγού. Θραύσεις, ακόμη, μπορούν να συμβούν στις περιοχές όπου οι σωλήνες εισέρχονται σε δεξαμενές ή κτήρια.

Για την εκτίμηση της τρωτότητας ενός αγωγού λόγω διαφορικών καθιζήσεων πρέπει να είναι διαθέσιμες οι εξής πληροφορίες:

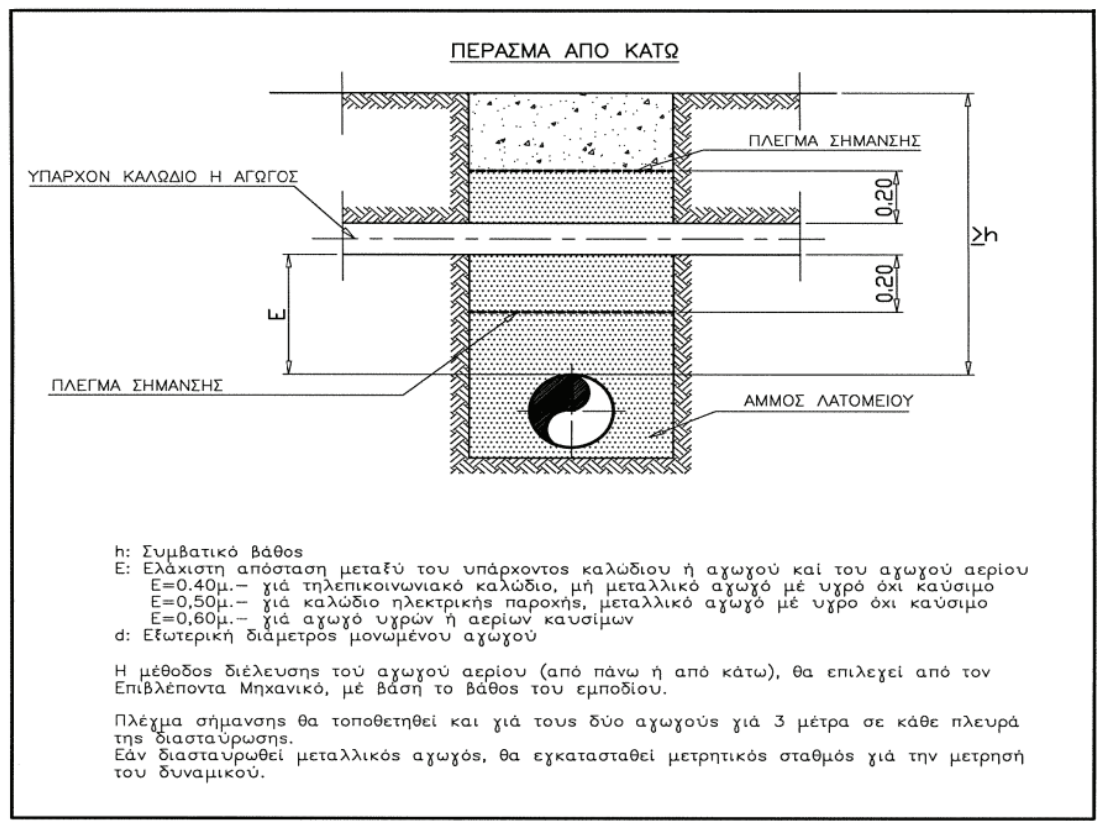
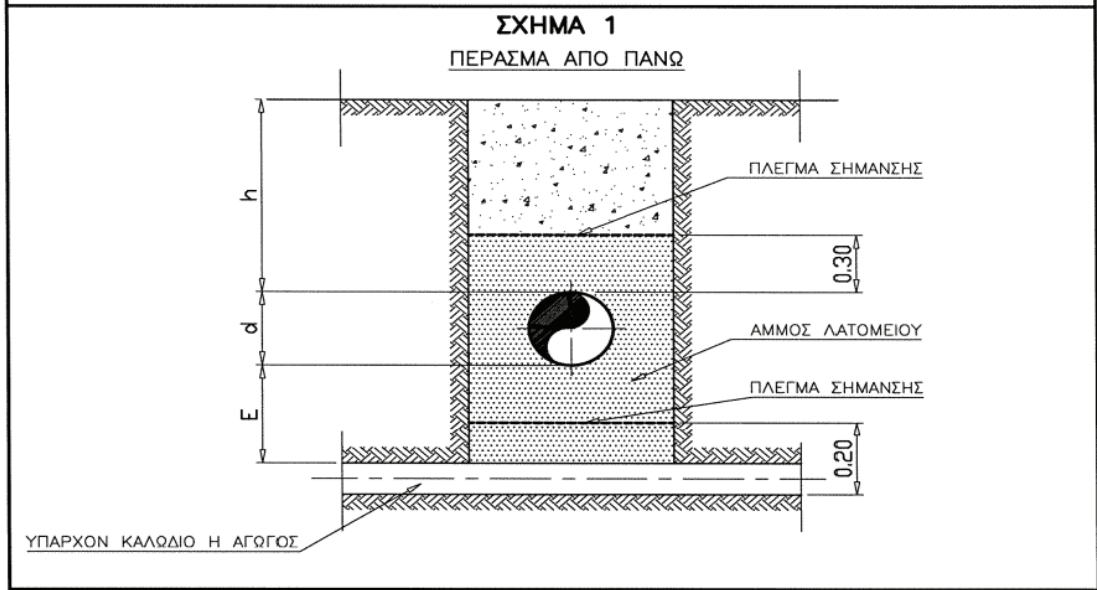
- Γενικά γεωτεχνικά στοιχεία σχετικά με τις ιδιότητες, το πάχος και το βάθος των μαλακών εδαφικών στρώσεων
- Υδρογεωλογικά και πιεζομετρικά δεδομένα,
- Πληροφορίες από τυχόν παλαιότερες έρευνες σχετικές με την πιθανότητα καθίζησης στην περιοχή.

4.3.Ιδιαιτερότητες του αντισεισμικού κανονισμού στα δίκτυα

Η ιδιαιτερότητα που διέπει τους θαμμένους αγωγούς όσον αφορά στον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι ότι οι αγωγοί είναι εγκιβωτισμένα, στο περιβάλλον έδαφος, έργα. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει σχετική μετακίνηση μεταξύ του σωλήνα και του εδάφους. Έτσι, αγωγός και έδαφος λειτουργούν σαν μία μάζα, γεγονός που σημαίνει ότι δέχονται τις ίδια τάσεις κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Το υλικό υποστρώματος (άμμος) πρέπει να είναι αδρανές, μη συνεκτικό και απαλλαγμένο από προσμίξεις που μπορεί να βλάψουν τον αγωγό. Το πάχος του συμπυκνωμένου υποστρώματος πρέπει να είναι 150 mm. Η συμπύκνωση γίνεται μέχρι επιτεύξεως πυκνότητας με τη βέλτιστη υγρασία τουλάχιστον ίσης προς 95% της μέγιστης εργαστηριακά επιτυγχανόμενης. Όλα τα παραπάνω απαιτούνται, έτσι ώστε να μην υπάρχει περιθώριο μετακίνησης του αγωγού εντός της τάφρου. Μόνο σε περίπτωση μαλακών εδαφών, όπου ο σωλήνας είναι αρκετά συμπαγής σε σχέση με το έδαφος, η παραπάνω ανάλυση μπορεί να οδηγήσει σε συντηρητικό σχεδιασμό, συνεπώς, θα ήταν σημαντικό να γίνει μία ανάλυση αλληλεπίδρασης αγωγού - εδάφους.

Τόσο οι παρειές των τάφρων, όσο και ο πυθμένας, πρέπει να παρουσιάζουν ομαλές επιφάνειες για την εξασφάλιση καλής έδρασης του σωλήνα.

ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΚΑΛΩΔΙΑ Η ΑΛΛΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα 4.2: Τομή εγκιβωτισμένου υπόγειου αγωγού, ΦΕΚ Αρ. Φύλλου 1552/Τεύχος Β, 2006.

Το βάθος τοποθέτησης του αγωγού θα πρέπει να αυξάνεται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Σε περιοχές που αναμένονται βαθιές εκσκαφές ή εργασίες στο υπεράνω του αγωγού έδαφος και οι οποίες είναι δυνατό να προκαλέσουν τραύμα ή και καταστροφή στον αγωγό.

- Σε περίπτωση που δέντρα με βαθιές ρίζες μπορεί να προκαλέσουν καταστροφή της μόνωσης του αγωγού.
- Σε περιοχές όπου αναμένονται εκσκαφές από μελλοντικά έργα.
- Σε διασταυρώσεις δρόμων, σιδηροδρομικών γραμμών κ.τ.λ..
- Σε διασταυρώσεις καναλιών υδρεύσεων.
- Σε περιοχές όπου η επιφάνεια του εδάφους μεταβάλλεται απότομα. Τότε θα πρέπει ο αγωγός να ακολουθεί τη γραμμή της επιφάνειας του εδάφους.
- Σε περιοχές όπου ο αγωγός διασταυρώνεται με παραπλήσιες εγκαταστάσεις.

Ως εγκιβωτισμένα έργα, οι αγωγοί κινδυνεύουν ελάχιστα από αδρανειακές δυνάμεις. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος προέρχεται στην περίπτωση που, λόγω του σεισμού, προκληθούν εδαφικές παραμορφώσεις, όπως για παράδειγμα κατολίπηση, ρευστοποίηση ή μετακίνηση κάποιου ρήγματος. Η καταπόνηση στον αγωγό, οφείλεται κυρίως στις ισχυρές, μη γραμμικές δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται, εξαιτίας του εγκιβωτισμού του αγωγού στο έδαφος. Ο αγωγός παραμορφώνεται έντονα στην πλαστική περιοχή και η επιρροή και η συμπεριφορά του εδάφους είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Στις περισσότερες περιπτώσεις συμβαίνει απόσχιση του εδάφους. Συνεπώς, η αναλυτική αντιμετώπιση του φαινομένου, είναι ένα πρόβλημα πολύπλοκο και τα συνήθη προγράμματα επίλυσης φορέων με πεπερασμένα στοιχεία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

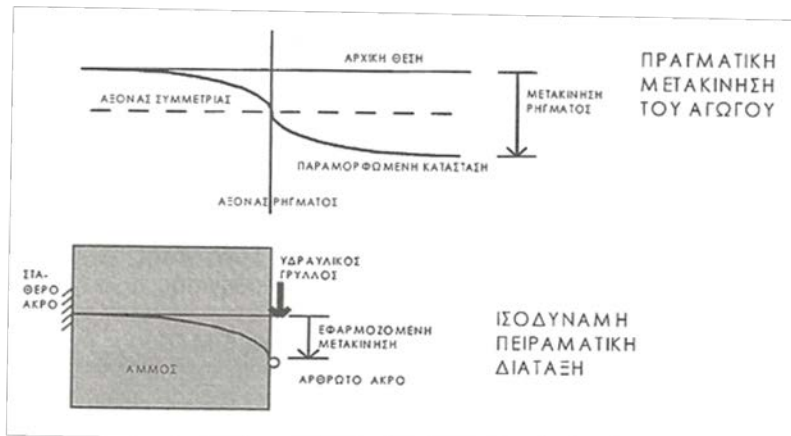
4.4. Προσπάθειες ανάλυσης της συμπεριφοράς του φαινομένου του εγκιβωτισμού

Τα τελευταία χρόνια, η εμπειρία στα θέματα ανάλυσης της συμπεριφοράς ενός εγκιβωτισμένου αγωγού, βασίζεται στην ανάπτυξη θεωρητικών προσομοιωμάτων, αλλά και πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.. Μια πρώτη προσπάθεια έγινε το 1986, στην οποία θεωρήθηκε ότι στη ζώνη όπου εκδηλώθηκε η μετακίνηση του ρήγματος, ο αγωγός καμπυλώνεται με σταθερή ακτίνα καμπυλότητας, ίση εκατέρωθεν του ρήγματος, για οριζόντια μετακίνηση. Η θεώρηση αυτή, κατέληξε στο γεγονός ότι, κατά το σχεδιασμό θα πρέπει να επιδιώκονται μικρά βάθη τοποθέτησης, μεγάλες γωνίες διάσχισης, μεγάλα πάχη τοιχωμάτων και μικρές γωνίες τριβής μεταξύ εδάφους και αγωγού.

Το 1989, με βάση το ίδιο μοντέλο, έγινε προσπάθεια προσδιορισμού της επιρροής του υλικού κατασκευής στη συμπεριφορά του αγωγού, ενώ παράλληλα μελετήθηκε προσομοίωμα υπόγειου αγωγού σε κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος.

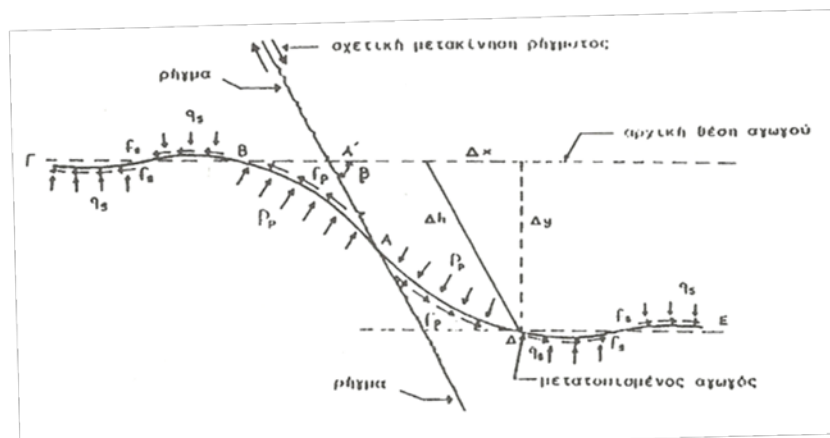
Στα επόμενα χρόνια, 1991, 1995, μελετήθηκε το τμήμα του αγωγού που κινείται προς τα πάνω, σε σχέση με το έδαφος, στις περιπτώσεις που ο αγωγός παραμένει εγκιβωτισμένος, ή αναδύεται από το έδαφος. Τα συμπεράσματα αυτής της διερεύνησης ταυτίζονται με τα αντίστοιχα συμπεράσματα της επίλυσης του αρχικού προσομοιώματος. Για εδαφικές παραμορφώσεις που πιθανόν θα προκαλούσαν αστοχία σε αγωγούς, η εντατική κατάσταση των αγωγών είναι πρωτίστως αξονική, ενώ η γεωμετρία της παραμόρφωσης εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού πλήρωσης της τάφρου.

Το 2001, στα πλαίσια του 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, χρησιμοποιήθηκε μία πειραματική διάταξη αγωγού για τη διερεύνηση της ανελαστικής συμπεριφοράς των υπόγειων αγωγών για μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.3: Συσχετισμός της πραγματικής μετακίνησης του αγωγού με την ισοδύναμη πειραματική διάταξη, Ε. Βουγιούκας, Ι. Ψυχάρης, 2001.

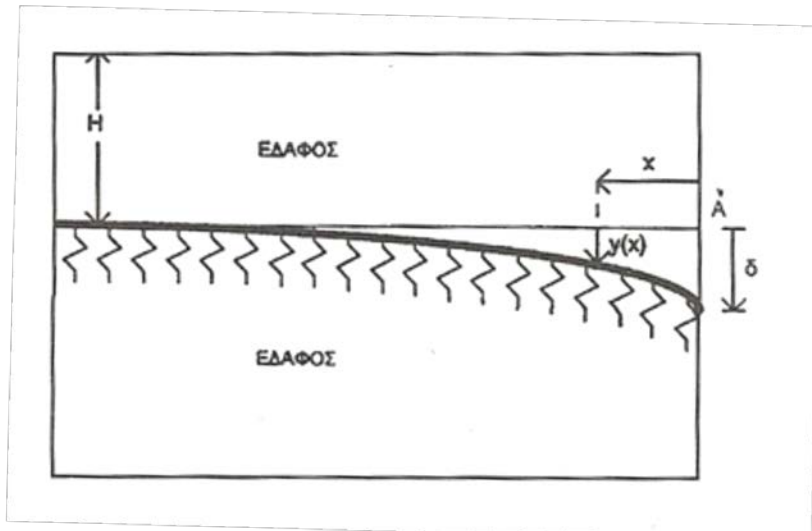
Η πειραματική διάταξη αποτελούταν από ένα μεταλλικό αγωγό, ένα μεταλλικό εγκιβωτισμό, με υλικό πληρώσεως άμμο, έναν υδραυλικό γρύλλο για την επιβολή του φορτίου και όργανα μετρήσεως. Οι διαστάσεις του αγωγού επιλέχθηκαν έτσι, ώστε τα δοκίμια και το περιβάλλον έδαφος να εισέλθουν σε περιοχή ανελαστικών παραμορφώσεων. Για το κιβώτιο του εγκιβωτισμού επιλέχθηκε ως υλικό το μέταλλο, ώστε το κιβώτιο να διαθέτει σχετικά μεγάλη ακαμψία και να παραμορφώνεται ελάχιστα με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει τις παραμορφώσεις στο δοκίμιο (αγωγός) και στο υλικό πληρώσεως. Όσο για το υλικό πληρώσεως, ήταν θραυστή άμμος λατομείου, χαλαρής ως μέσης πυκνότητας, από την άμμο που χρησιμοποιείται και πρακτικά ως υλικό πλήρωσης ορυγμάτων και κατά τις τοποθετήσεις σωλήνων στην πράξη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η παραμόρφωση του αγωγού που υπόκειται σε οριζόντια μετακίνηση ενός ρήγματος και οι εδαφικές αντιδράσεις.



Σχήμα 4.4: παραμόρφωση του αγωγού που υπόκειται σε οριζόντια μετακίνηση ρήγματος - εδαφικές αντιδράσεις, Ε. Βουγιούκας, Ι. Ψυχάρης, 2001.

Στο πείραμα εξετάστηκε μόνο η περίπτωση που ο αγωγός διασχίζει κάθετα το ρήγμα ($\beta=90^\circ$).

Από την εφαρμογή του πειράματος προέκυψε ένα απλοποιημένο θεωρητικό μοντέλο, με το οποίο μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά η καταπόνηση (αξονική δύναμη και κάμψη) ενός αγωγού που υποβάλλεται σε εγκάρσια μετακίνηση στο άκρο του, όπως στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.5: Μοντέλο υπολογισμού, Ε. Βουγιούκας, Ι. Ψυχάρης, 2001.

Στην προσεγγιστική, αυτή, ανάλυση, τα εντατικά μεγέθη υπολογίζονται για μία δεδομένη μορφή του παραμορφωμένου φορέα και υπολογίζονται από την επιμήκυνση του αγωγού και την αντίδραση του εδάφους. Θα πρέπει να τονιστεί ότι δε λαμβάνεται υπόψη η πιθανή πλαστικοποίηση του αγωγού, συνεπώς τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή του φαινομένου μετά τη διαρροή.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα επιλέχθηκε η παρακάτω σχέση για να περιγράψει τη μετακίνηση σε κάθε θέση του αγωγού:

$$y(x) = \delta \times [\exp(x/D)]^{(-1/5)}, \text{ όπου}$$

δ : η μετακίνηση στο άκρο

D : η εξωτερική διάμετρος του αγωγού

Η εξίσωση αυτή δεν περιγράφει ικανοποιητικά, μόνο την περίπτωση όπου ο αγωγός έχει πλαστικοποιηθεί, οπότε η ελαστική γραμμή τείνει στην ευθεία.

Το έδαφος προσομοιάζεται με θεμελίωση Winkler για μη-γραμμικές σταθερές ελατηρίων. Όταν η τάση του εδάφους φτάσει στην αντοχή του, θεωρούμε ότι η δύναμη από τα ελατήρια Winkler μένει σταθερή, ανεξάρτητα από τη συνεχιζόμενη παραμόρφωση του αγωγού. Η αξονική δύναμη του αγωγού υπολογίζεται από την επιμήκυνσή του, η οποία προκύπτει από τη διαφορά του συνολικού μήκους του παραμορφωμένου φορέα από το αρχικό του μήκος. Από την επιμήκυνση μπορεί να υπολογιστεί η μέση αξονική παραμόρφωση και, με τη χρήση του καταστατικού νόμου τάσεων - παραμορφώσεων, και η αξονική τάση του αγωγού σ_n . Η αξονική δύναμη τότε προκύπτει από τη σχέση $N = \sigma_n \times A_p$, όπου A_p είναι το εμβαδό της διατομής του αγωγού.

Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων, κατά την οποία προέκυψε ότι η προτεινόμενη πειραματική μέθοδος αποδίδει με μεγάλη ακρίβεια την εντατική κατάσταση του αγωγού για επιβαλλόμενη εξωτερική μετακίνηση της τάξεως μερικών διαμέτρων. Ελάχιστες αποκλίσεις παρουσιάστηκαν μόνο κατά την αρχική φάση των πειραμάτων λόγω ανοχών που υπήρχαν στις υποτιθέμενες ακλόνητες στηρίξεις των αγωγών. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η προσεγγιστική αυτή μέθοδος έχει ισχύ για καταπονήσεις κατά τις οποίες ο αγωγός δεν εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Η πιο επικίνδυνη εντατική κατάσταση στην οποία περιέρχεται ένας υπόγειος εγκιβωτισμένος αγωγός, είναι κατά τη εφαρμογή μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων, όπου η συμπεριφορά του αγωγού επηρεάζεται κυρίως από

τις μεγάλες αξονικές καταπονήσεις και έτσι η ελαστική του γραμμή τείνει στην ευθεία, με μεγάλη μείωση της ροπής και, επομένως, και των ροπών κάμψης.

Συμπεράσματα του πειράματος

Η παραπάνω πειραματική διαδικασία εστίασε στην παραμόρφωση και την εντατική κατάσταση των υπόγειων αγωγών που διασχίζουν ενεργοποιούμενα από το σεισμό ρήγματα. Λόγω του εγκιβωτισμού των υπόγειων αγωγών στο έδαφος, η δυναμική απόκρισή τους σε σεισμό είναι πολύ μικρή. Παρόλα αυτά οι υπόγειοι αγωγοί είναι ευαίσθητοι σε επιβαλλόμενες από σεισμό μόνιμες παραμορφώσεις σημαντικού εύρους, του εδάφους εντός του οποίου είναι τοποθετημένοι. Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αποδείχθηκε ότι οι καταπονήσεις στους αγωγούς είναι σημαντικές, ακόμη και στην περίπτωση που οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις είναι μικρού σχετικά εύρους.

Με την επιβολή εγκάρσιας μετακίνησης στον αγωγό, της τάξης της διαμέτρου του, ο αγωγός καταπονείται καμπτικά και αξονικά σε τάσεις που πλησιάζουν τη διαρροή του. Με την επιβολή μεγαλύτερων μετακινήσεων αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις, της τάξεως διαρροής του υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ακαμψίας του αγωγού. Στις περιπτώσεις των μεγάλων εδαφικών παραμορφώσεων, παράγοντες που μπορούν να μειώσουν τα εντατικά μεγέθη κατά μήκος των αγωγών, είναι παράγοντες που μπορούν να μειώσουν τις εδαφικές αντιδράσεις, όπως το μικρό βάθος κάλυψης, η μικρή διάμετρος και η μικρή γωνία τριβής αγωγού - εδάφους και η δυνατότητα κατανομής των παραμορφώσεων σε μεγαλύτερο μήκος, όπως για παράδειγμα με όχι πυκνή κατανομή αγκυρώσεων, ή με δυνατότητα ελαστικών συνδέσεων με αυτές. Το προτεινόμενο μοντέλο δίνει με ικανοποιητική ακρίβεια εκτίμηση της εντατικής κατάστασης του αγωγού, αλλά και της ελαστικής γραμμής, μέχρι αυτός να διαρρεύσει (σχετικά μικρές εδαφικές μετακινήσεις). Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την περίπτωση της ελαστικής συμπεριφοράς του αγωγού. Μετά το όριο διαρροής, επειδή η ελαστική γραμμή τείνει στην ευθεία και αναπτύσσεται μεγάλη αξονική δύναμη, για να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μείωση της ακαμψίας.

Κεφάλαιο 5

Διαδικασία εκτίμησης της τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας σύμφωνα με τους αμερικάνικους κανονισμούς

5.1.Εισαγωγή

Η εκτίμηση της τρωτότητας έναντι σεισμού στα δίκτυα κοινής ωφελείας είναι, πλέον, ζωτικής σημασίας διαδικασία για τους φορείς διαχείρισης των δικτύων αυτών. Παρόλο που υπάρχει μικρή εμπειρία σε αυτόν τον τομέα, ιδιαίτερα στη χώρα μας, είναι απαραίτητο να θεσπιστεί μία πρότυπη διαδικασία υπολογισμού της τρωτότητας των στοιχείων των δικτύων έναντι σεισμού. Η ευθύνη αυτή, είναι αρμοδιότητα των φορέων διαχείρισης των δικτύων που πρέπει να εξασφαλίσουν την ομαλή και ασφαλή λειτουργία των δικτύων αμέσως μετά από ένα σεισμό.

Στις Η.Π.Α., στις αρχές τις δεκαετίας του 2000, η American Lifelines Alliance σε συνεργασία με τη FEMA (Federal Emergency Management Agency), διατύπωσε κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν οι φορείς διαχείρισης των δικτύων κοινής ωφελείας για την εκτίμηση της τρωτότητας των δικτύων. Στο κεφάλαιο αυτό, παρατίθενται οι οδηγίες της American Lifelines Alliance. Η διαδικασία είναι περίπου παρόμοια για όλα τα δίκτυα (αποχέτευση, οδικό δίκτυο και άλλα). Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται ενδεικτικά οι κατευθυντήριες γραμμές για το δίκτυο ύδρευσης και το δίκτυο παροχής φυσικού αερίου και υγρών καυσίμων. Λόγω της έλλειψης εμπειρίας σε θέματα τρωτότητας στη χώρα μας, οι μελέτες που άρχισαν να πραγματοποιούνται βασίζονται στις κατευθυντήριες γραμμές της American Lifelines Alliance, οι οποίες προσαρμόζονται στα δεδομένα της χώρας μας και αποτελούν σημαντικό βήμα στην εξέλιξη της γνώσης απέναντι στο αντικείμενο της αποτίμησης τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας έναντι σεισμού.

5.2.Ύδρευση

5.2.1.Εισαγωγή

Το δίκτυο ύδρευσης αποτελεί, ίσως, το δίκτυο που έχει τη μεγαλύτερη σημασία στις σύγχρονες κοινωνίες, καθώς επηρεάζει άμεσα την ανθρώπινη ζωή. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι σε περίπτωση διαταραχής στο δίκτυο ύδρευσης, θα δημιουργηθούν πολύ σοβαρά προβλήματα στο ανθρώπινο περιβάλλον. Οι οικονομικές απώλειες είναι εξίσου σημαντικές με τις κοινωνικές. Για το λόγο αυτό, είναι ζωτικής σημασίας η εκτίμηση της τρωτότητας του δικτύου ύδρευσης σε διάφορους φυσικούς, αλλά και ανθρωπογενείς κινδύνους, όπως και ο αντισεισμικός σχεδιασμός του, αλλά και η εκτίμηση των οικονομικών απωλειών σε περίπτωση αστοχίας.

Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να περιγραφεί η λεπτομερής διαδικασία που έχει αναπτυχθεί από την American Lifelines Alliance το 2001, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σύστημα ύδρευσης, και εκτιμά την πιθανότητα αστοχίας

από σεισμό στις διάφορες συνιστώσες του συστήματος. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην διατύπωση σχέσεων τρωτότητας αλλά και στην κατάρτιση των καμπύλων τρωτότητας.

Το δίκτυο ύδρευσης αποτελείται από τα εξής:

- Σύστημα μεταφοράς του νερού (αγωγοί, σήραγγες και κανάλια)
- Υπέργειες κυλινδρικές δεξαμενές αποθήκευσης
- Συστήματα ελέγχου και συλλογής δεδομένων που βρίσκονται κατά μήκος του συστήματος μεταφοράς
- Μηχανισμοί ελέγχου της ροής (βαλβίδες, κ.τ.λ.).

Θα πρέπει, λοιπόν, να καταρτιστούν καμπύλες τρωτότητας για κάθε μία από τις παραπάνω συνιστώσες. Στην παρούσα εργασία δε θα εξεταστούν τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος ύδρευσης, όπως τα κτήρια, τα φράγματα, υδροηλεκτρικά έργα, κ.τ.λ., παρά μόνον τα συστήματα μεταφοράς του νερού. Όσον αφορά στις υπέργειες κυλινδρικές δεξαμενές αποθήκευσης του νερού, οι σχέσεις τρωτότητας μπορεί να έχουν μία πιο αναλυτική μορφή, διότι γνωρίζοντας τις βασικές παραμέτρους, όπως το ύψος της δεξαμενής, τη διάμετρο, το πάχος των τοιχίων, μπορούν να υπολογιστούν ευκολότερα οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στη δεξαμενή.

Στο υποκεφάλαιο αυτό, θα γίνει μία συνοπτική αναφορά και στην περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της πιθανότητας σεισμού και θα καθοριστούν οι σεισμικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση της τρωτότητας ενός δικτύου ύδρευσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι καμπύλες τρωτότητας θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη αβεβαιότητες που αφορούν είτε τα χαρακτηριστικά του σεισμού, είτε τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Αβεβαιότητες μπορεί, επίσης, να προκύψουν στο στάδιο ποσοτικοποίησης των σχέσεων και καμπύλων τρωτότητας.

Στη συνέχεια του υποκεφαλαίου αυτού θα περιγραφεί συνοπτικά η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί από τον φορέα διαχείρισης ενός δικτύου ύδρευσης και οι πληροφορίες που απαιτούνται για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης του συστήματος, σύμφωνα με την American Lifelines Alliance, 2002.

5.2.2. Διαδικασία αποτίμησης σεισμικής τρωτότητας δικτύου ύδρευσης σύμφωνα με την American Lifelines Alliance, 2002

5.2.2.1. Απογραφή του συστήματος

Για να υπολογιστούν οι απώλειες που μπορεί συμβούν σε ένα σύστημα ύδρευσης, ο αναλυτής θα πρέπει αρχικά να κάνει μία απογραφή των συνιστωσών του συστήματος και του σεισμικού κινδύνου που μπορεί να επηρεάσει το σύστημα. Αυτό είναι ένα βήμα - κλειδί που πρέπει να γίνει στα πλαίσια της ανάλυσης της συμπεριφοράς του συστήματος σε περίπτωση φυσικού κινδύνου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι πιθανό, ο αναλυτής να μην έχει πρόσβαση στα επιθυμητά στοιχεία που απαιτεί η απογραφή. Για παράδειγμα, το υλικό κατασκευής των υπόγειων αγωγών, δεν είναι γνωστό με βεβαιότητα, εάν δεν είναι διαθέσιμα τα αυθεντικά σχέδια των σωλήνων. Έτσι, ο αναλυτής πιθανότατα θα χρησιμοποιήσει την παραδοχή μίας μέσης ποιότητας του υλικού κατασκευής των σωλήνων, με αποτέλεσμα αυτό να δημιουργήσει αβεβαιότητα όσον αφορά την αξιοπιστία των καμπύλων τρωτότητας που θα καταρτιστούν. Οι καμπύλες, λοιπόν, που θα προκύψουν από μία τέτοια ανάλυση με αβεβαιότητες θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για μία προκαταρκτική εκτίμηση

της τρωτότητας του δικτύου. Στις παρακάτω ενότητες περιγράφεται το υπόβαθρο που απαιτείται για την απογραφή των συνιστωσών του συστήματος ύδρευσης.

Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης μπορεί να είναι μία πόλη, μία χώρα, ή οποιαδήποτε άλλη περιοχή. Σε ορισμένα συστήματα ύδρευσης, τα στοιχεία - κλειδιά του συστήματος βρίσκονται σε κάποια απόσταση από την περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος. Ο αναλυτής θα πρέπει να καθορίσει το μέγεθος της περιοχής μελέτης, έτσι ώστε να περιλαμβάνονται σε αυτήν τα ζωτικά στοιχεία του συστήματος. Η περιοχή μελέτης πρέπει να περικλείει όλες τις περιοχές με προβλεπόμενη εδαφική επιτάχυνση 0,05g ή μεγαλύτερη.

Υδραγωγεία

Τα ακατέργαστο νερό, μετά από την επεξεργασία του στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού, φτάνει σε μεγάλες εγκαταστάσεις μεταφοράς νερού, που συνήθως ονομάζονται υδραγωγεία. Ένα υδραγωγείο διαθέτει ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω στοιχεία:

- Υπέργειοι σωλήνες. Είναι σωλήνες με μεγάλη διάμετρο (4 - 7 πόδια = 1,22 - 2,14 μέτρα). Οι υπέργειοι σωλήνες χρησιμοποιούνται συχνά σε περιοχές όπου το δίκτυο διασχίζει μαλακά εδάφη. Ένας υπέργειος σωλήνας είναι συνήθως από χάλυβα συγκολλημένο ή κοχλιωτό.
- Υπόγειοι σωλήνες. Είναι σωλήνες μεγάλης διαμέτρου που βρίσκονται 3 έως 15 ή και περισσότερα πόδια κάτω από το έδαφος. Το υλικό κατασκευής είναι σκυρόδεμα ή χάλυβας συγκολλημένος ή κοχλιωτός.
- Κανάλια. Τα κανάλια μπορούν να δημιουργηθούν από χαντάκια μέσα στο έδαφος, ή από αναχώματα, ή από συνδυασμό των δύο. Συνήθως, τα κανάλια είναι από σκυρόδεμα για να αποφεύγονται οι απώλειες νερού. Τα κανάλια μπορεί να διασχίζουν ευσταθείς ή ασταθείς γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι ασταθείς γεωλογικοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν και τις περιοχές ρευστοποίησης, ή τις ζώνες κατολίσθησης.
- Σήραγγες. Οι σήραγγες μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες: σήραγγες σε βράχο, σήραγγες σε αλουβιακές αποθέσεις με καλής ποιότητας τοιχία, σήραγγες σε αλουβιακές αποθέσεις με μέτριας ποιότητας τοιχία και σήραγγες cut – and – cover. Τα τοιχία των σηράγγων μπορούν να υποστούν ζημιές από ισχυρή εδαφική δόνηση και τα στόμιά τους από κατολίσθηση. Παρόλο που δεν είναι συχνό, μία cut – and – cover σήραγγα μπορεί να διασχίζει εδάφη που είναι ευπαθή σε ρευστοποίηση.

Για την εκτίμηση των απωλειών σε ένα σύστημα ύδρευσης, χρειάζονται τα παρακάτω για κάθε υδραγωγείο:

- Τοποθεσία. Τα ακραία και τα εσωτερικά σημεία κατά μήκος ενός υδραγωγείου μέσα σε μία περιοχή μελέτης, είναι απαραίτητα για την περιγραφή της τοποθεσίας. Αν το υδραγωγείο διασχίζει περιοχές με ασταθείς γεωλογικούς σχηματισμούς (ζώνες ρευστοποίησης, ζώνες κατολίσθησης, κ.τ.λ.), τότε απαιτούνται οι συνισταμένες x - y των σημείων αρχής και τέλους της ασταθούς περιοχής.
- Τύπος. Το υδραγωγείο πρέπει να περιγράφεται ως υπέργειο, υπόγειο, κανάλι, ή σήραγγα. Αν το υδραγωγείο είναι υπέργειο ή υπόγειο, τότε πρέπει να καθοριστεί το υλικό κατασκευής του. Αν το υδραγωγείο είναι κανάλι, τότε πρέπει να καθοριστεί αν το κανάλι είναι ανοιχτό και με τοιχία από σκυρόδεμα, ανοιχτό με τοιχία από το έδαφος της περιοχής, ή

κατασκευασμένο από αναχώματα. Αν το υδραγωγείο είναι σήραγγα, τότε πρέπει να καθοριστεί το είδος των τοιχιών της σήραγγας.

- Πολλαπλά υδραγωγεία. Αν το υδραγωγείο συνθέτεται από πολλαπλές γραμμές, καθένας από τους παράλληλους αγωγούς, τα κανάλια ή τις σήραγγες πρέπει να συνυπολογίζεται.
- Παρελκόμενα κατά μήκος του υδραγωγείου. Αυτά περιλαμβάνουν τα στόμια, τις βαλβίδες, κ.τ.λ. Σε αρκετές περιπτώσεις αυτά αγνοούνται σε μία μελέτη εκτίμησης των απωλειών του συστήματος λόγω σεισμού, παρόλα αυτά μπορεί να είναι σημαντικά σε περίπτωση που αναζητείται η ευπάθεια συγκεκριμένου στοιχείου του συστήματος.
- Συστήματα βαρύτητας ή συστήματα άντλησης. Τα συστήματα βαρύτητας μεταφέρουν το νερό από τα υψηλότερα υψόμετρα στα χαμηλότερα υψόμετρα και δεν χρειάζονται κάποια αντλία για να μετακινήσουν το νερό. Τα συστήματα άντλησης χρησιμοποιούν αντλίες για να διατηρήσουν τη ροή του νερού. Ορισμένα συστήματα βαρύτητας χρησιμοποιούν αντλίες στο μήκος τους, όπου απαιτείται αύξηση της ροής.

Αγωγοί διανομής

Με τον όρο αγωγοί διανομής αναφέρονται οι υπόγειοι σωλήνες που μεταφέρουν το νερό στους καταναλωτές. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά υλικά κατασκευής που χρησιμοποιούνται στο σύστημα ύδρευσης, όπως χυτοσίδηρος, πλαστικό, ατσάλι κ.ά. Στις Η.Π.Α., όπως και στην Ελλάδα, το υλικό που συναντάμε στα δίκτυα διανομής νερού έχει να κάνει με την ηλικία των σωλήνων, δηλαδή με το ποιοι κανονισμοί ίσχυαν την περίοδο κατασκευής του δικτύου. Η διάμετρος των αγωγών διανομής είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη στις μελέτες σεισμικής απόκρισης. Συνήθεις διάμετροι για τους τοπικούς αγωγούς διανομής είναι των 4, 6 και 8 ιντσών. Γενικότερα, αν ένας τοπικός σωλήνας διανομής μικρής διαμέτρου υποστεί κάποια θραύση, θα διακοπεί η παροχή νερού μόνο στον καταναλωτή που συνδέεται άμεσα με αυτό τον σωλήνα. Στο δίκτυο διανομής μιας πόλης χρησιμοποιούνται διάμετροι των 12, 16, 20, 24, 30, 36, 42, 48, 54 και 60 ιντσών. Οι αγωγοί αυτοί είναι εκείνοι που συνδέουν τις δεξαμενές αποθήκευσης του νερού με το τοπικό δίκτυο διανομής στους καταναλωτές.

Δεξαμενές αποθήκευσης

Οι δεξαμενές αποθήκευσης μπορούν να τοποθετηθούν στο σημείο αρχής, καθ' όλο το μήκος, ή στο σημείο τέλους ενός συστήματος ύδρευσης. Η λειτουργία τους μπορεί να είναι η διατήρηση του επιπέδου του νερού, η παροχή όγκου νερού σε περίπτωση δυσλειτουργίας του συστήματος και άλλες. Για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης των δεξαμενών αποθήκευσης είναι σημαντικά τα εξής:

- Ο σεισμικός κίνδυνος στην περιοχή της δεξαμενής. Αυτό περιλαμβάνει το είδος του εδάφους (για παράδειγμα βράχος, μαλακά εδάφη) και η ευπάθεια της περιοχής σε κατολισθήσεις ή ρευστοποίηση.
- Ο τρόπος κατασκευής. Απαιτείται ενδελεχής έρευνα για την διαμόρφωση της δεξαμενής που θα περιλαμβάνει το είδος της θεμελίωσης, το είδος της οροφής, εάν υπάρχει, ο εκτιμώμενος όγκος (ύψος και διάμετρος), πάχος τοιχωμάτων. Η έρευνα απαιτεί σχέδια που να απεικονίζουν λεπτομερώς την κατασκευή.
- Το υλικό κατασκευής της δεξαμενής. Υπάρχουν δεξαμενές από ατσάλι, από σκυρόδεμα, από ξύλο, κ.ά.

Σήραγγες

Σήραγγες στο δίκτυο ύδρευσης μπορεί να χρησιμοποιούνται και για το ακατέργαστο νερό, αλλά και για το επεξεργασμένο. Οι σήραγγες μπορεί να είναι ευπαθείς στο σεισμό στην περίπτωση που διασχίζουν κάποιο ρήγμα, ή στην περίπτωση που τα στόμιά τους βρίσκονται σε περιοχή που βρίσκεται σε ζώνη κατολίσθησης. Σε μικρότερη κλίμακα, αστοχίες μπορεί να συμβούν στα τοιχώματα των σηράγγων σε περίπτωση πολύ ισχυρής εδαφικής μετακίνησης. Για την κατάρτιση των καμπύλων τρωτότητας, οι σήραγγες ταξινομούνται σε μία από τις παρακάτω δύο κατηγορίες: διάτρητες σήραγγες και σήραγγες cut – and – cover. Οι περισσότερες σύγχρονες σήραγγες κατασκευάστηκαν με διατρητικά μηχανήματα, ενώ οι παλαιότερες σήραγγες κατασκευάστηκαν με ποικίλες άλλες μεθόδους. Υποκατηγορίες μεθόδων διάτρητων σηράγγων βασίζονται κυρίως στις γεωλογικές συνθήκες.

Κανάλια

Τα κανάλια χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλα δίκτυα ύδρευσης. Ο λόγος που, ορισμένες φορές, τα κανάλια προτιμώνται σε σχέση με τους κλειστούς αγωγούς είναι το γεγονός ότι τα κανάλια λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση και τείνουν να είναι μεγαλύτερα από τους κλειστούς αγωγούς που λειτουργούν υπό πίεση. Πλεονέκτημα στη χρήση καναλιών έναντι σωλήνων είναι ότι τα κανάλια μπορούν να κατασκευαστούν από υλικά που διατίθενται στην περιοχή της κατασκευής, έτσι ώστε να είναι περισσότερο ανθεκτικά στο χρόνο έναντι των μεταλλικών αγωγών και οι απώλειες σε υδραυλική ικανότητα που μπορεί να υποστούν να είναι σίγουρα μικρότερες από αυτές που μπορούν να υποστούν οι κλειστοί μεταλλικοί αγωγοί. Ένα από τα μειονεκτήματα χρήσης καναλιών έναντι κλειστών αγωγών είναι ότι στα ανοιχτά κανάλια υπάρχει σοβαρή πιθανότητα παρεμβολής υλικών στη ροή του νερού. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τεχνητών καναλιών για τη μεταφορά υγρών, κανάλια ελεύθερης ροής και αγωγοί πίεσης. Στους ανοιχτούς αγωγούς η ροή επιτυγχάνεται με την τοποθέτησή τους σε μία επικλινή επιφάνεια, ενώ στους αγωγούς υπό πίεση η ροή επιτυγχάνεται με κίνηση των υγρών υπό πίεση. Οι ανοιχτοί αγωγοί μπορεί να είναι απλά, ανοιχτά κανάλια ή χαντάκια ή αγωγοί ή σήραγγες μέσα στα οποία η παροχή δεν κατακλύζει ολόκληρη τη διατομή τους.

Το σχήμα της τομής ενός καναλιού (ανοιχτού ή υπό πίεση), εξαρτάται από το συνδυασμό κόστους και υδραυλικών παραγόντων. Ένας τετραγωνικός αγωγός είναι υδραυλικά αναποτελεσματικός και οι επίπεδες επιφάνειές του δεν είναι κατασκευαστικά επιθυμητές, εξαιτίας της υπερβολικής χρήσης υλικών για μία δεδομένη δύναμη. Ένα κανάλι με ημικυκλική τομή, που δεν έχει οροφή και δεν υπάρχει ροή σε όλη τη διατομή του, είναι το πιο αποτελεσματικό υδραυλικά, όμως αυτή η τομή χρησιμοποιείται σπάνια λόγω της δυσκολίας στην κατασκευή. Λόγω όλων των παραπάνω, η πιο συχνή διατομή που χρησιμοποιείται για τα κανάλια είναι η τραπεζοειδής.

Το κόστος είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για τη σχεδίαση των καναλιών. Εάν, υποθετικά, όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες θεωρηθούν ίσοι, όσο πιο μικρή είναι η διατομή του καναλιού, τόσο χαμηλότερο είναι το κόστος. Αυτό σημαίνει πως οι μελετητές θα προσπαθήσουν να μεγιστοποιήσουν την ταχύτητα της ροής του νερού. Οι μέγιστες δυνατές ασφαλείς ταχύτητες για ένα ανοιχτό κανάλι από σκυρόδεμα, είναι 40 πόδια το δευτερόλεπτο, ενώ συνήθως χρησιμοποιούνται ταχύτητες της τάξεως των 10 με 12 πόδια ανά δευτερόλεπτο. Λεπτοί μεταλλικοί σωλήνες μπορεί να υποστούν ζημιές από χοντρή άμμο ή χαλίκι με ταχύτητες ροής νερού 6 έως 8 πόδια ανά δευτερόλεπτο. Αν το νερό που μεταφέρεται περιέχει ένα

αποδεκτό ποσοστό λάσπης, πολύ χαμηλές ταχύτητες θα προκαλέσουν την κορεσμό στο κανάλι και η υδραυλική του ικανότητα θα διαταραχτεί.

Η απώλεια ποσότητας νερού λόγω διαρροής ή εξάτμισης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το σχεδιασμό ενός καναλιού. Η πιθανότητα διαρροών σε καλά κατασκευασμένους και καλά διατηρημένους αγωγούς από σκυρόδεμα, ξύλο ή μέταλλο είναι σχετικά μικρή. Ωστόσο, κανένας αγωγός δεν είναι ολοκληρωτικά αδιαπέρατος. Σε μεγάλης έκτασης δίκτυα, η διαρροή λόγω της συσσώρευσης ακόμη και πολύ μικρών ποσοτήτων διαρροών κατά μήκος όλου του δικτύου μπορεί να είναι αρκετά σημαντική.

Τα κανάλια, έχουν συνήθως τραπεζοειδή διατομή, όμως, με τα σύγχρονα κατασκευαστικά υλικά γίνεται ευκολότερη και η κατασκευή καμπύλων. Οι κλίσεις των πρηνών του καναλιού καθορίζονται συνήθως εμπειρικά και με βάση τα υλικά κατασκευής τους. Το ύψος και το εύρος των πρηνών καθορίζονται από τις απαιτήσεις σταθερότητας.

5.2.2.2.Σεισμικοί κίνδυνοι

Οι περιγραφές των βασικών γεωτεχνικών κινδύνων που προέρχονται από ένα σεισμό και επηρεάζουν άμεσα τα δίκτυα έχουν περιγραφεί αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα κύρια φαινόμενα, λοιπόν που μπορεί να επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δικτύων, συνεπώς και του δικτύου ύδρευσης είναι η εδαφική μετακίνηση, η κατολίσθηση, η ρευστοποίηση και η καθίζηση. Όσον αφορά τις κατολισθήσεις, εκτός από τους υπόγειους αγωγούς, επηρεάζουν τις δεξαμενές αποθήκευσης νερού, τα κανάλια και τις σήραγγες. Ακόμη και μία μικρή καθίζηση που μπορεί να προκληθεί από μία κατολίσθηση μπορεί να προκαλέσει την κατάρρευση της δεξαμενής, κυρίως αν αυτή είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα. Μία κατολίσθηση, επίσης μπορεί να προκαλέσει φράξιμο ενός ανοιχτού καναλιού, ή σοβαρή απειλή για τις σήραγγες, κυρίως στη περιοχή των στομιών τους.

5.2.2.3.Διαδικασία εκτίμησης της απόκρισης του συστήματος ύδρευσης σε σεισμό

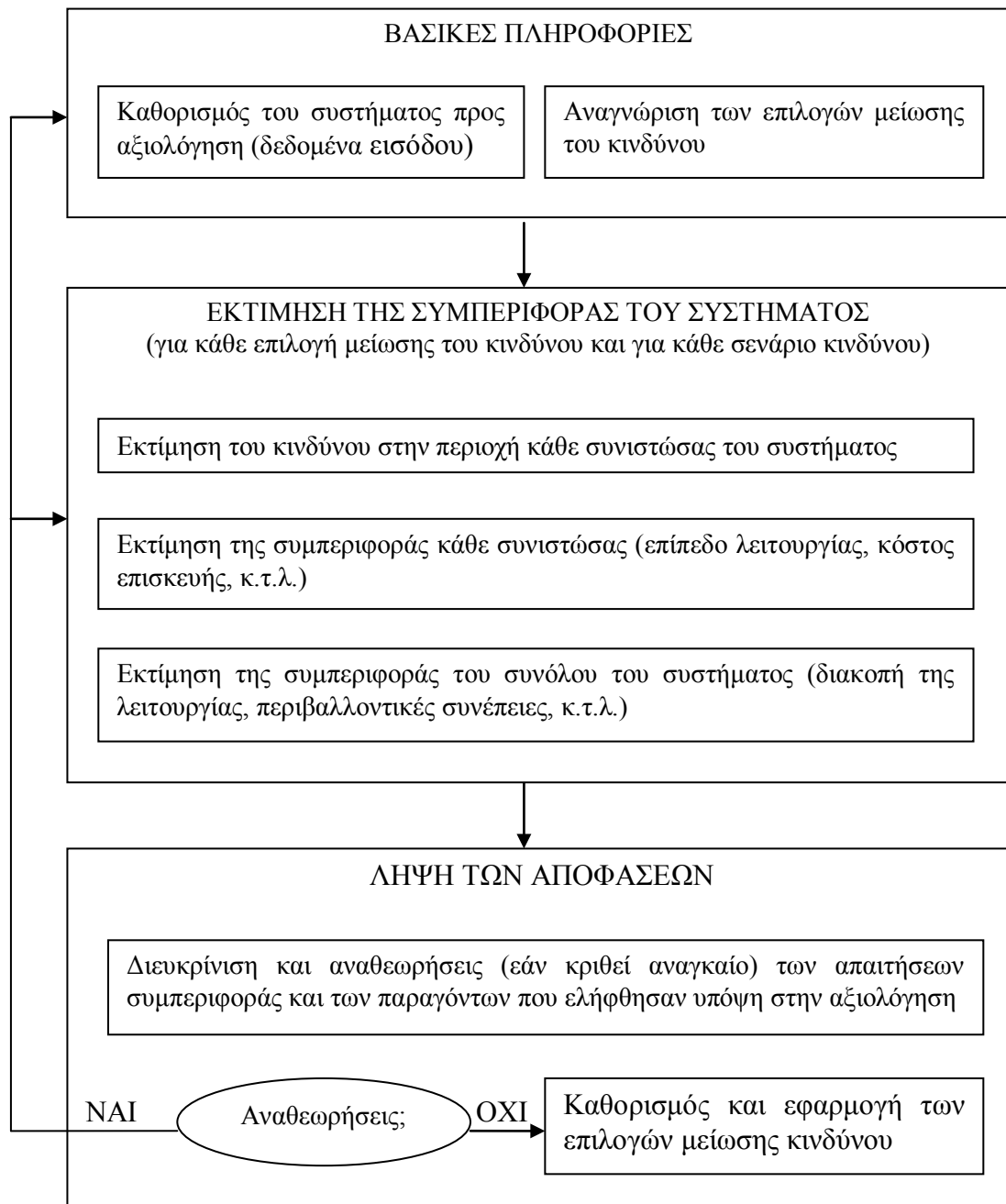
Το σχήμα 5.1 που ακολουθεί, απεικονίζει τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί από το φορέα διαχείρισης του δικτύου ύδρευσης ώστε να καθοριστούν οι παράγοντες που μπορούν να συνεισφέρουν στη μείωση του κινδύνου για αστοχία στην κατασκευή. Οι παράγοντες αυτοί, μπορεί να είναι μεμονωμένες πρωτοβουλίες, όπως η επανασχεδίαση ενός συστήματος διανομής νερού. Εναλλακτικά, η επιχείρηση στην επίσημη αξιολόγηση των συστημάτων μπορεί να θελήσει να εξετάσει ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα για την αντιμετώπιση όλου του φάσματος των φυσικών κινδύνων και να λάβει μια πρακτική απόφαση με εναλλακτικές λύσεις και χρονοδιαγράμματα για τη μείωση των κινδύνων στο σύστημα. Αυτός ο πλήρης συνδυασμός των εναλλακτικών και των χρονοδιαγραμμάτων μπορεί να συνεπάγεται πολλές και ποικίλες δραστηριότητες που αποσκοπούν στη μείωση των φυσικών κινδύνων με την πάροδο του χρόνου. Για την κατηγοριοποίηση των τύπων των κινδύνων και των εναλλακτικών λύσεων, οι φορείς διαχείρισης του δικτύου ύδρευσης θα πρέπει να εξετάσουν τα εξής:

1. Μέτρα της αρμοδιότητας του μηχανικού, όπως η μελέτη και η κατασκευή των νέων εγκαταστάσεων ή ο ανασχεδιασμός και η εκ των υστέρων εξόπλιση των υφιστάμενων εγκαταστάσεων, οι γεωτεχνικές αποκαταστάσεις, και η χρήση

των προσωρινών μέτρων αντιστήριξης. Για παράδειγμα, θα πρέπει να εξεταστούν τα εξής:

- Επίπεδα κινδύνου - ανθεκτικός σχεδιασμός κατάλληλος για τις βασικές συνιστώσες του συστήματος (για παράδειγμα το δίκτυο διανομής).
 - Ανύψωση του εξοπλισμού για να αποφευχθούν ζημιές από πιθανή πλημμύρα.
 - Καταβύθιση του εξοπλισμού, όπου δεν μπορεί να επιτευχθεί ανύψωση.
 - Αντιστήριξη του εξοπλισμού.
 - Ευέλικτες συνδέσεις των αντιστηρίξεων του εξοπλισμού με τα στοιχεία του δικτύου που υπόκεινται σε εδαφικές μετακινήσεις.
 - Εγκατάσταση αντιπλημμυρικού τοίχου για να προστατευτούν οι βασικότερες συνιστώσες του συστήματος.
 - Αντικατάσταση των παλαιότερων και περισσότερο ευπαθών αγωγών.
2. Μέτρα για τη χρήση της γης, όπως αλλαγή χωροθέτησης ή μείωση των ανοιγμάτων στα κτήρια που μπορεί να υποστούν ζημιές. Για παράδειγμα, θα πρέπει να εξεταστούν τα εξής:
- Εναλλακτική χωροθέτηση των βασικότερων συνιστωσών του συστήματος (για παράδειγμα μακριά από περιοχές που είναι επιρρεπείς σε κατολίσθηση, ή μακριά από οικίες που θα μπορούσαν να κατακλυστούν εάν υποστούν ζημιές οι αγωγοί, ή έξω από πεδιάδες που κινδυνεύουν από πλημμύρα).
 - Μείωση της έκθεσης του βασικού εξοπλισμού και του προσωπικού σε κτήρια που είναι περισσότερο ευάλωτα σε αστοχία από φυσικούς κινδύνους.
3. Ενίσχυση του συστήματος, όπως χρήση πολλαπλών οδεύσεων και κόμβων, ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι στόχοι του συστήματος επιτυγχάνονται. Για παράδειγμα, θα πρέπει να εξεταστούν τα εξής:
- Εξασφάλιση μιας σημαντικής εναλλακτικής πηγής αποθεμάτων νερού.
 - Εξασφάλιση εναλλακτικών πηγών ηλεκτρικής ενέργειας ή άλλου τύπου ενέργειας.
 - Εξασφάλιση εναλλακτικού συστήματος επικοινωνίας.
 - Εγκατάσταση βαλβίδων διακοπής της ροής σε συστήματα βαρύτητας, ή συστήματα πίεσης, ώστε να είναι δυνατή η απομόνωση τμημάτων του συστήματος που έχουν υποστεί ζημιά.
 - Προσθήκη βρόγχων παράλληλων αγωγών.
4. Απόκριση σε έκτακτες καταστάσεις, δηλαδή η άμεση απόκριση σε έκτακτες καταστάσεις συμπεριλαμβανομένων και των καταστροφών. Για παράδειγμα:
- Εξασφάλιση σχεδίου αποκατάστασης.
 - Δραστηριότητες συνεργασίας με άλλους φορείς, άμεσης ανταπόκρισης, ή φορείς βραχυπρόθεσμων προβλέψεων.
 - Εφεδρικά υλικά, προσωπικό και εξοπλισμός, που θα τοποθετηθούν σε τοποθεσίες - κλειδιά, ώστε να εξασφαλίζεται η γρήγορη απόκριση για την αποκατάσταση του συστήματος.
5. Αποκατάσταση των ζημιών, δηλαδή την μακροπρόθεσμη αποκατάσταση και ανάκτηση των κανονικών συνθηκών μετά από μία μεγάλη καταστροφή, πάλι μέσα από δραστηριότητες συνεργασίας και μέσα από στρατηγικά πλάνα.
6. «Μεταφορά» του κινδύνου, με χρήση της ασφάλισης, ή άλλες μεταφορές ευθύνης (για παράδειγμα, συμβατική μεταφορά ευθύνης με κατασκευαστές, προμηθευτές και συμβούλους) προκειμένου να περιοριστούν οι ευθύνες του φορέα διαχείρισης του δικτύου ύδρευσης και να εξασφαλιστεί η ύπαρξη κεφαλαίων για αποκατάσταση των ζημιών.

7. Οικονομική επιφύλαξη, όπως διατήρηση κεφαλαίου για την επείγουσα επέμβαση και την αποκατάσταση των ζημιών.



Σχήμα 5.1: Διαδικασία λήψης αποφάσεων για την καθιέρωση αποδεκτών απαιτήσεων συμπεριφοράς δικτύου ύδρευσης που υπόκειται σε κάποιο φυσικό κίνδυνο, American Lifelines Alliance, 2002.

Πολλαπλά επίπεδα ανάλυσης

Τα βασικά επαναληπτικά βήματα για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός δικτύου ύδρευσης σε φυσικούς κινδύνους αποτελούνται από την απογραφή των συνιστωσών του συστήματος, τον καθορισμό των σεναρίων φυσικών κινδύνων και τις φυσικές τους συνέπειες, την εκτίμηση της απόκρισης των συνιστωσών σε αυτά τα σεναρία και την εκτίμηση της απόκρισης του συνόλου του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές αστοχίες στις επιμέρους συνιστώσες (όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1).

Για την πραγματοποίηση της μελέτης θα πρέπει να γίνουν κάποιες απλοποιητικές παραδοχές, όπως:

- Το σύστημα ύδρευσης που υπόκειται στη μελέτη θα πρέπει να είναι περιορισμένο χωρικά, έτσι ώστε να ενδείκνυται η χρήση απλοποιημένων μεθόδων για φυσικούς κινδύνους όπως ο σεισμός.
- Σε κάποιες περιοχές υπάρχει μηδαμινή πιθανότητα να συμβεί κάποιο φυσικό φαινόμενο (για παράδειγμα, στην Ελλάδα δεν έχει αναφερθεί ποτέ τυφώνας).
- Το σύστημα θεωρείται γραμμικό, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν απλές μέθοδοι.
- Το σύστημα περιλαμβάνει βασικές συνιστώσες που είναι ανεπηρέαστες από κάποιου είδους φυσικούς κινδύνους (για παράδειγμα, οι υπόγειοι αγωγοί δεν κινδυνεύουν από ισχυρούς ανέμους).

Όπως και στα υπόλοιπα δίκτυα κοινής ωφελείας υπάρχουν πολλαπλά επίπεδα ανάλυσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τον σκοπό της μελέτης, τις λεπτομέρειες που απαιτούνται και άλλους παράγοντες, όπως το κόστος και ο χρόνος. Συνήθως, θεωρούνται τρία επίπεδα ανάλυσης, το προχωρημένο, το μέσο και το κατώτερο. Το κατώτερο επίπεδο ανάλυσης, που συνήθως αποτελεί την πρώτη φάση στις μελέτες, παρέχει στο μελετητή μία πρώτη επισκόπηση των σεισμικών κινδύνων που πρέπει να αντιμετωπίσει το σύστημα. Ανάλογα με τα αποτελέσματα της πρώτης αυτής φάσης, εξαρτάται αν θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση με περισσότερες λεπτομέρειες σε κάποια σημεία του δικτύου ή σε κάποιες συγκεκριμένες συνιστώσες του. Η πρώτη φάση, συνήθως περιλαμβάνει τα εξής καθήκοντα:

- συλλογή δεδομένων, όπως σχέδια, γεωλογικές μελέτες, χάρτες,
- επισκόπηση των φυσικών κινδύνων στην περιοχή μελέτης,
- επιτόπου επισκέψεις,
- προκαταρκτική μοντελοποίηση της τρωτότητας και
- περιορισμένη ανάλυση των ρίσκων, με χρήση σεναρίων.

Η χρήση πολλαπλών επιπέδων στην ανάλυση μπορεί να περιορίσει και τον όγκο των στοιχείων που θα πρέπει να απογραφούν. Το εύρος των εργασιών που απαιτείται να πραγματοποιηθούν για την εκτίμηση των επιπτώσεων των φυσικών κινδύνων στο δίκτυο ύδρευσης ποικίλλει ανάλογα με τους στόχους του φορέα διαχείρισης του συστήματος, τις διαθέσιμες πηγές, τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Για παράδειγμα, αν η ανάλυση δίνει έμφαση στα οικονομικά στοιχεία απαιτούνται μόνο εκτιμήσεις των ζημιών που αναμένονται στις διάφορες συνιστώσες του συστήματος και το κόστος αποκατάστασης των ζημιών, καθώς και τις απώλειες εσόδων. Αντίθετα, αν η μελέτη αφορά περισσότερο τη λειτουργία του δικτύου, τότε τα παραπάνω οικονομικά στοιχεία δεν απαιτούνται.

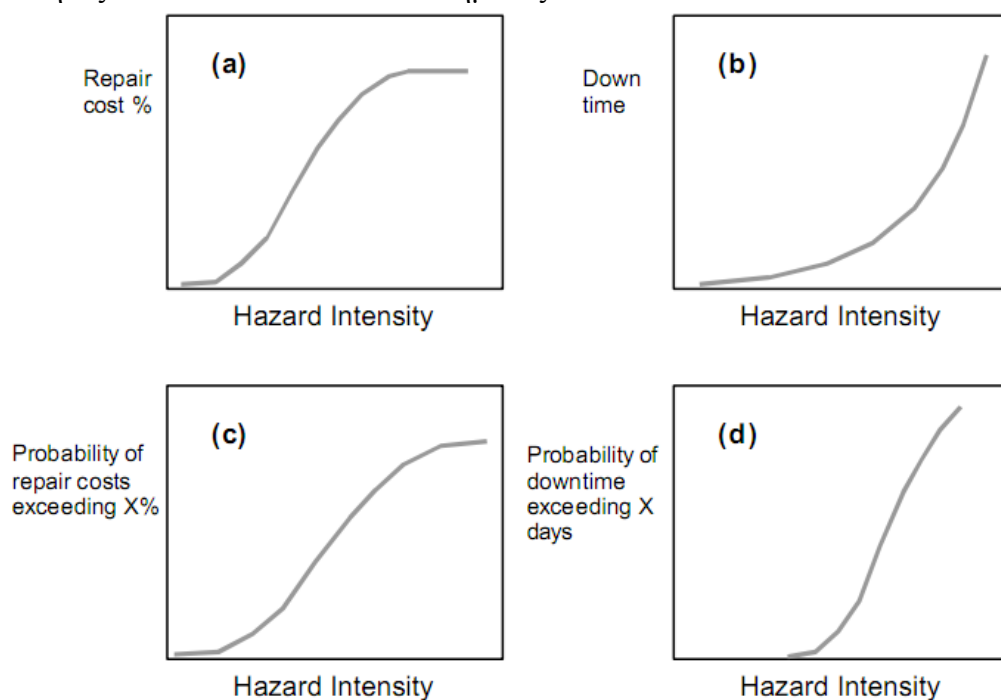
Κόστος

Στη διαδικασία λήψης των αποφάσεων για τα μέτρα μείωσης της ευπάθειας του συστήματος, το κόστος κάθε εναλλακτικής λύσης (οι αρχικές δαπάνες) είναι πολύ σημαντικό. Παρόλα αυτά, μέτρα με υψηλό προβλεπόμενο κόστος, πρέπει να αξιολογηθούν, έτσι ώστε να γίνει σύγκριση της συμπεριφοράς του συστήματος σε σχέση με το κόστος και τους χρηματικούς περιορισμούς. Η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων για τη μείωση της τρωτότητας του δικτύου χρησιμοποιεί ποσοτικές εκτιμήσεις της αποτελεσματικότητας του κόστους για κάθε μία από τις επιλογές. Όταν αυτό γίνεται σε προκαταρκτικό στάδιο, μπορεί να πραγματοποιηθεί από τον ίδιο το φορέα, ενώ για προχωρημένη ανάλυση απαιτούνται εξωτερικοί συνεργάτες. Πληροφορίες για το κόστος αντικατάστασης ή/και επισκευής για ήδη υπάρχουσες δραστηριότητες θα χρειαστούν μόνο αν είναι επιθυμητό να εκτιμηθούν οι

συνολικές χρηματικές απώλειες του συστήματος για διάφορα σενάρια ή/και για ένα αντιπροσωπευτικό σενάριο. Αυτό θα γίνει μόνο αν τα οικονομικά κριτήρια χρησιμοποιούνται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Εκτίμηση της τρωτότητας των συνιστωσών του συστήματος

Μεγάλη σημασία στην αξιολόγηση ενός συστήματος ύδρευσης έχει το πώς εκτιμώνται οι ζημιές από την άποψη της λειτουργικότητας των συνιστωσών, αλλά και από το χρόνο αποκατάστασής τους. Ο στόχος των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της τρωτότητας των συνιστωσών του δικτύου, είναι, για κάθε συνιστώσα, να υπολογιστούν α) η άμεσες οικονομικές απώλειες και β) ο χρόνος αποκατάστασης. Οι άμεσες οικονομικές απώλειες (κόστος αποκατάστασης) είναι σημαντικές για τον τελικό υπολογισμό του συνολικού κόστους επισκευής μιας δεδομένης φυσικής καταστροφής. Η εκτίμηση του χρόνου αποκατάστασης της ζημιάς είναι σημαντική για τον τελικό υπολογισμό του χρόνου φυσικής επαναλειτουργίας και για τον υπολογισμό των χρηματικών απωλειών λόγω της διαταραχής της λειτουργίας. Τα παρακάτω σχήματα a) έως d), εξηγούν τους τύπους των εξερχόμενων αποτελεσμάτων που μπορούν να προέλθουν από την εφαρμογή ενός μοντέλου τρωτότητας των συνιστωσών του συστήματος.



Σχήμα 5.2: Τύποι μοντέλων για τον υπολογισμό της τρωτότητας των στοιχείων του δικτύου ύδρευσης, American Lifelines Alliance, 2002.

Υπό κανονικές συνθήκες, τα μοντέλα υπολογισμού της τρωτότητας των συνιστωσών ενός δικτύου ύδρευσης θα προέρχονται από μία μεγάλη βάση δεδομένων, που αφορά όλους τους τύπους των συνιστωσών του συστήματος, για κάθε κίνδυνο. Τα δεδομένα, θα καθορίζουν τη στατιστική κατανομή των αστοχιών και το χρόνο αποκατάστασης και επαναλειτουργίας, για κάθε κίνδυνο. Για συνιστώσες που τοποθετήθηκαν πρόσφατα ή κινδύνους που δεν καλύπτονται από την υπάρχουσα βάση δεδομένων, τα μοντέλα θα πρέπει να επεκταθούν όπως απαιτείται και τα αποτελέσματα θα πρέπει να παρακολουθούνται με τη βοήθεια ειδικών. Για την επαλήθευση των δεδομένων θα πρέπει να πραγματοποιούνται οπτικές επιθεωρήσεις των ισχυουσών καταστάσεων. Δυστυχώς όμως, δεν υπάρχει κατάλληλη εμπειρία για σύνταξη και χρήση βάσης

δεδομένων για τις περισσότερες συνιστώσες του δικτύου ύδρευσης στην Ελλάδα. Στις περιπτώσεις όπου υπάρχει έλλειψη πειραματικών δεδομένων ή στατιστικά λάθη, η οπτική επιθεώρηση και οι μέθοδοι αξιολόγησης δεν παρέχουν επαρκή ασφάλεια, οπότε η κρίση του μελετητή παίζει σπουδαίο ρόλο.

Συνοπτικά, οι μέθοδοι για την διατύπωση μοντέλων τρωτότητας περιλαμβάνουν: α) εμπειρία, β) οπτική επιθεώρηση και αξιολόγηση, γ) αναλυτικούς υπολογισμούς, δ) πειραματικές διαδικασίες, και ε) κρίση ειδικών στο θέμα. Γενικότερα, όμως, μέχρι σήμερα, τα αποτελέσματα αυτών των πέντε τύπων μεθόδων έχουν δώσει απογοητευτικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, αλλά και για οικονομικούς λόγους, συστήνεται στους φορείς διαχείρισης του δικτύου ύδρευσης η εφαρμογή οπτικής επιθεώρησης και αξιολόγησης, συμπληρωμένη με εμπειρία και κρίση ειδικών για την εκτίμηση της τρωτότητας των αγωγών. Σε κάποιες περιπτώσεις προτείνεται η χρήση αναλυτικών μοντέλων σε συνδυασμό με περιορισμένη χρήση στατιστικής.

Ποιοτικά Μοντέλα κινδύνου

Τα ποιοτικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με την οπτική επιθεώρηση και αξιολόγηση, στις προκαταρκτικές φάσεις εκτίμησης του κινδύνου, ως μέσα για την επισκόπηση των κινδύνων, για τη λήψη αποφάσεων για το ποια φυσικά φαινόμενα επηρεάζουν το δίκτυο και ποια υλικά είναι περισσότερο ευπαθή, όπως επίσης και για το ποιες συνιστώσες του συστήματος, ή μέρη του συστήματος απαιτούν περαιτέρω αξιολόγηση. Εφόσον η σοβαρότητα και η χωρική κατανομή των φυσικών φαινομένων που μπορεί να επηρεάσουν το σύστημα υπολογιστεί, μπορεί να αποφασιστεί ποιος από τους κινδύνους είναι ο πιο καθοριστικός και για ποια από τις συνιστώσες του συστήματος. Αυτές οι συνιστώσες θα πρέπει να αξιολογηθούν από έμπειρους μηχανικούς ως προς:

- την τρωτότητα τους (χαμηλή, μέτρια, υψηλή και πολύ υψηλή) για κάθε έναν κίνδυνο που έχει καθοριστεί,
- τη σημασία της λειτουργίας τους,
- τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη ασφάλεια σε περίπτωση αστοχίας.

Οι συνιστώσες του συστήματος κατατάσσονται σε κατηγορίες σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια και αποφασίζεται αν απαιτείται περαιτέρω ανάλυση για αυτές. Με τις οπτικές έρευνες, επίσης, μπορούν να αναγνωριστούν συγκεκριμένες αδυναμίες που θα μπορούν να διορθωθούν χωρίς περαιτέρω ανάλυση.

Ανάλυση των κατασκευαστικών και μηχανικών συνιστωσών του συστήματος

Τα αναλυτικά μοντέλα για τις κατασκευαστικές, μηχανικές/ηλεκτρικές συνιστώσες του συστήματος μπορεί να είναι από πολύ απλά μέχρι πολύ σύνθετα. Εξαιτίας του κόστους και της προσπάθειας που απαιτούν, τέτοια μοντέλα χρησιμοποιούνται κυρίως μόνο για τις συνιστώσες που είναι οι πιο βασικές για τη λειτουργία του συστήματος, ή για αυτές που, από προηγούμενη ανάλυση, βρέθηκαν περισσότερο τρωτές σε κάποιο συγκεκριμένο κίνδυνο.

Απλά υπολογιστικά εγχειρίδια είναι αρκετά, σε ορισμένες περιπτώσεις, για τον υπολογισμό των δυνάμεων, επιταχύνσεων ή παραμορφώσεων που προκαλούν μηχανικές και κατασκευαστικές αστοχίες σε συγκεκριμένα μέρη του δικτύου. Οι τιμές των φορτίων θα αποκτηθούν με πολλαπλασιασμό του βάρους του εξοπλισμού με την επιτάχυνση (σε μονάδες g) για το σημείο στήριξης (για παράδειγμα τη θεμελίωση, ή το επίπεδο στο οποίο είναι στηριγμένος) υπό το επιλεγμένο σεισμικό σενάριο.

Για τα κτήρια, τους υπέργειους αγωγούς και ορισμένα μηχανικά στοιχεία έχουν αναπτυχθεί λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων. Τα λογισμικά αυτά επιτρέπουν την

ανάλυση φορτίων βαρύτητας σε συνδυασμό με θερμοκρασιακές μεταβολές, φορτία πίεσης, αδρανειακά φορτία, μετατοπίσεις στηρίξεων και άλλα. Για τη σωστή χρήση των παραπάνω, απαιτείται εξοικείωση με το πρόγραμμα. Τα εξερχόμενα στοιχεία των μοντέλων είναι συνήθως τάσεις, παραμορφώσεις, επιταχύνσεις και πολλά από τα προγράμματα που έχουν αναπτυχθεί επιτρέπουν τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα επιτρεπτά όρια που καθορίζονται από κανονισμούς. Ένας έμπειρος μηχανικός πρέπει να επανερμηνεύσει τα αποτελέσματα σε όρους ζημιών, κόστους αποκατάστασης και λειτουργικότητας. Για την αποτελεσματική χρησιμοποίηση αυτών των μοντέλων, θα πρέπει η χρήση τους να συνδυάζεται με την κρίση έμπειρων μηχανικών.

Ανάλυση των υπόγειων συνιστωσών

Τα υπόγεια στοιχεία του συστήματος είναι αγωγοί, δεξαμενές, σήραγγες, βαλβίδες, υπόγεια κτηρίων και θεμελιώσεις. Μέθοδοι ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και πεπερασμένες διαφορές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της αλληλεπίδρασης της κατασκευής με το περιβάλλον έδαφος. Μη γραμμικά προγράμματα πεπερασμένων διαφορών μεγάλων παραμορφώσεων χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιβαλλόμενων δυνάμεων και των παραμορφώσεων στις υπόγειες κατασκευές του δικτύου με την εμφάνιση φαινομένων όπως η ρευστοποίηση ή η αστάθεια πρανούς. Σε τέτοιες αναλύσεις, η συνιστώσα του δικτύου ύδρευσης (σήραγγα, δεξαμενή, κ.τ.λ.) απεικονίζεται από πεπερασμένα στοιχεία στο πλαίσιο της συνέχειας του εδάφους, της εδαφικής πίεσης και των μετατοπίσεων που έχουν υπολογιστεί. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορτία σε χωριστά, λεπτομερή μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων των επιμέρους στοιχείων του συστήματος νερού, ώστε να αξιολογηθεί η ζημιά και η πιθανή διακοπή της λειτουργίας.

Μοντέλα υπολογισμού κόστους αποκατάστασης

Οι υπολογισμοί του κόστους αποκατάστασης των ζημιών είναι πολύτιμοι για τον υπολογισμό των συνολικών απωλειών στο σύστημα. Υπάρχουν ποικίλες διαθέσιμες τεχνικές που μπορούν να υιοθετηθούν ως μοντέλα υπολογισμού του κόστους αποκατάστασης.

Μοντέλα υπολογισμού της λειτουργικότητας των στοιχείων του συστήματος

Η λειτουργικότητα μιας συνιστώσας του δικτύου ύδρευσης είναι πιθανό να έχει, σε ένα βαθμό, μία αντιστοιχία με το κόστος επισκευής. Για παράδειγμα, το κόστος αποκατάστασης μίας σύνδεσης εξόδου σε μία δεξαμενή αποθήκευσης νερού μπορεί να είναι μικρό σε σχέση με το κόστος μιας άλλης διαδικασίας αποκατάστασης, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα λειτουργικότητας. Αντίθετα, άλλες αστοχίες σε μία δεξαμενή νερού μπορεί να είναι πολυδάπανες (επιδιόρθωση οροφής), αλλά δεν έχουν επίπτωση στη λειτουργικότητά της.

Υπάρχουν μοντέλα υπολογισμού κόστους που υποθέτουν αλληλεξάρτηση, σε μεγάλο βαθμό, μεταξύ της λειτουργικότητας και του κόστους αποκατάστασης. Τέτοια μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προκαταρκτικές εκτιμήσεις της λειτουργικότητας ενός στοιχείου του συστήματος. Για περισσότερο ακριβείς και εκτενείς εκτιμήσεις της λειτουργικότητας των συνιστωσών του δικτύου, θα πρέπει να γίνουν βελτιώσεις στον ορισμό των περιγραφών των αστοχιών.

Μοντέλα υπολογισμού χρόνου αποκατάστασης

Ο υπολογισμός του χρόνου αποκατάστασης της κανονικής λειτουργίας του δικτύου είναι εξίσου σημαντικός με τον υπολογισμό της λειτουργικότητας. Τα μοντέλα

υπολογισμού του χρόνου αποκατάστασης παρέχουν βασικές πληροφορίες για το πότε το σύστημα θα είναι έτοιμο να λειτουργήσει κανονικά και το ποια μέτρα απαιτούνται για την αποφυγή μεγάλων χρόνων διακοπής της λειτουργίας των βασικότερων στοιχείων του δικτύου.

Το κόστος αποκατάστασης και οι χρόνοι διακοπής της λειτουργίας του συστήματος διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και εξαρτώνται από διαφορές στην κατασκευή, τον ρυθμό εργασίας και άλλα. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο ο φορέας διαχείρισης του συστήματος ύδρευσης να διαθέτει δεδομένα που να ανταποκρίνονται στην παρούσα κατάσταση του δικτύου, όπως:

- Κατασκευή νέων στοιχείων στο σύστημα.
- Επιδιόρθωση ή αντικατάσταση ήδη υπαρχόντων στοιχείων υπό κανονικές συνθήκες και , ορισμένες φορές.
- Επιδιόρθωση ή αντικατάσταση ήδη υπαρχόντων στοιχείων μετά από προηγούμενη αστοχία τους.

Περισσότερες σύνθετες τεχνικές απαιτούνται όπου τα απλά μοντέλα δεν μπορούν να αντιπροσωπεύσουν τις πολύπλοκες συμπεριφορές που οδηγούν σε αστοχίες, ή όπου οι κίνδυνοι είναι μεγάλοι και με σοβαρές συνέπειες. Γενικά, σε προκαταρκτικές εκτιμήσεις των χρόνων αποκατάστασης των στοιχείων του δικτύου ύδρευσης απαιτούνται μερικές απλοποιητικές παραδοχές:

- Τα αποθέματα για τις επισκευές είναι διαθέσιμα και δεν έχουν υποστεί ζημιές.
- Ικανό και εκπαιδευμένο προσωπικό είναι διαθέσιμο.
- Το προσωπικό, τα υλικά και ο εξοπλισμός για τις επισκευές, μπορούν να προσεγγίσουν το σημείο που έχει υποστεί ζημιά.
- Οι χρόνοι επιδιόρθωσης για στοιχεία που έχουν υποστεί ζημιές είναι μεγαλύτεροι ή ίσοι με τους χρόνους που θα απαιτούνταν για επιδιορθώσεις παρόμοιων στοιχείων υπό κανονικές συνθήκες.

Ένας πρακτικός τρόπος να υπολογιστεί ο χρόνος διακοπής της λειτουργίας είναι η εφαρμογή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται και κατά τη φάση κατασκευής του συστήματος. Η διαδικασία αποκατάστασης διαχωρίζεται σε πολλές φάσεις και κάθε φάση διαχωρίζεται σε έναν αριθμό καθηκόντων. Για τις επισκευές χρησιμοποιούνται μεγάλα συνεργεία και η διάρκεια κάθε επισκευής υπολογίζεται με βάση την υποθετική παραγωγικότητα των εργαζομένων. Τα αποθέματα των ανταλλακτικών, συμπεριλαμβανομένου και του εξοπλισμού πρέπει να ελέγχονται ως προς τη διαθεσιμότητα και πρέπει να ελέγχονται και τα απαιτούμενα χρονικά περιθώρια για την παραγγελία από προμηθευτές, όπου αυτό χρειάζεται. Είναι, λοιπόν, απαραίτητα ο σχεδιασμός των χρονικών περιθωρίων και οι συχνές επιθεωρήσεις.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω προσέγγιση, μπορεί να αναπτυχθεί ένα γενικό χρονοδιάγραμμα για κάθε μία από τις συνιστώσες του συστήματος ή για κάθε υποσύστημα, ώστε να υπολογίζεται ο απαιτούμενος χρόνος επιδιορθώσεων δεδομένης μιας αστοχίας από ένα φυσικό φαινόμενο. Η διαδικασία αυτή μπορεί μετά να αυτοματοποιηθεί και να ενσωματωθεί σε αλγόριθμους. Αυξήσεις στους χρόνους αποκατάστασης και στο κόστος μπορεί να απαιτηθούν εξαιτίας κάποιων χαρακτηριστικών του συστήματος. Για παράδειγμα, συνεχή φυσικά φαινόμενα, περιορισμένη πρόσβαση, εξειδικευμένα υλικά μπορεί να είναι λόγοι για αύξηση του κόστους και του χρόνου αποκατάστασης.

Αβεβαιότητες στα μοντέλα υπολογισμού της τρωτότητας των στοιχείων του συστήματος ύδρευσης

Οι αβεβαιότητες στα μοντέλα υπολογισμού της τρωτότητας των στοιχείων ενός δικτύου ύδρευσης είναι ένα σοβαρό θέμα. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιούνται

μέθοδοι οπτικής επιθεώρησης και αξιολόγησης, υπάρχει μεγάλος βαθμός αβεβαιότητας. Αντίστοιχες αβεβαιότητες προκύπτουν και από τη χρήση άλλων μεθόδων, όπως αναλυτικές, εμπειρικές, πειραματικές. Ωστόσο, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός μεταξύ των αβεβαιοτήτων στην ένταση των φυσικών κινδύνων και των αβεβαιοτήτων στην απόκριση των συνιστωσών του δικτύου σε αυτούς τους φυσικούς κινδύνους. Αυτές οι αβεβαιότητες πρέπει να παρακολουθούνται εντελώς ξεχωριστά κατά τη διαδικασία της ανάλυσης. Σε αντίθετη περίπτωση η συνολική αβεβαιότητα για τη μέθοδο θα πολλαπλασιαστεί.

Δεξαμενές αποθήκευσης νερού από χάλυβα ή σκυρόδεμα

Οι δεξαμενές από χάλυβα και σκυρόδεμα συνήθως αστοχούν εξαιτίας της εδαφικής μετακίνησης λόγω σεισμού, κατολισθήσεων πρανών, ρευστοποιήσεων, ή μεγάλων πλημμύρων. Γενικότερα, οι δεξαμενές είναι περισσότερο τρωτές στην σεισμική διέγερση όταν είναι πλήρεις, ενώ είναι περισσότερο ευπαθείς στην πλημμύρα όταν είναι ελλιπώς πλήρεις ή άδειες. Όταν σε μία περιοχή έχει αναγνωριστεί κίνδυνος ολίσθησης πρανών, το στοιχείο - κλειδί που πρέπει να μελετηθεί σε μία δεξαμενή είναι η θεμελίωση. Οι βαθιές θεμελιώσεις μπορεί να βοηθήσουν στον μετριασμό των αστοχιών λόγω ρευστοποίησης (παρόλο που οι θεμελιώσεις των δεξαμενών στηρίζουν περισσότερο την περίμετρο των δεξαμενών και λιγότερο την κεντρική περιοχή). Οι απώλειες σε μια δεξαμενή μπορεί να είναι σοβαρές και δύσκολο να προσδιοριστούν ποσοτικά όπου συμβαίνει επιφανειακή ρήξη ρήγματος και κατολισθήσεις βράχων.

- Υπέργειες δεξαμενές από χάλυβα. Οι δεξαμενές νερού είναι τρωτές σε σεισμική εδαφική διέγερση ιδιαίτερα όταν είναι πλήρεις. Κατά τη διάρκεια της διέγερσης αναπτύσσονται μεγάλες εσωτερικές δυνάμεις στην δεξαμενή εξαιτίας της κίνησης του υγρού. Οι αστοχίες στις αντιστηριζόμενες δεξαμενές περιλαμβάνουν αστοχίες στη θεμελίωση, στις στηρίξεις και στα κελύφη λόγω θλίψης. Αστοχίες στις μη αντιστηριζόμενες δεξαμενές περιλαμβάνουν ανύψωση, θλιπτικό λυγισμό, αστοχία από εφελκυσμό στα κελύφη και αστοχία στην πλάκα του βυθού. Άλλες αστοχίες που μπορεί να συμβούν είναι υποχωρήσεις κελυφών, μετακινήσεις ορόφων και ζημιές στην οροφή από τα κύματα που δημιουργούνται λόγω της διέγερσης.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι συνδέσεις των σωληνώσεων εισόδου και εξόδου, οι αγωγοί αποχέτευσης και άλλα εξαρτήματα καταστρέφονται εξαιτίας της ανύψωσης σε μη αντιστηριζόμενες δεξαμενές. Αν οι σωλήνες είναι άκαμπτοι υπάρχει πιθανότητα ρήξης, με αποτέλεσμα την απώλεια ποσότητας του περιεχομένου της δεξαμενής. Συνήθως, πραγματοποιείται οπτική έρευνα για την εκτίμηση της σχετικής κίνησης μεταξύ δεξαμενής και θεμελίωσης που μπορεί να αντέξουν οι συνδέσεις και η πιθανότητα και το εύρος της ανύψωσης μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά.

Αστοχίες στη θεμελίωση μπορεί να συμβούν λόγω κατολισθήσεων, ρευστοποίησης και επιφανειακής ρήξης ρήγματος. Στις μεγάλες δεξαμενές υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθεί μεγάλο καταστροφικό κύμα που μπορεί να δημιουργήσει σοβαρές ζημιές στις παράπλευρες κατασκευές και στους εξοπλισμούς.

- Υπέργειες δεξαμενές από σκυρόδεμα. Οι δεξαμενές αυτές είναι παρόμοιες με αυτές από χάλυβα που στηρίζονται στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά με μικρότερη τρωτότητα σε κατάρρευση των κελυφών λόγω θλίψης.
- Ανυψωμένες δεξαμενές. Στον σεισμό, οι δεξαμενές που είναι ανυψωμένες συμπεριφέρονται ως ανεστραμμένα εκκρεμή, δημιουργώντας υψηλές

ανεστραμμένες δυνάμεις στη θεμελίωση. Τα είδη των αστοχιών που εμφανίζονται σε αυτού του είδους τις δεξαμενές είναι αστοχία στις συνδέσεις, αστοχίες στη θεμελίωση κ.ά.

Τρωτότητα του μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού

- Αντιστήριξη εξοπλισμού. Ο μηχανολογικός και ηλεκτρολογικός εξοπλισμός είναι γενικότερα τρωτός στη σεισμική εδαφική διέγερση. Το στοιχείο - κλειδί που επηρεάζει την τρωτότητα αυτή είναι η αντιστήριξή τους. Η επάρκεια της αντιστήριξης τους μπορεί να εκτιμηθεί από έναν έμπειρο πολιτικό μηχανικό. Τα στοιχεία που πρέπει να εξεταστούν είναι το μέγεθος του εξοπλισμού, το βάρος του, η διαμόρφωσή του, καθώς επίσης και το είδος, το μέγεθος, η ενσωμάτωση και η εγκατάσταση της αντιστήριξής του. Αν η αντιστήριξη κριθεί ανεπαρκής, τότε ο μηχανικός θα πρέπει να ανατρέξει στους υπάρχοντες κανονισμούς για τις αντιστήριξεις, ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή και ασφαλής λειτουργία του συστήματος εξοπλισμός - αντιστήριξη.
- Διακοπή παροχής ενέργειας και επικοινωνίας. Ορισμένες φορές, ένας σεισμός μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα διαταραχές στην παροχή ενέργειας και στις επικοινωνίες. Ζημιές στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό και στον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, οι επακόλουθες συνέπειες και η διακοπή λειτουργίας του συστήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη στα μοντέλα υπολογισμού των φυσικών κινδύνων που πλήττουν το δίκτυο ύδρευσης ή να ληφθούν υπόψη στα σενάρια που εξετάζονται. Τυπικά, οι άμεσες ζημιές είναι μέτριας σημασίας, αλλά οι συνέπειες που έχει η διακοπή παροχής αυτών των υπηρεσιών στη λειτουργία ή την αποκατάσταση βλαβών στο σύστημα είναι σημαντικές, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν εφεδρικά συστήματα διαθέσιμα.

Μοντέλα υπολογισμού τρωτότητας υπόγειων αγωγών

Στην παρούσα εργασία έχει γίνει εκτενής αναφορά στο θέμα του υπολογισμού της τρωτότητας των υπόγειων αγωγών για όλα τα δίκτυα κοινής ωφελείας, συνεπώς και για το δίκτυο ύδρευσης, σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

Για τον υπολογισμό του ποσοστού επισκευών των υπόγειων αγωγών έχουν διατυπωθεί δύο ισότητες από την American Lifelines Alliance, το 2002:

$$\ln(RR) = \ln(K_1 * 0.00187 * PGV) + 1.15 * \varepsilon \quad (1)$$

$$\ln(RR) = \ln(K_2 * 1.06 * PGD^{0.319}) + 0.74 * \varepsilon \quad (2)$$

Όπου:

RR = οι επισκευές για 1000 πόδια ευθύγραμμων σωληνώσεων,

K₁, K₂ είναι συντελεστές που εξαρτώνται από παράγοντες, όπως το υλικό κατασκευής των σωλήνων, τους τύπους των αρθρώσεων, τη διαβρωτικότητα των εδαφών, ενδεικτικές τιμές των οποίων φαίνονται στον πίνακα 5.1:

Υλικό κατασκευής αγωγού	Τύπος άρθρωσης	K ₁	K ₂
χυτοσίδηρος	τσιμέντο	1.0	1.0
όλκιμος σίδηρος	λάστιχο	0.5	0.5
συγκολλημένος χάλυβας	συγκολλημένο τόξο	0.15	0.15
PVC	λάστιχο	0.5	0.8

Πίνακας 5.1: Ενδεικτικές τιμές των συντελεστών K₁, K₂, American Lifelines Alliance, 2002.

PGV (peak ground velocity): μέγιστη εδαφική ταχύτητα (σε ίντσες / δευτερόλεπτο),
PGD (peak ground deformation): μέγιστη εδαφική μετατόπιση (σε ίντσες),
ε: παράγοντας που αντιπροσωπεύει τις αβεβαιότητες και η κατανομή του έχει μέσο όρο το 0 και τυπική απόκλιση 1.

Η μέγιστη τιμή του PGV είναι 50 ίντσες το δευτερόλεπτο και η μέγιστη τιμή του PGD είναι περίπου 100 ίντσες.

Οι αβεβαιότητες στις παραπάνω ισότητες είναι πολύ μεγάλες. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε προκαταρκτικές μελέτες για την εκτίμηση της απόκρισης του δικτύου ύδρευσης σε κάποιο φυσικό κίνδυνο. Η δεύτερη ισότητα είναι πιο κατάλληλη για την εκτίμηση του ποσοστού επισκευών του δικτύου. Για πολλές εφαρμογές, μπορεί να είναι επιθυμητό να απλοποιηθούν οι παραπάνω ισότητες, εάν παραληφθούν οι αβεβαιότητες. Συγκεκριμένα, μπορεί να πάρουν την παρακάτω μορφή:

$$RR = K_1 * 0.00187 * PGV \quad (3)$$

$$RR = K_2 * 1.06 * PGD^{0.319} \quad (4)$$

Η χρήση των παραπάνω απλοποιημένων ισοτήτων θα αποδώσει τιμές ανάλογες με τη διάμετρο του ποσοστού επισκευών. Αυτές οι τιμές θα είναι σημαντικά μικρότερες από το μέσο όρο των ποσοστών επισκευών. Ως αποτέλεσμα, οι αναλύσεις που θα χρησιμοποιήσουν αυτές τις τιμές θα έχουν υποεκτιμήσει τις συνολικές αναμενόμενες απώλειες του δικτύου ύδρευσης από έναν σεισμό. Παρόλα αυτά, οι απλοποιήσεις αυτές μπορεί να έχουν εφαρμογή σε πολλές προκαταρκτικές αναλύσεις.

Για την εκτίμηση του αν ένας συγκεκριμένος αγωγός έχει υποστεί θραύση σε ένα η περισσότερα σημεία, χρησιμοποιείται στατιστική μέθοδος Poisson. Γενικά, η πιθανότητα P, n επισκευών μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της παρακάτω ισότητας:

$$P(x=n) = (RR * L)^n e^{-RR * L} / n!, \text{ όπου:}$$

N: ο αριθμός των επισκευών,

RR: το ποσοστό επισκευών για 1000 πόδια ευθύγραμμων σωληνώσεων,

L: το μήκος του αγωγού (διαιρεμένο με 1000 πόδια ευθύγραμμων σωληνώσεων).

Αυτή η ισότητα επιτρέπει σε κάποιον να εκτιμήσει εάν 0, 1, 2, ή περισσότερες επισκευές είναι αναμενόμενες για ένα συγκεκριμένο μήκος σωληνώσεων.

Αλληλεξάρτηση αστοχιών στο δίκτυο ύδρευσης με αστοχίες σε άλλες κατασκευές

Πολύ συχνά, άλλες κατασκευές, όπως οδικές ή σιδηροδρομικές γέφυρες, αποτελούν στήριξη για τους αγωγούς. Μετακινήσεις των γεφυρών μπορεί να προκαλέσουν ζημιές σε αγωγούς. Κατάρρευση της γέφυρας, σημαίνει άμεσα και καταστροφή του αγωγού. Αν η γέφυρα καταρρεύσει, θα απαιτηθούν εκτενείς και πολυδάπανες εργασίες για την τοποθέτηση προσωρινών αγωγών, ή άλλων μέσων. Η διαδικασία εκτίμησης της τρωτότητας και των πιθανών μετακινήσεων της γέφυρας απαιτεί υψηλού επιπέδου ανάλυση και εξειδίκευση. Κάτι τέτοιο μπορεί να πραγματοποιηθεί από τοπικούς φορείς, ή τους φορείς διαχείρισης του οδικού/σιδηροδρομικού δικτύου.

5.2.2.4. Εκτίμηση της τρωτότητας του συνόλου του συστήματος

Για την εκτίμηση της τρωτότητας του συστήματος, ως σύνολο, είναι απαραίτητα τα μοντέλα εκτίμησης της τρωτότητας του συστήματος. Σε αυτά τα μοντέλα, τα κυριότερα θέματα που πρέπει να απαντηθούν είναι εάν οι τελικοί κόμβοι (συνδέσεις του συστήματος, πυροσβεστικοί κρουνοί), έχουν: α) επαρκή ροή και πίεση για τη ροή πυρκαγιάς και β) επαρκή αποθέματα πόσιμου νερού που να πληρούν τις προδιαγραφές ασφαλείας.

Υπολογισμός των απωλειών του συστήματος μέσα από μοντέλα τρωτότητας

Οι απώλειες στο δίκτυο μετά από μια φυσική καταστροφή μπορούν να ερμηνευθούν με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα, μπορεί να γίνει αξιολόγηση του συστήματος ανάλογα με τον αριθμό των ζωνών που παρατηρήθηκε έλλειψη νερού σε ροή πυρκαγιάς, ή έλλειψη αποθεμάτων πόσιμου νερού και ανάλογα με τη διάρκεια αυτής της διαταραχής. Σε άλλη περίπτωση, μπορεί να απαιτείται και η αναγνώριση αυτών των ζωνών που είναι περισσότερο ευπαθείς σε τέτοιου είδους διακοπές λειτουργίας ή ελλείψεις μετά από φυσικές καταστροφές. Σε άλλη περίπτωση, μπορεί να μεταφραστούν αυτές οι διακοπές ή οι ελλείψεις σε οικονομικούς όρους και στις χρηματικές απώλειες που θα έχει ο φορέας διαχείρισης του δικτύου ύδρευσης, λόγω της μειωμένης εξυπηρέτησης των καταναλωτών και του κόστους αποκατάστασης. Σε άλλη περίπτωση, οι απώλειες στο σύστημα μπορεί να μεταφραστούν σε χρηματικές απώλειες στους ίδιους τους καταναλωτές. Για παράδειγμα, εμπορικές, βιομηχανικές ή θεσμικές δραστηριότητες, οι οποίες έχουν απαιτήσεις νερού, θα διαταραχθούν από ενδεχόμενες διακοπές ή ελλείψεις στο δίκτυο νερού. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση απαιτούνται επιχειρησιακές και οικονομικές έρευνες για να αναπτυχθούν μοντέλα υπολογισμού της απώλειας παραγωγικότητας που προκύπτει από διακοπές ή ελλείψεις στην ύδρευση.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί μακρο-οικονομικά μοντέλα που μπορούν να εκτιμήσουν το σύνολο των συνεπειών που έχουν οι πρωτοβάθμιες απώλειες στο δίκτυο ύδρευσης και οι διαταραχές/διακοπές των επιχειρησιακών δραστηριοτήτων στις τοπικές οικονομίες. Σε τέτοια μοντέλα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το πώς οι απώλειες παραγωγικότητας σε μία περιοχή μπορούν να αντισταθμιστούν με κέρδη παραγωγικότητας σε μια άλλη περιοχή, το πώς οι ιδιοκτήτες των επιχειρήσεων μπορούν να μετατοπίσουν τις επιχειρήσεις τους έτσι ώστε να επιβιώσουν και πιθανόν να ευδοκιμήσουν σε περιστάσεις που υπέστησαν αλλαγές μετά από μια φυσική καταστροφή, το πώς επιχειρήσεις όπως οι κατασκευαστικές εταιρείες μπορεί να αυξήσουν τις δραστηριότητές τους μετά από μία καταστροφή και το πώς πολλές επιχειρήσεις εξαρτώνται από άλλες που υπέφεραν από σοβαρές πρωτοβάθμιες οικονομικές απώλειες (για παράδειγμα, οι τουριστικές βιομηχανίες εξαρτώνται από το τοπικά ξενοδοχεία που μπορεί να επλήγησαν από διακοπές και ελλείψεις στην ύδρευση).

Διαδικασία ανακατασκευής

Με την πρώτη ματιά, οι κίνδυνοι που έχουν να αντιμετωπίσουν οι φορείς διαχείρισης της ύδρευσης αναμένονται αμέσως μετά από μία καταστροφή. Ωστόσο, αυτή η ματιά δεν δίνει το συνολικό ποσοστό των απωλειών που αναμένονται στο σύστημα. Κι αυτό γιατί, οι στιγμιαίες διακοπές ή διαταραχές στο δίκτυο έχουν, σπάνια, ελάχιστες συνέπειες. Αν επιθυμείται η εκτίμηση του συνολικού ποσοστού απωλειών, θα πρέπει το σύστημα να ελεγχθεί σε πολλές χρονικές περιόδους μετά το καταστροφικό γεγονός. Για παράδειγμα, μετά από ένα σοβαρό περιστατικό, μπορεί να χρειαστούν μέρες, εβδομάδες, ή ακόμα και μήνες για να αποκατασταθεί πλήρως η φυσιολογική λειτουργία του δικτύου. Το μεγαλύτερο βάρος, λοιπόν, πρέπει να δίνεται στον υπολογισμό της διάρκειας και του τύπου της διαταραχής στο δίκτυο ύδρευσης μετά από μία φυσική καταστροφή.

Η εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος σε διάφορες χρονικές περιόδους μετά από μία φυσική καταστροφή είναι πολύ πιο απαιτητική από την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος αμέσως μετά το συμβάν. Και αυτό γιατί, στις διαδικασίες αποκατάστασης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράγοντες:

- Οι χρόνοι επισκευής που απαιτούν οι διάφορες συνιστώσες του συστήματος (για παράδειγμα οι χρόνοι επισκευής μιας διαρροής, οι χρόνοι επισκευής ενός σημείου θραύσης σε έναν αγωγό, οι χρόνοι αποκατάστασης μιας μόλυνσης σε μία ζώνη).
- Η ιεράρχηση των επισκευών και των διαδικασιών αποκατάστασης (για παράδειγμα, εκτελούνται πρώτα οι εύκολες επιδιορθώσεις στα κύρια μέρη του δικτύου και αποκαθίστανται άμεσα οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, όπως νοσοκομεία κ. ά).
- Η αποτελεσματικότητα των συμφωνιών αμοιβαίας βοήθειας.
- Η διαθεσιμότητα του εξειδικευμένου προσωπικού επισκευών.
- Η λειτουργικότητα των συστημάτων επικοινωνίας.
- Η πρόσβαση σε περιοχές που απαιτούν επισκευή (οδική πρόσβαση, κ.τ.λ.).
- Η διαθεσιμότητα των ανταλλακτικών.
- Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των ζημιών και για την επισκευή τους (πώς μπορούν οι νέες τεχνολογίες να επιταχύνουν τις διαδικασίες;).
- Η αποτελεσματικότητα των προκαταρκτικών ερευνών για τις αστοχίες.
- Η επάρκεια του διαθέσιμου εξοπλισμού.
- Η χρήση συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης.
- Η συνεργασία με το δίκτυο αποχέτευσης, τα κτήρια, τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου, τις υπηρεσίες πυρόσβεσης κ.ά.
- Η απόκριση του κοινού και των μέσων ενημέρωσης.

Δεν είναι εφικτό, να καταστρωθεί ένα απλό μοντέλο υπολογισμού των αποκαταστάσεων που να λαμβάνει υπόψη όλους τους παραπάνω παράγοντες. Έτσι, το θέμα αυτό απαιτεί ακόμη έρευνα για να αποσαφηνιστεί. Όμως, υπάρχουν διάφοροι τρόποι προσέγγισης και έχουν διατυπωθεί μοντέλα εκτίμησης της διαδικασίας αποκατάστασης που περιλαμβάνουν τα εξής βήματα:

- Εκτίμηση του χρόνου αποκατάστασης των διαφόρων στοιχείων του συστήματος.
- Εκτίμηση της αναμενόμενης διαθεσιμότητας εξοπλισμού, χρημάτων και ανταλλακτικών που απαιτούνται για τις εργασίες επισκευών.
- Προκαταρκτική εκτίμηση της ιεράρχησης των εργασιών επισκευής σε περίπτωση μεγάλης φυσικής καταστροφής.
- Αξιολόγηση της συμπεριφοράς του δικτύου ύδρευσης σε σχέση και με τα άλλα δίκτυα κοινής ωφελείας.
- Εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο θα αντιμετωπιστεί πιθανή μόλυνση του νερού.

Ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για την πλήρη αποκατάσταση των αστοχιών που ενδέχεται να εντοπιστούν, περιλαμβάνει το χρόνο για την έρευνα των αστοχιών, το χρόνο της κινητοποίησης του προσωπικού επισκευών, του εξοπλισμού και των αποθεμάτων, το χρόνο που θα διαρκέσουν οι εργασίες αποκατάστασης και το χρόνο που θα χρειαστεί για την επιδιόρθωση ενδεχόμενης μόλυνσης του νερού.

5.3.Φυσικό αέριο

5.3.1.Εισαγωγή

Το δίκτυο μεταφοράς υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου παρέχει ενέργεια για τις μεταφορές, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και για παραγωγή αναγκαίων αγαθών και υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένης της θέρμανσης σπιτιών. Αυτές οι λειτουργίες είναι καθοριστικές για τη διατήρηση της υψηλής ποιότητας ζωής στις μοντέρνες κοινωνίες. Οι οικονομικές απώλειες και η κοινωνική διαταραχή που μπορεί να προκληθεί από μία διακοπή παροχής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου μπορεί να είναι ουσιαστικές, ιδιαίτερα αν προκληθούν εκτεταμένες διαταραχές στο δίκτυο που θα σημαίνουν διακοπή της απόθεσης πετρελαίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή τις βιομηχανικές και κατασκευαστικές διαδικασίες. Αυτές οι οικονομικές και κοινωνικές απώλειες από τη διακοπή της διανομής φυσικού αερίου και υγρών καυσίμων μπορεί να επηρεάσουν πελάτες που βρίσκονται αρκετά μακριά από την περιοχή που δημιουργήθηκε το πρόβλημα. Διαταραχές στο δίκτυο παροχής αερίου μπορεί να προκαλέσουν μόλυνση στον υδροφόρο ορίζοντα, έκρηξη ή πυρκαγιά. Για το λόγο αυτό, οι εταιρείες παροχής αερίου και υγρών καυσίμων είναι εξοικειωμένες με την προστασία του δικτύου από φυσικούς κινδύνους ή ανθρώπινες απειλές. Ωστόσο, ιστορικά, έχουν συμβεί σοβαρές αστοχίες στο δίκτυο από ισχυρούς σεισμούς, μεγάλες πλημμύρες ή τρομοκρατικές επιθέσεις. Ενώ, ορισμένες εταιρείες έχουν πραγματοποιήσει μεγάλα βήματα για την προστασία του δικτύου, ορισμένες άλλες έχουν πλήρη άγνοια για την έκθεση σε κινδύνους και την τρωτότητα του δικτύου.

Η μεθοδολογία για την αντιμετώπιση των αποτελεσμάτων των φυσικών κινδύνων στο δίκτυο, είναι καλά εδραιωμένη. Ωστόσο, οι διαθέσιμες πληροφορίες που θα βοηθήσουν τις εταιρείες διαχείρισης του δικτύου παροχής αερίου να καταστρώσουν σχέδιο για την αντιμετώπιση των φυσικών κινδύνων, είναι λίγες. Στις Η.Π.Α., τα τελευταία χρόνια, η American Lifelines Alliance, με τη βοήθεια της FEMA, το 2004, ανέπτυξε μία μεθοδολογία για την εκτίμηση της τρωτότητας του δικτύου παροχής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου.

Οι κατευθυντήριες γραμμές που ανέπτυξε η American Lifelines Alliance το 2004, αναφέρονται σε κινδύνους όπως σεισμός, πλημμύρες, τυφώνες, παγετός και εδαφικές μετατοπίσεις (κατολισθήσεις και καθιζήσεις). Οι κατευθυντήριες, αυτές, γραμμές δεν παρέχουν λεπτομερείς περιγραφές των διαδικασιών που ακολουθούνται, είναι όμως χρήσιμες για την κατανόηση της διαδικασίας που θα πρέπει να ακολουθηθεί. Για το λόγο αυτό, πρέπει να προσαρμόζονται στις εκάστοτε συνθήκες του συστήματος. Παρόλο που αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές αναπτύχθηκαν στις Η.Π.Α., έχουν ευρεία εφαρμογή από τις εταιρείες διαχείρισης της διανομής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου σε πολλές χώρες του κόσμου.

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας, η προσοχή θα εστιαστεί περισσότερο στη διαδικασία εκτίμησης του κινδύνου από σεισμό, η οποία όμως είναι παρεμφερής και με αυτήν που ακολουθείται σε περίπτωση πλημμύρας, κ.τ.λ..

5.3.2.Διαδικασία εκτίμησης συμπεριφοράς του συστήματος σε φυσικούς κινδύνους

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η συστηματική διαδικασία εκτίμησης της συμπεριφοράς του συστήματος αγωγών διανομής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου έναντι φυσικών και ανθρωπογενών κινδύνων. Αυτή η διαδικασία έχει

υλοποιηθεί, έχει δοκιμαστεί και έχει επικυρωθεί η αποτελεσματικότητά της από αρκετές εταιρείες διαχείρισης του συστήματος διανομής φυσικού αερίου στις Η.Π.Α.. Για την ανάπτυξη των κατευθυντήριων γραμμών, η American Lifelines Alliance, το 2004, λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενες έρευνες, διατύπωσε την διαδικασία, παρουσιάζοντας τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσουν οι εταιρείες διαχείρισης του συστήματος. Ο μοναδικός σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι να καθορίσει και να υλοποιήσει τα βήματα που απαιτούνται για να εξασφαλιστεί επαρκώς η ακεραιότητα του συστήματος αγωγών όταν συμβεί κάποια φυσική ή ανθρωπογενής καταστροφή.

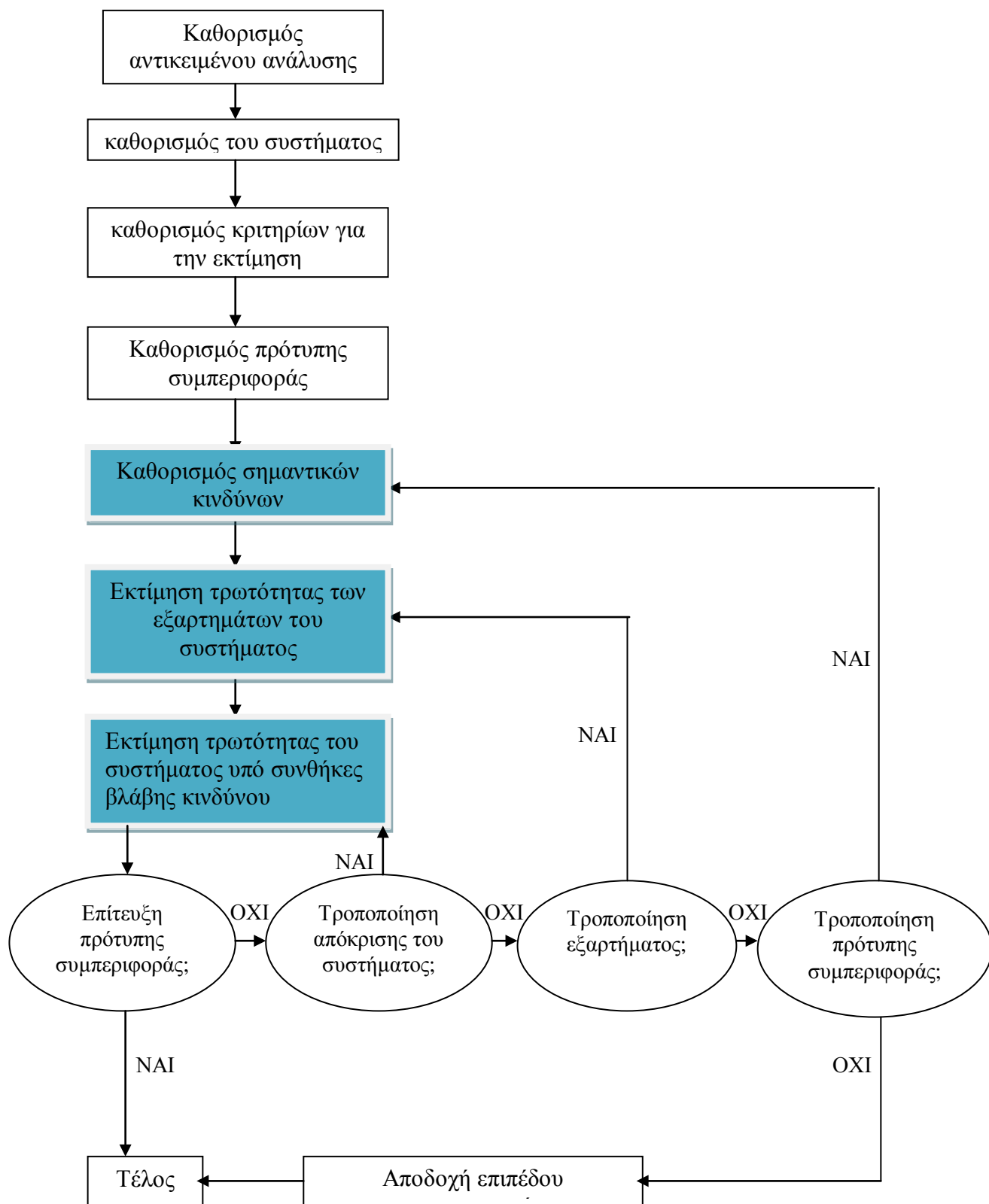
5.3.2.1. Προετοιμασία για τους φυσικούς κινδύνους

Οι επιπτώσεις ενός φυσικού κινδύνου στο σύστημα παροχής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου έχουν αποτυπωθεί χρονικά εδώ και μερικές δεκαετίες στις Η.Π.Α., κυρίως εξαιτίας των αστοχιών στα δίκτυα ζωής το 1971 από ισχυρό σεισμό στην περιοχή της California. Έκτοτε, άρχισε να δίνεται περισσότερη έμφαση στην αντισεισμική προστασία των δικτύων. Για να μετριαστούν οι ξαφνικές διαταραχές στα σύστημα διανομής που θα οδηγούσαν σε απειλές για τη δημόσια ζωή και πιθανή μόλυνση του περιβάλλοντος, οι εταιρείες που διαχειρίζονται τα δίκτυα παροχής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου άρχισαν να καταστρώνουν και να υιοθετούν στρατηγικές για να βελτιώσουν την αντοχή του συστήματος, ιδιαίτερα για τις καθοριστικές διεργασίες και για να γίνει δυνατή η άμεση αποκατάσταση τυχόν αστοχιών που θα προκληθούν λόγω μίας φυσικής καταστροφής.

Η διαδικασία για τη λήψη των αποφάσεων φαίνεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 5.3. Αυτό το διάγραμμα ροής δεν είναι μοναδικό. Αντιθέτως, απλά περιγράφει μία καλά δοκιμασμένη διαδικασία. Ξεκινάει από την αναγνώριση του αντικείμενου της έρευνας που είναι και ο βασικός λόγος για την εφαρμογή αυτής της διαδικασίας. Η έρευνα, αρχικά, θεσπίζει το μέρος του συστήματος που θα εξεταστεί (είτε ένα υποσύνολο, είτε όλο το σύστημα) και αναγνωρίζει τα κριτήρια εκτίμησης της συμπεριφοράς και την πρότυπη συμπεριφορά που επιθυμείται να εξασφαλιστεί. Για παράδειγμα, για ένα σύστημα διανομής αερίου σε μία μεγάλη αστική περιοχή, μπορεί να απαιτείται να διατηρείται ένα συγκεκριμένο ελάχιστο επίπεδο πίεσης κοντά στην περιοχή που υπάρχει άμεση πιθανότητα να εμφανιστούν ζημιές λόγω σεισμού που θα προκαλούσαν τη διακοπή της παροχής αερίου σε όλο το δίκτυο διανομής.

Η αναγνώριση των πιθανών κινδύνων, η εκτίμηση της τρωτότητας του δικτύου και η εκτίμηση της συμπεριφοράς του δικτύου είναι καθοριστικά στη διαδικασία εκτίμησης της γενικότερης απόκρισης του συστήματος. Τα τρία παραπάνω βήματα αποτελούν την ουσία των κατευθυντήριων γραμμών της American Lifelines Alliance. Τα υπόλοιπα βήματα της διαδικασίας αφορούν στα βήματα - αποφάσεις, τα οποία συγκρίνουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη συμπεριφορά του συστήματος με κάποια πρότυπη συμπεριφορά που έχει θεσπιστεί. Σύμφωνα με το σκοπό της έρευνας, είτε η απόκριση του συστήματος θα χαρακτηριστεί ικανοποιητική, είτε θα πρέπει να πραγματοποιηθούν κάποιες αλλαγές στο σύστημα ούτως ώστε να επιτευχθεί ο στόχος.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3, η έμφαση έχει δοθεί στα τρία έγχρωμα κουτιά. Τα υπόλοιπα κουτιά καθορίζουν τις αποφάσεις, τις οποίες μόνο ο εκάστοτε χρήστης μπορεί να κάνει. Για παράδειγμα, η απόφαση για το ποιο από τα στοιχεία του συστήματος θα αναλυθεί, ή ο καθορισμός της πρότυπης συμπεριφοράς που επιθυμείται, είναι καθαρά αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν από το χρήστη.



Σχήμα 5.3: Διαδικασία αποφάσεων για την εξασφάλιση της επίτευξης της πρότυπης συμπεριφοράς, American Lifelines Alliance, 2004.

Κριτήρια συμπεριφοράς του δικτύου

Η συμπεριφορά του συστήματος παροχής φυσικού αερίου κατά τη διάρκεια ενός ακραίου φαινομένου, κρίνεται σύμφωνα με ένα σύνολο επιθυμητών αποτελεσμάτων ή στόχων. Παρόλο που οι στόχοι μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με το σύστημα ή τον φυσικό κίνδυνο, τα πιο σημαντικά είναι:

- η προστασία του κοινού και ασφάλεια των εργαζομένων,
- διατήρηση της αξιοπιστίας του συστήματος,
- η αποφυγή οικονομικών απωλειών και
- η αποφυγή περιβαλλοντικής ζημιάς.

Πολλά διαφορετικά μέτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος σχετικά με τα επιθυμητά αποτελέσματα, όπως απεικονίζεται στον πίνακα 5.2. Η σύνδεση των μέτρων συμπεριφοράς με τα επιθυμητά αποτελέσματα είναι ένα σημαντικό θέμα, επειδή επηρεάζει την επιλογή των μεθόδων ποσοτικοποίησης που θα χρησιμοποιηθούν. Ορισμένα μέτρα συμπεριφοράς μπορεί να απαιτούν ειδικές μεθόδους, ενώ άλλα μπορεί να απαιτούν απλές πληροφορίες ή γνώμες ειδικών.

Στον πίνακα 5.2 αναφέρονται τα κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη, ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά του συστήματος, σε σχέση με τα άμεσα επιθυμητά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, τα ατυχήματα και η απώλεια προϊόντος είναι κριτήρια συμπεριφοράς που αναφέρονται στην επιθυμητή προστασία του κοινού και τη ασφάλεια των εργαζομένων. Με άλλα λόγια, για να υπάρχει αποτελεσματική προστασία του κοινού και των εργαζομένων, θα πρέπει ατυχήματα και απώλειες προϊόντος να αποφεύγονται. Στον πίνακα, επίσης, φαίνονται και οι έμμεσες συνέπειες από κάθε είδους ανεπιθύμητο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, μία έμμεση συνέπεια από ατυχήματα ή απώλεια προϊόντος είναι οι οικονομικές απώλειες που θα υποστούν οι εταιρείες διαχείρισης του συστήματος, λόγω των αποζημιώσεων που πρέπει να δοθούν στις οικογένειες θυμάτων, ή για αποκατάσταση περιβαλλοντικής μόλυνσης που μπορεί να έχει προκληθεί. Ως εκ τούτου, πρέπει να αναγνωριστεί ότι ορισμένες έμμεσες συνέπειες μπορεί να είναι άκρως σημαντικές, ακόμη και σημαντικότερες από άμεσες συνέπειες.

Επιθυμητά αποτελέσματα (στόχοι)	Κριτήρια συμπεριφοράς του συστήματος					
	απώλειες κεφαλαίου (\$)	απώλειες εσόδων (\$)	διακοπή παροχής υπηρεσίας (% πληθυσμού)	χρόνος διακοπής παροχής υπηρεσίας (ώρες)	ατυχήματα (θάνατοι, τραυματισμοί)	απώλεια προϊόντος
Προστασία του κοινού και ασφάλεια των εργαζομένων					×	×
Διατήρηση της αξιοπιστίας του συστήματος			×	×		
Αποφυγή χρηματικών απωλειών	×	×	×	×		
Αποφυγή περιβαλλοντικής ζημιάς						×

Πίνακας 5.2: Κριτήρια για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος, American Lifelines Alliance, 2004.

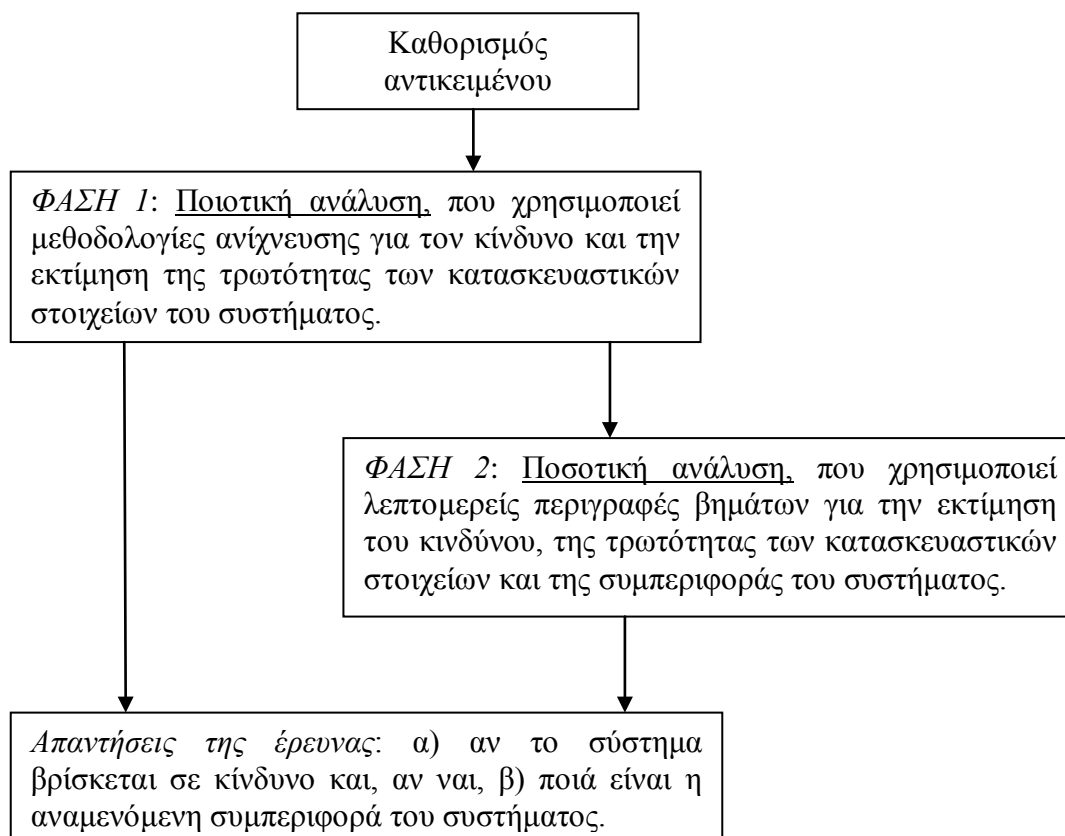
Στον πίνακα 5.3 φαίνεται ποια στοιχεία του συστήματος διανομής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση, για κάθε επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι πλέον σημαντικές συνιστώσες του συστήματος, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην εκτίμηση της συμπεριφοράς στα ζητήματα ασφαλείας, αξιοπιστίας και οικονομικών απωλειών. Εκτιμήσεις που απευθύνονται στην αποφυγή περιβαλλοντικών ζημιών, πρέπει να εστιάζουν κυρίως σε συνιστώσες του συστήματος που σχετίζονται με τον περιορισμό των υγρών υδρογονανθράκων και με τα συστήματα ελέγχου και απόκρισης σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης.

Επιθυμητά αποτελέσματα (στόχοι)	Λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση;									
	αγωγοί μεταφοράς	αντλιοστάσια	σταθμοί συμπίεσης	εγκαταστάσεις επεξεργασίας	δεξαμενές αποθήκευσης	συστήματα ελέγχου	εργασίες συντήρησης κτηρίων και εξοπλισμού	ρύθμιση πίεσης / μετρητικοί σταθμοί	αγωγοί διανομής	γραμμές υπηρέτησης ή συνδέσεις
Προστασία του κοινού και ασφάλεια των εργαζομένων	×	×	×	×	-	×	×	-	×	×
Διατήρηση της αξιοπιστίας του συστήματος	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
Αποφυγή χρηματικών απωλειών	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Αποφυγή περιβαλλοντικής ζημιάς	×	×	×	×	×	×	×	-	-	

Πίνακας 5.3: Συσχετισμός συνεπειών βλάβης με τα κατασκευαστικά στοιχεία του συστήματος, American Lifelines Alliance, 2004.

Προσέγγιση δύο φάσεων

Οι κατευθυντήριες γραμμές της American Lifelines Alliance, 2004, συνιστούν μία προσέγγιση της εκτίμησης της συμπεριφοράς του συστήματος σε δύο φάσεις. Περιληπτικά, η ανάλυση σε δύο φάσεις προβλέπει: α) μία ποιοτική εκτίμηση που καθορίζει εάν το σύστημα βρίσκεται σε σοβαρό κίνδυνο και, αν είναι απαραίτητο, β) μια πιο κατανοητή εκτίμηση που ποσοτικοποιεί τη συμπεριφορά του συστήματος. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο φάσεων.



Σχήμα 5.4: Προσέγγιση σε δύο φάσεις, όπως αναλύεται από την American Lifelines Alliance, 2004.

Το διάγραμμα ροής του παραπάνω σχήματος υποδεικνύει ότι είναι αδύνατο να φτάσεις σε μία τελική εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος μόνο την αξιολόγηση που προήλθε από την πρώτη φάση. Αυτό μπορεί να συμβεί κάτω από διαφορετικά σενάρια. Για παράδειγμα, η ακεραιότητα ενός συστήματος αγωγών μεταφοράς μπορεί να υποστεί αμφισβήτηση εξαιτίας ενός δημοσιευμένου άρθρου που αναφέρει ότι οι αγωγοί βρίσκονται σε κίνδυνο από σεισμούς, αλλά μετά την διενέργεια της πρώτης φάσης να αποδεικνύεται ότι η πιθανότητα ενός μέτριου έως μεγάλου μεγέθους σεισμού είναι εξαιρετικά μικρή για την περιοχή. Αν, με απλά λόγια, η πιθανότητα αυτή είναι μικρότερη από τα ελάχιστα αποδεκτά όρια άλλων κινδύνων (εκτός σεισμού) που μπορούν να προκαλέσουν ομοίου μεγέθους ζημιές, τότε η εκτίμηση του ρίσκου λόγω σεισμού δεν έχει μεγάλη πρακτική σημασία. Μία αυστηρή ερμηνεία του διαγράμματος ροής του σχήματος δείχνει ότι μία εκτίμηση κατά την πρώτη φάση πρέπει πάντα να προηγείται από τη δεύτερη φάση. Ενώ κάποιος θα μπορούσε να παραλείψει την πρώτη φάση, αυτό δεν συνίσταται, επειδή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα αποτελέσματα της εκτίμησης της πρώτης φάσης μπορούν να αποτελέσουν βασικές πληροφορίες για το σχεδιασμό και την εκτέλεση της δεύτερης φάσης.

Τρία επίπεδα ανάλυσης στη δεύτερη φάση

Οι κατευθυντήριες γραμμές της American Lifelines Alliance, 2004, εδραιώθηκαν με την προϋπόθεση ότι η διαδικασία εκτίμησης της συμπεριφοράς του συστήματος είναι διαδικασία σταδιακή, μία πολυεπίπεδη ακολουθία καθηκόντων, σχετικά απλή στα πρώτα επίπεδα και περισσότερο λεπτομερής όσο μεγαλώνει το επίπεδο. Τα βήματα που ακολουθούνται στα πρώτα στάδια της ανάλυσης, χρησιμοποιούνται ως μέρος της

ανάλυσης του επόμενου επιπέδου. Τα δεδομένα και οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν σε κάθε βήμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά περίπτωση στα υψηλότερα επίπεδα ανάλυσης.

Τρία επίπεδα ανάλυσης έχουν καθιερωθεί στις κατευθυντήριες γραμμές της American Lifelines Alliance, 2004. Η ιδέα της πολυεπίπεδης ανάλυσης εφαρμόζεται σε όλα τα πεδία: εκτίμηση του κινδύνου, εκτίμηση της τρωτότητας των συνιστωσών του συστήματος, εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Γενικά, η χρήση των τριών επιπέδων της ανάλυσης προωθεί την πιο αποτελεσματική χρήση των πηγών. Τα βήματα που παρατίθενται παρακάτω, παρουσιάζονται σε γενικές γραμμές.

- Επίπεδο 1: σχεδιάστηκε για να παρέχει μία προκαταρκτική εκτίμηση του κινδύνου, της τρωτότητας ή της συμπεριφοράς του συστήματος. Αυτή η ανάλυση μπορεί να ολοκληρωθεί σε χρονικό διάστημα λίγων ημερών και μπορεί να ολοκληρωθεί από βοηθητικό προσωπικό ή μηχανικούς. Τα αποτελέσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επισκόπηση της έκτασης του προβλήματος, ώστε να αποφασιστεί εάν απαιτείται περεταίρω λεπτομερής ανάλυση. Αν τα αποτελέσματα αυτού του επιπέδου δεν συναντούν τους στόχους της έρευνας, τότε απαιτείται ένα υψηλότερο επίπεδο ανάλυσης.
- Επίπεδο 2: χαρακτηρίζεται ως μία πιο ποσοτικοποιημένη ανάλυση, η οποία συχνά εξαρτάται από ιστορικές, στατιστικές πληροφορίες για την ποσοτικοποίηση του κινδύνου, της τρωτότητας και της συμπεριφοράς. Αυτό το επίπεδο ανάλυσης μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα σε λίγες εβδομάδες και μπορεί να εκτελεστεί από βοηθητικό προσωπικό και μηχανικούς, με πιθανή υποστήριξη από τεχνικούς ειδικούς. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι καλύτερη από προσεγγιστική. Εάν απαιτούνται περισσότερες λεπτομέρειες και ακρίβεια, τότε είναι σκόπιμη η εφαρμογή του επιπέδου 3 της ανάλυσης.
- Επίπεδο 3: αντιπροσωπεύει το υψηλότερο επίπεδο ανάλυσης που μπορεί να εφαρμοστεί. Είναι ποσοτικοποιημένη ανάλυση και μπορεί να παρέχει την καλύτερη ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί με τη διαθέσιμη τεχνολογία. Αυτό το επίπεδο χαρακτηρίζεται από χρήση περισσότερο ανεπτυγμένων μεθόδων και απαιτεί τη συμμετοχή τεχνικών ειδικών. Το επίπεδο 3 συχνά απαιτεί έρευνες πεδίου, εργαστηριακές δοκιμές και γενικά απαιτεί μήνες έως και έτη να ολοκληρωθεί.

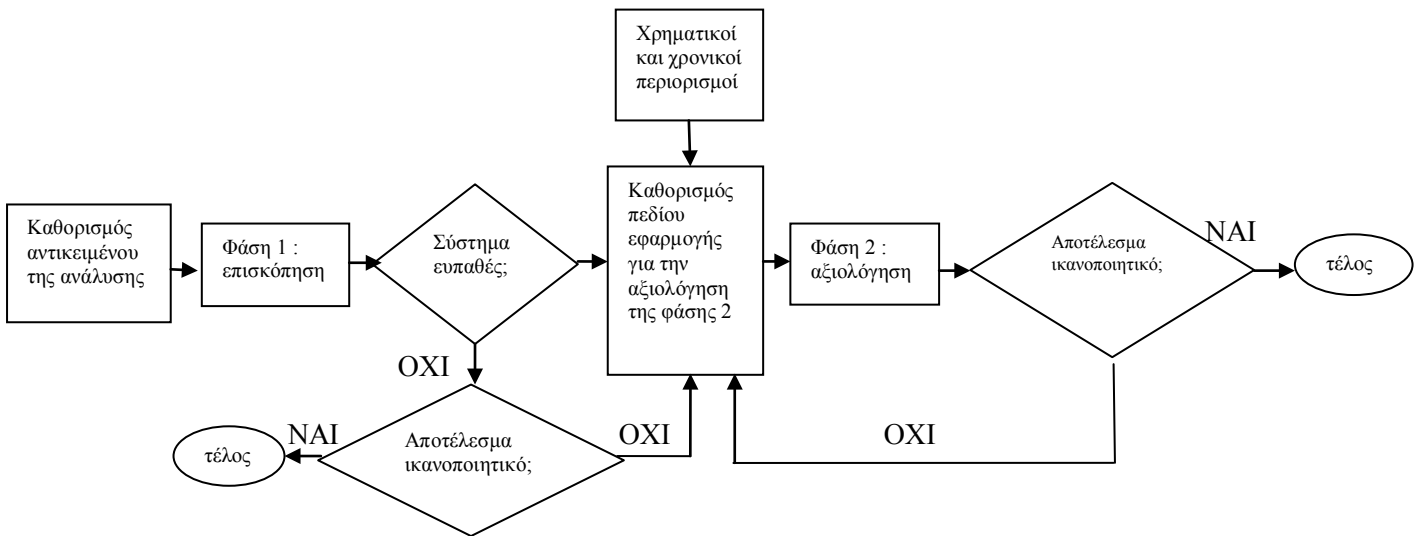
Μέθοδοι της ανάλυσης

Πρακτικά, η μέθοδος της ανάλυσης εξαρτάται από τον τύπο των δεδομένων που είναι διαθέσιμα, τα τοπικά χαρακτηριστικά, τις διαθέσιμες πηγές (προσωπικό, χρόνος, χρήματα), το υπόβαθρο και την εμπειρία του αναλυτή και την ακρίβεια που απαιτείται. Παρόλο που υπάρχει πληθώρα αναλυτικών προσεγγίσεων, οι κατευθυντήριες γραμμές της American Lifelines Alliance, 2004, δίνουν έμφαση σε αυτές που είναι πιο πρακτικές στην εφαρμογή από τις εταιρείες διαχείρισης του συστήματος διανομής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου. Η χρήση κάποιων από αυτές τις μεθόδους απαιτεί εξειδικευμένο υπόβαθρο και κατάρτιση.

«Χάρτης» για την εκτίμηση συμπεριφοράς του συστήματος

Πριν ξεκινήσει η εφαρμογή οποιασδήποτε ανάλυσης, είναι χρήσιμο να γίνει μία επισκόπηση της συνολικής διαδικασίας. Το σχήμα 5.5 παρέχει έναν «χάρτη» για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος παροχής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου. Ο χάρτης αυτός, παρουσιάζει τις βασικές φάσεις της εκτίμησης της συμπεριφοράς του συστήματος, τα σημεία όπου παίρνονται οι αποφάσεις - κλειδιά

για την επέκταση της έρευνας περεταίρω σε ένα περισσότερο λεπτομερές επίπεδο και τα σημεία επιθεώρησης του κόστους και του χρονικού περιορισμού.



Σχήμα 5.5: Βασικός «χάρτης» για τη διαδικασία εκτίμησης της συμπεριφοράς του συστήματος, American Lifelines Alliance, 2004.

Το δεύτερο βήμα του παραπάνω διαγράμματος ροής, η φάση 1, αποτελείται από δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αναφέρεται στο καθορισμό εάν υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης κάποιου επικίνδυνου φαινομένου, ή όχι. Εάν υπάρχει αυτή η πιθανότητα, στο δεύτερο στάδιο εξετάζεται εάν οι υπάρχουσες συνιστώσες του συστήματος είναι ευπαθείς σε αστοχία από τον εν λόγω κίνδυνο. Αν το αποτέλεσμα της επισκόπησης αυτής δεν υποδεικνύει κάποιον σοβαρό κίνδυνο ή κάποια σοβαρή πιθανότητα αστοχίας στο σύστημα, τότε δεν υπάρχει ανάγκη για περεταίρω ουσιαστική ανάλυση και η διαδικασία μπορεί να σταματήσει. Για παράδειγμα, δεν έχουν όλες οι περιοχές μιας χώρας πιθανότητα να πληγούν από ισχυρό σεισμό και, επομένως, δεν κινδυνεύει από αστοχία το σύστημα παροχής φυσικού αερίου στην περιοχή. Ομοίως, είναι πιθανό, μία περιοχή να κινδυνεύει από σοβαρούς τυφώνες, παρόλα αυτά, οι υπόγειοι αγωγοί δεν κινδυνεύουν από τον άνεμο με αστοχία. Αν το αποτέλεσμα της πρώτης φάσης δεν είναι ικανοποιητικό και, κρίνεται, ότι δεν έχει απαντήσει πλήρως στο αντικείμενο της ανάλυσης, τότε είναι σκόπιμο να εφαρμοστεί η ανάλυση της δεύτερης φάσης.

Αν το σύστημα αποδειχθεί ότι είναι ευπαθές σε έναν φυσικό κίνδυνο και κινδυνεύει με αστοχία ή διακοπή της λειτουργίας του, τότε είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί η ανάλυση της φάσης 2. Το πεδίο εφαρμογής της φάσης 2, πρέπει να περιέχει ένα κατάλληλο επίπεδο λεπτομερειών και να λαμβάνονται υπόψη οι χρονικοί και χρηματικοί περιορισμοί. Μετά τον καθορισμό της επιθυμητής ακρίβειας, είναι αναγκαίο να αναπτυχθεί μία λίστα που θα περιγράφει βήμα - βήμα τις εργασίες που πρέπει να γίνουν. Η δουλειά αυτή μπορεί να αποτελείται από σχετικά απλά βήματα που μπορούν να διεκπεραιωθούν από βοηθητικό προσωπικό ή μηχανικούς, μέχρι βήματα που απαιτούν συμμετοχή τεχνικών ειδικών με μεγάλη εμπειρία.

Η διαδικασία του σχήματος είναι διαδοχική. Πρακτικά, ωστόσο, μπορεί να είναι κυκλική και να απαιτεί πολλές επαναλήψεις μέχρι να επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο λεπτομερειών. Παρόλα αυτά, η βασική διαδικασία παραμένει η ίδια: α) επισκόπηση της σοβαρότητας ενός φυσικού κινδύνου και γενική εκτίμηση της

τρωτότητας του συστήματος σε αυτό τον κίνδυνο, έτσι ώστε να καθοριστεί η αναγκαιότητα για μεγαλύτερο βαθμό λεπτομερειών, β) διασφάλιση των απαραίτητων πηγών και ειδικών που θα χρειαστεί η ανάλυση και γ) καθορισμός του κατάλληλου επιπέδου λεπτομερειών που βασίζεται στο αντικείμενο της έρευνας, στους διαθέσιμες πηγές και στο διαθέσιμο χρόνο.

Στοιχεία – κλειδί για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος

Τα κυριότερα στοιχεία που απαιτούνται για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος παροχής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου, είναι η επικινδυνότητα H (hazard), η τρωτότητα V (vulnerability) και η συμπεριφορά του συστήματος S (system performance). Η επικινδυνότητα H περιλαμβάνει όλους τους φυσικούς ή ανθρωπογενείς κινδύνους, όπως σεισμό, πλημμύρα, ανεμοστρόβιλος, παγετός, κ.ά.. Η τρωτότητα V περιλαμβάνει όλες τις πιθανές υλικές ζημιές ή απώλειες ζωής, όπως αστοχίες στην λειτουργία του συστήματος, στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη ασφάλεια. Η συμπεριφορά του συστήματος S, περιλαμβάνει όλες τις συνέπειες από τις αστοχίες στο σύστημα, όπως οικονομικές απώλειες, διακοπή των λειτουργιών του συστήματος, ατυχήματα, κ.ά..

Καθένα από τα στοιχεία - κλειδιά απαιτεί μια σειρά αναλύσεων, τα αποτελέσματα των οποίων πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους ώστε να εκτιμηθεί η τελική απόκριση του συστήματος στον κίνδυνο. Σύμφωνα με την παράγραφο «τρία επίπεδα ανάλυσης στη δεύτερη φάση», υπάρχουν 3 επίπεδα ανάλυσης που μπορεί να εφαρμοστούν:

- επίπεδο 1, που είναι η απλούστερη ανάλυση,
- επίπεδο 2 που είναι μία πιο ποσοτικοποιημένη ανάλυση και
- επίπεδο 3, που είναι μια πιο εκτενής ανάλυση που απαιτεί σημαντική προσπάθεια για να ολοκληρωθεί.

Για καθένα από τα στοιχεία - κλειδιά πρέπει να αποφασιστεί ένα επίπεδο ανάλυσης. Για παράδειγμα, μπορεί να έχουμε : ανάλυση επικινδυνότητας - επίπεδο 1, ανάλυση τρωτότητας - επίπεδο 2 και ανάλυση συμπεριφοράς του συστήματος - επίπεδο 1, οπότε θα έχουμε μία ανάλυση H1- V2- S1. Το νόημα αυτής της ακολουθίας περιλαμβάνει μία απλοϊκή ανάλυση της επικινδυνότητας, μία ανάλυση με μέτριο επίπεδο λεπτομέρειας για την ευπάθεια των συνιστωσών του συστήματος και μία ποιοτική ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος. Δηλαδή, η έμφαση σε αυτό το παράδειγμα δίνεται στην τρωτότητα των συνιστωσών του συστήματος με δευτερεύουσα ανησυχία στο πώς αυτή η συμπεριφορά θα επηρεάσει τη λειτουργία του συνόλου του συστήματος. Τα διαφορετικά αντικείμενα έρευνας είναι εκείνα που μπορεί να διαφοροποιήσουν τα επίπεδα ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθούν για την επικινδυνότητα, την τρωτότητα και την συμπεριφορά του συστήματος.

5.3.2.2.Φάση 1 - Διαδικασία επισκόπησης σημαντικών κινδύνων και ευπάθειας του συστήματος

Όπως αναφέρθηκε περιληπτικά στα προηγούμενα, ο σκοπός της πρώτης φάσης είναι η αξιολόγηση της τρωτότητας των συνιστωσών του συστήματος, σε περίπτωση που:

- Δεν υπάρχουν σημαντικοί κίνδυνοι που να επηρεάζουν το σύστημα, ή
- Οι συνιστώσες, ή το σύστημα σαν σύνολο δεν είναι ευπαθείς στους κινδύνους που ενδέχεται να τα επηρεάσουν.

Εργαλεία για την εκτίμηση της επικινδυνότητας λόγω φυσικών κινδύνων

Στις κατευθυντήριες γραμμές της American Lifelines Alliance, 2004, χρησιμοποιούνται εθνικοί χάρτες των Η.Π.Α. που υποδεικνύουν το επίπεδο κινδύνου

από φυσικά φαινόμενα για κάθε περιοχή. Στον πίνακα 5.4, φαίνεται μία περίληψη των κριτηρίων τα οποία χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τον κίνδυνο από ένα φυσικό φαινόμενο ως χαμηλό, μέτριο ή υψηλό. Τα κριτήρια αυτά δεν είναι μοναδικά, αλλά δείχνουν να αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά τον κίνδυνο.

Επίπεδο κινδύνου	Σεισμός	Κατολίσθηση
χαμηλό	μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) < 0.15g	χαμηλή συχνότητα εμφάνισης
Μέτριο	$0.15g \leq PGA \leq 0.5g$	μέτρια συχνότητα, ή μέτρια ευαισθησία/ χαμηλή συχνότητα
Υψηλό	PGA > 0.5g	μεγάλη συχνότητα, ή μεγάλη ευαισθησία/μέτρια συχνότητα, ή μεγάλη ευαισθησία/χαμηλή συχνότητα

Πίνακας 5.4: Κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του επιπέδου κινδύνου, American Lifelines Alliance, 2004.

Εκτίμηση της ευπάθειας των συνιστωσών του συστήματος

Το δεύτερο στάδιο της πρώτης φάσης είναι η εκτίμηση της τρωτότητας των συνιστωσών του συστήματος. Ο πίνακας 5.5 παρέχει ποιοτικές πληροφορίες για τα σημαντικότερα στοιχεία ενός συστήματος παροχής φυσικού αερίου, που βασίζονται στην υπάρχουσα εμπειρία. Αυτός ο πίνακας αποτελεί έναν γενικό οδηγό για όλα τα στοιχεία του συστήματος, ακόμα και τα πιο επουσιώδη. Μόνο σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις, κάποια στοιχεία του συστήματος χαρακτηρίζονται περισσότερο ή λιγότερο τρωτά από ότι περιγράφει ο πίνακας. Για τα στοιχεία που είναι καθοριστικά για τη λειτουργία του συστήματος ως σύνολο, είναι περισσότερο δόκιμο, η ανάλυση να προχωρά κατευθείαν στη φάση 2.

Στον πίνακα αυτόν, μελετώνται τα στοιχεία του συστήματος που, σύμφωνα με την American Lifelines Alliance, 2004, είναι περισσότερο τρωτά στους κινδύνους. Ο κίνδυνος χαρακτηρίζεται ως υψηλός (H), μέτριος (M) ή χαμηλός (L), ενώ ορισμένες φορές αναγράφονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα στοιχείο μπορεί να είναι τρωτό. Τις περισσότερες φορές αυτό έχει να κάνει με το αν ο αγωγός είναι υπόγειος, ή βρίσκεται πάνω από την εδαφική επιφάνεια. Γενικά, τα υπόγεια στοιχεία του συστήματος τείνουν να είναι περισσότερο τρωτά σε μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις, όπως ρευστοποίηση, κατολίσθηση και καθίζηση, ενώ τα στοιχεία που βρίσκονται πάνω από την εδαφική επιφάνεια επηρεάζονται περισσότερο από την ταλάντωση του εδάφους λόγω σεισμού, από τις πλημμύρες, τον παγετό κ.ά.. Η απουσία ένδειξης σε κάποιο κελί του πίνακα υποδεικνύει ότι το συγκεκριμένο στοιχείο δεν είναι ευπαθές.

Κίνδυνοι	Επίπεδο τρωτότητας									
	Αγωγοί μεταφοράς	Αντλιοστάσια	Σταθμοί συμπίεσης	Εγκαταστάσεις επεξεργασίας	Δεξαμενές αποθήκευσης	Συστήματα ελέγχου	Εργασίες συντήρησης κτηρίων και εξοπλισμού	Ρύθμιση πίεσης / μετρητικοί σταθμοί	Αγωγοί διανομής	Γραμμές υπηρεσίας ή συνδέσεις
Εδαφική ταλάντωση λόγω σεισμού	L	M	M	M	H	M	H	L	L	M
Μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις λόγω σεισμού (ρευστοποίηση, κατολίσθηση, καθίζηση)	H	-	-	-	L	-	-	L	H (υπόγειοι αγωγοί)	M
Εδαφικές κινήσεις (κατολίσθηση, καθίζηση)	H	-	-	-	L	-	-	L	H (υπόγειοι αγωγοί)	M

Πίνακας 5.5: Οδηγίες για την αξιολόγηση της τρωτότητας των συνιστωσών του συστήματος σε φυσικούς κινδύνους (σεισμό και εδαφικές μετακινήσεις), American Lifelines Alliance, 2004.

Μετάβαση στη φάση 2

Οι λόγοι που μπορεί να επιβάλλουν τη μετάβαση στη φάση 2 της εκτίμησης συμπεριφοράς είναι πολλοί, ακόμη και αν τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης υποδεικνύουν το αντίθετο.

Κάποιοι λόγοι είναι οι εξής:

- Είναι απαραίτητη η ποσοτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έρευνας.
- Υπάρχει γνωστός κίνδυνος σε μία περιοχή, αλλά οι εθνικοί χάρτες δεν παρουσιάζουν αυτή την επικινδυνότητα.
- Ο υπό αξιολόγηση κίνδυνος είναι ανθρώπινη απειλή.
- Έχουν υπάρξει περιστατικά από τα οποία προκύπτει ότι η τρωτότητα στο σύστημα είναι μεγαλύτερη από αυτή που προτείνει ο παραπάνω πίνακας.
- Το υπό αξιολόγηση στοιχείο του συστήματος είναι εξαιρετικά ουσιώδες για τη λειτουργία όλου του συστήματος.
- Η διατήρηση της λειτουργίας του συστήματος είναι ζωτική σε εθνικό επίπεδο.

Γενικότερα, αν τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης αφήνουν αμφιβολίες ως προς το αποτέλεσμα, είναι σκόπιμη η μετάβαση στη δεύτερη φάση.

5.3.2.3.Φάση 2

Για τα στοιχεία του συστήματος που βρέθηκαν να βρίσκονται σε κίνδυνο από την επισκόπηση της πρώτης φάσης, συνίσταται η χρήση της ανάλυσης της δεύτερης φάσης. Γενικά, τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης είναι ποσοτικά. Το πλεονέκτημα σε αυτό είναι ότι μία ποσοτική εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος, μπορεί να συγκριθεί με τις αποδεκτές τιμές που έχουν θεσπιστεί για ένα σύστημα διανομής υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου. Ένα βασικό βήμα για τη ανάλυση στη φάση 2 είναι ο καθορισμός του επιπέδου των λεπτομερειών στην εκτίμηση συμπεριφοράς του συστήματος που απαιτούνται.

Αρχική επιλογή του επιπέδου ανάλυσης που βασίζεται στα κριτήρια βαθμονόμησης

Η επιλογή του κατάλληλου επιπέδου ανάλυσης για τον κίνδυνο, την τρωτότητα και τη συμπεριφορά του συστήματος (H, V, S ανάλυση), μπορεί να γίνει ακόμα και διαισθητικά από άτομα με μεγάλη εμπειρία σε τέτοιου είδους έρευνες. Σαν εναλλακτική σε αυτή την εμπειρία και τη διαίσθηση, έχει αναπτυχθεί ειδικά από την American Lifelines Alliance, 2004, μία συστηματική διαδικασία με χρήση κριτηρίων βαθμονόμησης για τον καθορισμό του επιπέδου αναφοράς της ανάλυσης. Το σύστημα βαθμονόμησης παρέχει μία συστηματική και ουσιαστική διαδικασία για τον καθορισμό ενός επιπέδου αναφοράς για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Υποθέτει ότι τα στοιχεία που βρέθηκαν να μη διατρέχουν κίνδυνο από την πρώτη φάση της ανάλυσης, δε λαμβάνονται υπόψη στη δεύτερη αυτή φάση. Το σύστημα βαθμονόμησης λαμβάνει υπόψη:

- τη σοβαρότητα του κινδύνου,
- την τρωτότητα του συστήματος ή μίας συνιστώσας αυτού,
- τις συνέπειες τις αστοχίας, δηλαδή απώλειες ζωής, χρηματικές απώλειες, διακοπή της υπηρεσίας που εξυπηρετεί το σύστημα και περιβαλλοντικές και άλλες συνέπειες και
- το μέγεθος του συστήματος.

Το πρώτο βήμα για τη διαδικασία βαθμονόμησης είναι ο υπολογισμός ενός δείκτη επιπέδου για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Ο δείκτης αυτός I_L δίνεται από τη σχέση:

$$I_L = H \times V \times \max(C_{LS}, C_{FL}, C_{SD}, C_{EI}), \text{ όπου}$$

H = βαθμολόγηση κινδύνου (χαμηλό = 1, μέτριο = 2, υψηλό = 3),

V = βαθμολόγηση τρωτότητας (χαμηλό = 1, μέτριο = 2, υψηλό = 3),

C_{LS} (life safety) = βαθμολόγηση συνεπειών στην ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής, μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 6, όπως ορίζεται στον πίνακα 5.1,

C_{FL} (financial loss) = βαθμολόγηση χρηματικών απωλειών, μπορεί να πάρει τιμές από 0,5 έως 6, όπως ορίζεται στον πίνακα 5.6,

C_{SD} (service disruption) = βαθμολόγηση συνεπειών από διακοπή της λειτουργίας του συστήματος, μπορεί να πάρει τιμές από 0,5 έως 6, όπως ορίζεται στον πίνακα 5.6,

C_{EI} (environmental impacts) = βαθμολόγηση συνεπειών στο περιβάλλον, μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 6, όπως ορίζεται στον πίνακα 5.6.

Στον πίνακα 5.6 χρησιμοποιούνται συντελεστές προσαρμογής για να τροποποιήσουν τις επιμέρους βαθμολογίες, ώστε να λαμβάνονται υπόψη ειδικές περιπτώσεις που μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μία αύξηση ή μείωση στα επακόλουθα αποτελέσματα εξαιτίας, π.χ. μίας αστοχίας σε μία συνιστώσα του συστήματος. Αντίστοιχα οι συντελεστές προσαρμογής είναι οι R_{LS} , R_S , R_{EI} .

- Συντελεστής προσαρμογής για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής R_{LS} : Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της βαθμολόγησης

των συνεπειών στην ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής C_{LS} . Ο R_{LS} παίρνει την τιμή 1 ή 2. Θα πρέπει να λαμβάνεται ίσος με 1 όταν το σύστημα παροχής φυσικού αερίου λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες. Ωστόσο, θα πρέπει να παίρνει την τιμή 2 όταν χρησιμοποιείται για συστήματα που μεταφέρουν εξαιρετικά επικίνδυνα υγρά ή αέρια σε περιοχές όπου η ασφάλεια του κοινού θα μπορούσε να απειληθεί σοβαρά από μία πιθανή διαρροή.

- Συντελεστής R_S , ο οποίος καλείται ως «συντελεστής για τον τύπο του συστήματος»: Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της βαθμολόγησης των οικονομικών απωλειών C_{FL} , αλλά και για τη βαθμολόγηση συνεπειών από διακοπή της λειτουργίας του συστήματος, C_{SD} . Ο συντελεστής αυτός θα πρέπει να λαμβάνεται ίσος με 1, εκτός αν οι συνθήκες που υπάρχουν δικαιολογούν την αναπροσαρμογή των οικονομικών απωλειών και της διακοπής της λειτουργίας του συστήματος. Για παράδειγμα, ο συντελεστής θα μπορούσε να πάρει την τιμή 2 αν επρόκειτο για την περίπτωση που δεν υπάρχουν εναλλακτικά μέσα για την παροχή φυσικού αερίου σε έναν σημαντικό πελάτη. Έτσι, ο παράγοντας C_{SD} μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την πηγή και τον τύπο της έρευνας, όπως επίσης και ανάλογα με το ποιος φορέας επιθυμεί την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στην περίπτωση του συντελεστή C_{FL} . Για παράδειγμα, οι οικονομικές απώλειες που σχετίζονται με τη διόρθωση των ζημιών μπορεί να μην είναι τόσο σημαντικές για μία εταιρεία παροχής φυσικού αερίου, σε σχέση με μία βιομηχανία που δεν έχει εναλλακτικό τρόπο πρόσβασης σε φυσικό αέριο.
- Ο συντελεστής προσαρμογής για το περιβάλλον R_{EI} : Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της βαθμολόγησης συνεπειών στο περιβάλλον, C_{EI} . Ο συντελεστής R_{EI} , μπορεί να πάρει την τιμή 1 ή 2. Πρέπει να λαμβάνεται ίσος με 1 στη γενικότερη περίπτωση των συστημάτων μεταφοράς φυσικού αερίου και στα περισσότερα συστήματα σωλήνων που μεταφέρουν υγρά. Θα πρέπει να λαμβάνεται ίσος με 2 στην ειδική περίπτωση που σωλήνες μεταφοράς υγρών βρίσκονται σε εξαιρετικά ευπαθές περιβάλλον, ή σε περιοχές με μεγαλύτερη πιθανότητα μόλυνσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

Συνέπειες	Σοβαρότητα των συνεπειών		
	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή
Ασφάλεια ανθρώπινης ζωής, CLS	Ελάχιστες συνέπειες στην ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής. Όχι σημαντικό αντίκτυπο στο προσωπικό ή το κοινό στην άμεση περιοχή της δραστηριότητας, CLS = RLS	Οι ζημιές ή η διακοπή λειτουργίας έχουν ως αποτέλεσμα σοβαρό τραυματισμό προσωπικού ή του κοινού στην άμεση περιοχή της δραστηριότητας, CLS= 2RLS	Οι ζημιές ή η διακοπή λειτουργίας έχουν πολύ σοβαρό αντίκτυπο στο προσωπικό ή το κοινό στην άμεση περιοχή της δραστηριότητας, CLS= 3RLS
Οικονομικές απώλειες, CFL	Μικρές ή ανύπαρκτες χρηματικές απώλειες στην εταιρεία διαχείρισης του συστήματος παροχής αερίου, CFL = Rs	Οι ζημιές ή η διακοπή λειτουργίας έχουν ως αποτέλεσμα σοβαρές χρηματικές απώλειες. Ωστόσο, οι απώλειες αυτές πλήττουν ελάχιστα ή καθόλου την αξιοπιστία της εταιρείας CFL= 2Rs	Οι ζημιές ή η διακοπή λειτουργίας έχουν ως αποτέλεσμα σοβαρές χρηματικές απώλειες που πλήττουν την αξιοπιστία της εταιρείας CFL= 3Rs
Διακοπή της λειτουργίας, CSD	Μικρό ή καθόλου αντίκτυπο στον πληθυσμό που εξυπηρετείται από το σύστημα, CSD = Rs	Η διακοπή λειτουργίας επηρεάζει ένα μικρό ποσοστό πληθυσμού (λιγότερο από 10%), διαρκεί το πολύ μία μέρα και δεν επηρεάζει κάποιο σημαντικό πελάτη του συστήματος, CSD = 2Rs	Η διακοπή λειτουργίας είτε 1)επηρεάζει ένα μεγάλο ποσοστό πληθυσμού (περισσότερο από 10%), ή 2)επηρεάζει πληθυσμό άνω των 100,000, ή 3)η λειτουργία διακόπτεται τουλάχιστον για μία μέρα, ή 4)επηρεάζεται μία πολύ ουσιαώδης δραστηριότητα του συστήματος, CSD = 3Rs
Περιβαλλοντικές συνέπειες, CEI	Μικρό ή καθόλου αντίκτυπο στο περιβάλλον, CEI = REI	Οι ζημιές ή η διακοπή λειτουργίας έχει ως αποτέλεσμα μικρή περιβαλλοντική ζημιά, CEI = 2REI	Οι ζημιές ή η διακοπή λειτουργίας έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη περιβαλλοντική ζημιά και θα πάρει μήνες να επανορθωθεί η ζημιά, CEI = 3REI

Πίνακας 5.6: Βαθμονόμηση συνεπειών, American Lifelines Alliance, 2004.

Το δεύτερο και τελευταίο βήμα στη διαδικασία βαθμονόμησης είναι η σύγκριση του δείκτη I_L με τα όρια που έχουν θεσπιστεί για κάθε επίπεδο αξιολόγησης. Ο δείκτης αυτός έχει εύρος από 0,5 μέχρι 54 και τα όρια για κάθε επίπεδο φαίνονται στον πίνακα 5.7.

Δείκτης I_L	Επίπεδο λεπτομερειών ανάλυσης
$I_L < 6$	καμία ανάλυση δεν απαιτείται
$7 \leq I_L \leq 17$	επίπεδο 1
$17 \leq I_L \leq 35$	επίπεδο 2
$I_L \geq 35$	επίπεδο 3

Πίνακας 5.7: Επιλογή του κατάλληλου επιπέδου ανάλυσης, American Lifelines Alliance, 2004.

Κεφάλαιο 6

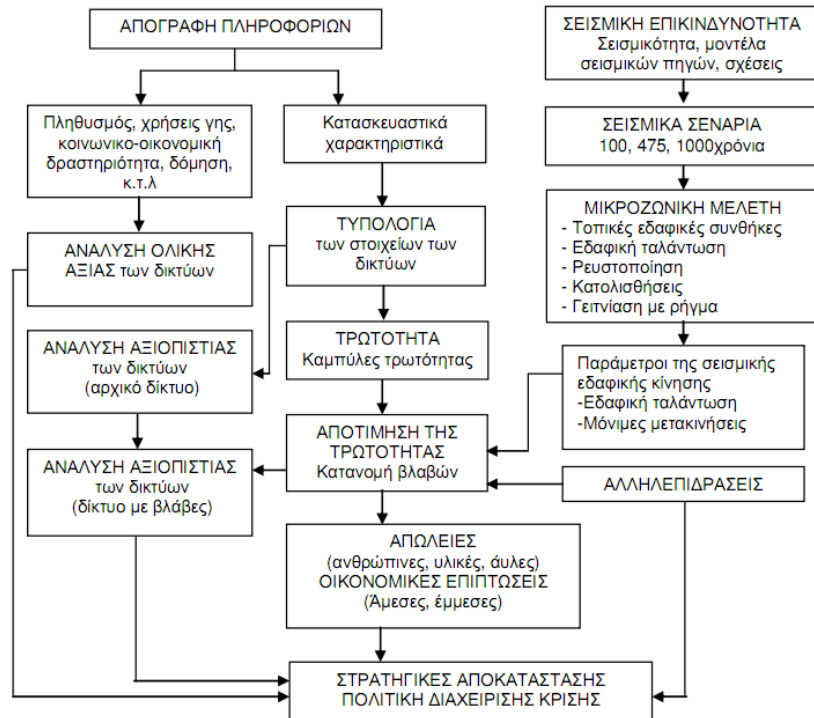
Μελέτες τρωτότητας δικτύων κοινής ωφελείας στον ελλαδικό χώρο

6.1.Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται αναφορά στις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στη χώρα μας γύρω από τα θέματα αποτίμησης τρωτότητας και διαχείρισης της σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων κοινής ωφελείας. Αρχικά περιγράφεται συνοπτικά η γενική μεθοδολογία που ακολουθείται και στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένα παραδείγματα αναλύσεων τρωτότητας που έχουν πραγματοποιηθεί στη χώρα μας. Αξίζει να τονιστεί πως οι πρωτοπόροι στα θέματα τρωτότητας δικτύων κοινής ωφελείας στην Ελλάδα είναι ο κ. Κυριαζής Πιτιλάκης και οι συνεργάτες του, οι οποίοι έχουν πραγματοποιήσει μελέτες αποτίμησης τρωτότητας όλων των δικτύων της πόλης της Θεσσαλονίκης, αλλά και άλλων, όπως της πόλης της Λευκάδας και της πόλης των Γρεβενών. Τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών παρατίθενται συνοπτικά στο παρόν κεφάλαιο.

6.2.Γενική μεθοδολογία αποτίμησης τρωτότητας και διαχείρισης σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων κοινής ωφελείας και υποδομών

Παρακάτω, παρουσιάζεται μία γενική, πολυεπίπεδη μεθοδολογία για την εκτίμηση της τρωτότητας σύμφωνα με τους Κ. Πιτιλάκη, Α. Αναστασιάδη, Σ. Αργυρούδη, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008, που βασίζεται στη μεθοδολογία SRMLIFE (2003 - 2007), το διάγραμμα της οποίας παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας SRMLIFE (2003-2007), Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008.

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Ταξινόμηση δικτύων κοινής ωφελείας και υποδομών, ανάπτυξη βάσεων δεδομένων GIS. Η ταξινόμηση και η απογραφή των επιμέρους χαρακτηριστικών των δικτύων είναι μια εξαιρετικά δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός καταλόγου με όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την ταξινόμηση και τον καθορισμό της τυπολογίας των συνιστωσών των δικτύων κοινής ωφελείας και των υποδομών. Μετά την ταξινόμηση και για ευκολότερη πρόσβαση στα στοιχεία, θα πρέπει να καταχωρηθούν τα στοιχεία σε βάσεις δεδομένων. Επίσης, θα πρέπει να γίνει χαρτογράφηση όλων των στοιχείων των δικτύων που κινδυνεύουν σε σεισμό σε ένα ενιαίο περιβάλλον γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Οι επιμέρους συνιστώσες του κάθε δικτύου είναι αυτές που καθορίζουν την τρωτότητα του δικτύου ως σύνολο. Τα χαρακτηριστικά των επιμέρους συνιστωσών είναι αυτά που χαρακτηρίζουν σε σημαντικό βαθμό το επίπεδο της σεισμικής συμπεριφοράς. Επομένως, είναι απαραίτητο βήμα ο προσδιορισμός της τυπολογίας των συνιστωσών ως προς τα τεχνικά και λοιπά χαρακτηριστικά τους. Ο καθορισμός τυπολογικών κατηγοριών για την κάθε συνιστώσα σχετίζεται άμεσα με τις καμπύλες τρωτότητας που προτείνονται σε επόμενο στάδιο της μελέτης. Γενικά, κατασκευές με παρόμοια τεχνικά και λοιπά χαρακτηριστικά, έχουν παρόμοια συμπεριφορά σε συγκεκριμένη σεισμική φόρτιση.
- Σενάρια σεισμικής επικινδυνότητας - μικροζωνική μελέτη. Για να προσδιοριστεί η τρωτότητα έναντι σεισμού σε κάποιο δίκτυο, θα πρέπει να διατυπωθούν συγκεκριμένα σεισμικά σενάρια, τα οποία να διαφέρουν αρκετά

από τον κανονισμό ως προς τις επιταχύνσεις σχεδιασμού. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, απαιτείται πρώτα η σύνταξη μικροζωνικών μελετών.

Η μικροζωνική μελέτη μιας ευρύτερης περιοχής πραγματοποιείται για διάφορες περιόδους αναφοράς Τ. Τα αντίστοιχα σεισμικά σενάρια καθορίζονται με βάση πιθανολογικές αναλύσεις της σεισμικής επικινδυνότητας. Για την εκτίμηση της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση πραγματοποιούνται για κάθε σεισμικό σενάριο μία πληθώρα αναλύσεων της εδαφικής απόκρισης, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και τις δυναμικές ιδιότητες των κύριων εδαφικών σχηματισμών που προσδιορίζονται σε όλη την έκταση της υπό μελέτη περιοχής. Για τις αναλύσεις αυτές, γίνεται χρήση διαφορετικών επιταχυνσιογραφημάτων, ανοιγμένων στις τιμές σχεδιασμού, τα οποία επιλέγονται με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης σεισμικής επικινδυνότητας και της τεκτονικής της υπό μελέτη περιοχής.

- Γεωτεχνικές ζώνες και δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών. Η σεισμική απόκριση των εδαφικών σχηματισμών και η χωρική εκτίμηση των παραμέτρων προσδιορισμού της σεισμικής τρωτότητας εξαρτώνται απολύτως από την ακρίβεια της γεωτεχνικής χαρτογράφησης και κατηγοριοποίησης. Επομένως, το στάδιο της πλήρους γεωτεχνικής χαρτογράφησης των εδαφικών σχηματισμών σε όλη την έκταση της υπό μελέτης περιοχής είναι το βασικότερο στάδιο της μικροζωνικής μελέτης.

Για την πλήρη γεωτεχνική χαρτογράφηση των εδαφικών σχηματισμών απαιτείται διενέργεια πληθώρας επιτόπου ερευνών και εργαστηριακών πειραμάτων και επεξεργασία εκατοντάδων θέσεων γεωτεχνικών πληροφοριών. Έτσι, κατασκευάζεται για την υπό μελέτη περιοχή ένα λεπτομερές μοντέλο επιφανειακής γεωλογίας, με πλήρη γνώση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών, κατάλληλα προσανατολισμένο στη μελέτη των τοπικών εδαφικών συνθηκών.

- Αναλύσεις σεισμικής απόκρισης. Για τις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης χρησιμοποιούνται κατάλληλα επιλεγμένες σεισμικές διεγέρσεις στο εκάστοτε υπόβαθρο, με χαρακτηριστικά που καλύπτουν επαρκώς την ένταση και το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού σχεδιασμού. Δημιουργούνται χάρτες με τη χωρική κατανομή της σεισμικής ταλάντωσης στην επιφάνεια του εδάφους, σε όρους μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, PGA, και ταχύτητας, PGV, για κάθε σεισμικό σενάριο. Παράλληλα, θα πρέπει να μελετηθεί και ο κίνδυνος ρευστοποίησης ή κατολίσθησης.
- Αποτίμηση της τρωτότητας. Η αποτίμηση των πιθανών αστοχιών πραγματοποιείται για όλα τα δίκτυα που ενδιαφέρουν το μελετητή με βάση τα αποτελέσματα της μικροζωνικής μελέτης για όλα τα σεισμικά σενάρια. Από τη διεθνή βιβλιογραφία επιλέγεται για κάθε συνιστώσα κάθε δικτύου η κατάλληλη συνάρτηση τρωτότητας. Οι συναρτήσεις τρωτότητας δίνουν την πιθανότητα το υπό εξέταση στοιχείο να βρίσκεται ή να έχει υπερβεί ένα δεδομένο επίπεδο βλάβης (μικρή, μέτρια, εκτεταμένη, πλήρη) υπό την επίδραση μιας σεισμικής διέγερσης συγκεκριμένης έντασης. Η επιλογή των κατάλληλων σχέσεων και καμπυλών τρωτότητας γίνεται με βάση την αξιολόγηση των διαθέσιμων μεθόδων αποτίμησης της τρωτότητας διεθνώς, σε συνδυασμό με τα τυπολογικά χαρακτηριστικά κάθε συνιστώσας του υπό εξέταση στοιχείου στην υπό μελέτη περιοχή, αλλά και τα δεδομένα αστοχιών από σεισμούς στον ελλαδικό χώρο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο και η υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν καλύπτει

ικανοποιητικά, παράγονται νέες αναλυτικές σχέσεις τρωτότητας, όπως οι Σ. Αργυρούδης, Κ. Πιτιλάκης, το 2008, που παρήγαγαν νέες αναλυτικές σχέσεις τρωτότητας για τις σήραγγες μικρού βάθους.

6.3. Παραδείγματα μελετών στον ελλαδικό χώρο

6.3.1. Δίκτυα κοινής ωφελείας μητροπολιτικής Θεσσαλονίκης, Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008

Σε αυτή τη μελέτη, έγινε χρήση της μεθοδολογίας SRMLIFE (2003-2007). Αρχικά έγινε απογραφή πληροφοριών και ταξινόμηση του δικτύου καθώς και καθορισμός της τυπολογίας των συνιστωσών του δικτύου. Ακολούθησε καταχώρηση των στοιχείων σε βάσεις δεδομένων και χαρτογράφηση όλων των εκτιθέμενων σε σεισμικό κίνδυνο στοιχείων. Η ψηφιακή βάση δεδομένων περιελάμβανε χαρακτηριστικά τοπολογικά, κατασκευαστικά, γεωμετρικά και λειτουργικά, σε περιβάλλον GIS και ενιαίο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Στην διαδικασία ορισμού κατηγοριών τυπολογίας έγινε συνεκτίμηση των ιδιαιτεροτήτων και τεχνολογικών δεδομένων που επικρατούν στον ελλαδικό χώρο, ενώ η δημιουργία λεπτομερών καταλόγων απογραφής και αντίστοιχων βάσεων δεδομένων συνέβαλε αποφασιστικά προς την κατεύθυνση αυτή. Στον πίνακα 6.1 δίνεται ως ελάχιστο παράδειγμα η τυπολογία για την περίπτωση δεξαμενών ύδρευσης. Αντίστοιχοι τυπολογικοί πίνακες δημιουργήθηκαν για όλες τις συνιστώσες του δικτύου ύδρευσης.

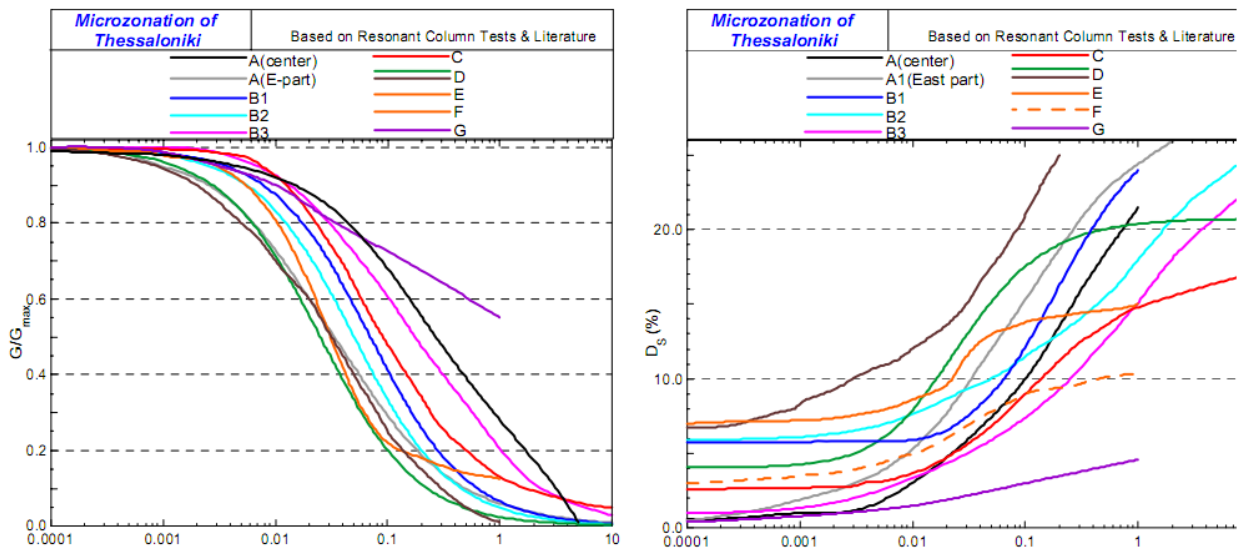
Στοιχεία	Δεξαμενές
Μεταλλικές	Οι υπερυψωμένες δεξαμενές (elevated tanks) έχουν συνήθως χωρητικότητα 7.550 – 50.000m ³ και είναι συνήθως μεταλλικές ή από σκυρόδεμα. Συχνά τις συναντούμε σε μικρές πόλεις ή αγροτικές περιοχές. Έχουν εγκάρσιους συνδέσμους για να ανθίστανται στις ανεμοπιέσεις και τα σεισμικά φορτία. Σε αρκετές περιπτώσεις έχουν σχεδιαστεί χωρίς κάποιο αντισεισμικό κανονισμό. Η χωρητικότητα των υπέργειων δεξαμενών με θεμελίωση σε γενική κοιτόστρωση ή σε πασσάλους κυμαίνεται από 750–53.000m ³ . Το είδος της οροφής τους μπορεί να είναι από ξύλο ή από μέταλλο ενώ υπάρχουν και αρκετές μεταλλικές δεξαμενές χωρίς οροφή.
Σκυρόδεμα	Γενικά στο Ευρωπαϊκό και στον Ελλαδικό χώρο οι δεξαμενές κατασκευάζονται από σκυρόδεμα (R/C) με οροφή από σκυρόδεμα. Είναι δυνατόν να είναι υπέργειες ή υπόγειες, αγκυρωμένες ή όχι. Πολλές δεξαμενές οπλισμένου σκυροδέματος έχουν υποστεί και προένταση. Στην Ελλάδα, σε αστικές ζώνες, συνήθως είναι κατασκευασμένες από σκυρόδεμα ή με προένταση με γενική κοιτόστρωση ή με πασσάλους ανάλογα με την περιοχή που βρίσκονται.
Φέρουσα τοιχοποιία	Υπάρχουν δεξαμενές που είναι κατασκευασμένες καθαρά από φέρουσα τοιχοποιία ή πολλές φορές είναι ενισχυμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Δεξαμενές τέτοιου τύπου υπάρχουν και χρησιμοποιούνται ακόμη μέχρι σήμερα από το δίκτυο ύδρευσης (π.χ δεξαμενή Ευαγγελίστριας).
Ανοικτού τύπου	Έχουν κατασκευαστεί ως εδαφικό ανάχωμα. Συνήθως είναι ανοικτές στην οροφή. Σπάνια τοποθετείται οροφή ώστε να προστατεύεται το νερό από εξωτερική μόλυνση.

Πίνακας 6.1: Τυπολογία δεξαμενών ύδρευσης, Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008.

Ακολούθησε ο καθορισμός των σεναρίων σεισμικής επικινδυνότητας και η μικροζωνική μελέτη. Η μικροζωνική μελέτη της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης πραγματοποιήθηκε για τρεις διαφορετικές μέσες περιόδους επαναφοράς $T_m=100$, 475 και 1000 έτη. Τα αντίστοιχα σεισμικά σενάρια καθορίστηκαν με βάση μια πιθανολογική ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας, ενώ χρησιμοποιήθηκαν πρόσφατα δεδομένα σχετικά με την σεισμικότητα της περιοχής, τις αντίστοιχες σεισμικές ζώνες και τα ρήγματα (SRMLIFE, 2003-2007). Για την αποτίμηση της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην σεισμική

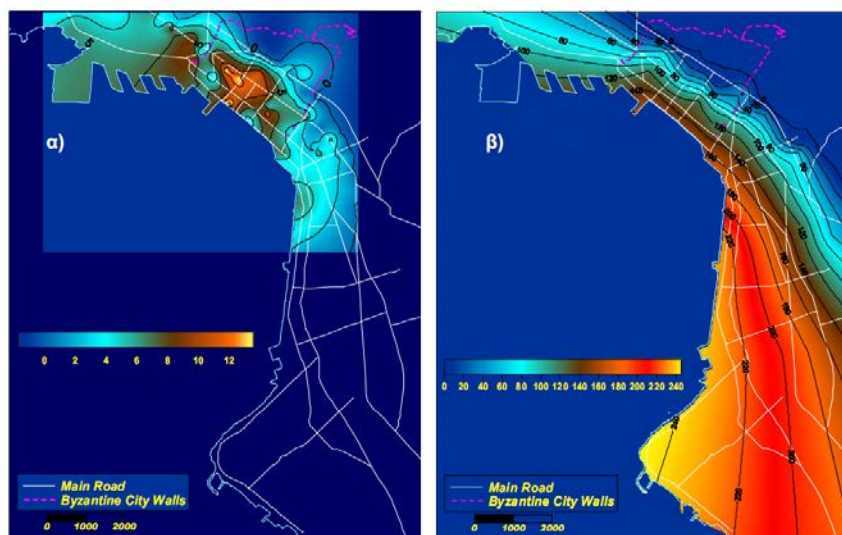
κίνηση πραγματοποιήθηκε για κάθε σενάριο πληθώρα αναλύσεων της εδαφικής απόκρισης λαμβάνοντας υπόψη τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και τις δυναμικές ιδιότητες των κύριων εδαφικών σχηματισμών που προσδιορίστηκαν για όλη την έκταση του πολεοδομικού συγκροτήματος. Για τις αναλύσεις αυτές έγινε χρήση πέντε διαφορετικών, ανοιγμένων στις τιμές σχεδιασμού, επιταχυνσιογραφημάτων (σε συνθήκες βράχου), επιλεγμένων με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης σεισμικής επικινδυνότητας και της τεκτονικής της περιοχής.

Ακολούθησε γεωτεχνική κατηγοριοποίηση και προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών της πόλης της Θεσσαλονίκης. Συνολικά εννιά (9) διαφορετικοί εδαφικοί σχηματισμοί συνθέτουν το εδαφικό υπόβαθρο της πόλης. Για όλες τις κατηγορίες εδαφών καθορίστηκαν καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης (G/G_0) και του λόγου απόσβεσης D_s - γ (σχήμα 6.2) ως αποτέλεσμα εκτεταμένων εργαστηριακών δοκιμών στήλης συντονισμού και κυκλικών τριαξονικών δοκιμών.



Σχήμα 6.2: Μέσες καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης (G/G_0) και της απόσβεσης (D_s) συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ (%) σε στρεπτική ταλάντωση από δοκιμές συντονισμού για τις κύριες εδαφικές κατηγορίες στο πολεοδομικό συγκρότημα Θεσσαλονίκης, Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008.

Οι θεματικοί χάρτες του σχήματος 6.3 απεικονίζουν την χωρική κατανομή και το πάχος των επιφανειακών επιχωματώσεων και το βάθος εμφάνισης του βραχώδους υποβάθρου. Η διακύμανση του πάχους και του βάθους όλων των σχηματισμών απεικονίζεται σε πλήθος χαρτών που συνοδεύονται από αντίστοιχους πίνακες με τις μέσες τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων και σχετικά διαγράμματα.

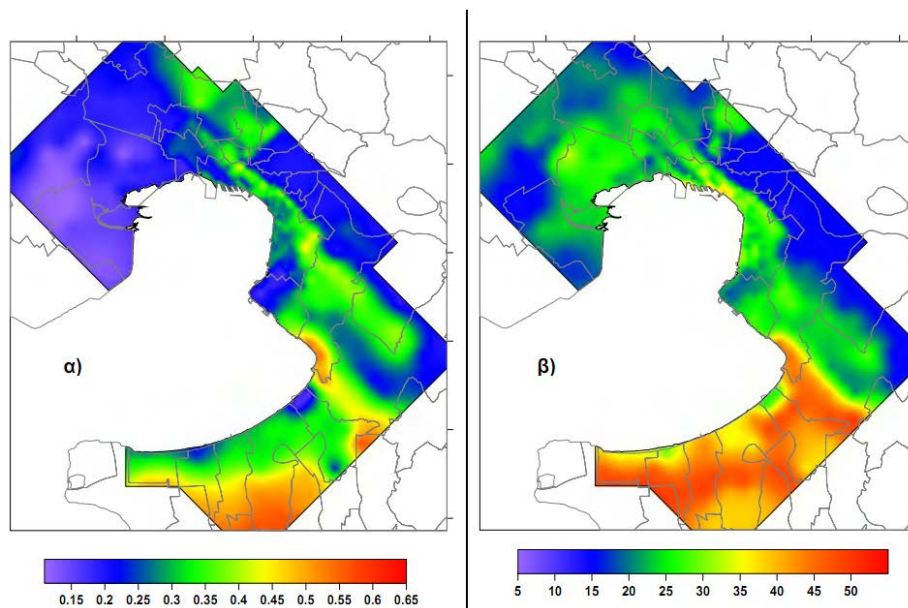


Σχήμα 6.3: Γεωτεχνικοί θεματικοί χάρτες της περιοχής Θεσσαλονίκης με καμπύλες μεταβολής του πάχους των κυρίων εδαφικών σχηματισμών (A, C, E και F και G).
 α) πάχος του σχηματισμού Α («ιστορικές» επιχωματώσεις) και
 β) βάθος εμφάνισης του βραχώδους υποβάθρου (σχηματισμός G), Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008.

Ακολούθησαν οι αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης. Συνδυάζοντας τον γεωτεχνικό χάρτη, τους θεματικούς χάρτες που περιγράφουν την χωρική κατανομή και το πάχος των εδαφικών σχηματισμών και τις λεπτομερείς δισδιάστατες εδαφοδυναμικές τομές, δημιουργήθηκαν τυπικές μονοδιάστατες εδαφοδυναμικές τομές σε 520 θέσεις σε έναν κάναβο με διαστάσεις που κυμαίνονται από 250m x 250m έως 1000m x 1000m.

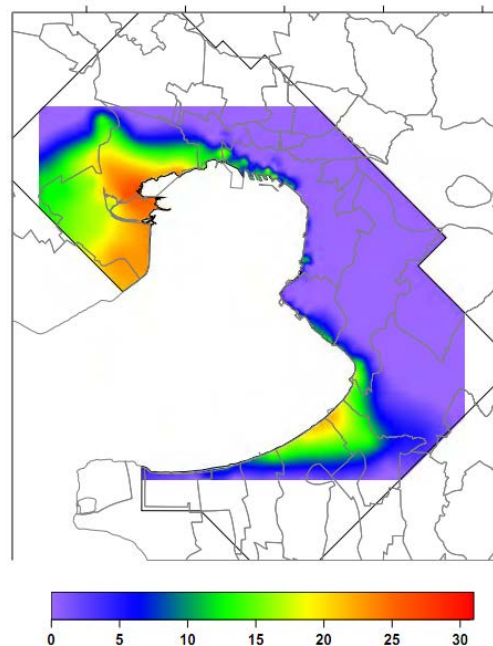
Για τις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης χρησιμοποιήθηκαν ως σεισμικές διεγέρσεις εισαγωγής στο εκάστοτε βραχώδες υπόβαθρο, καταγραφές επιταχυνσιογραφημάτων από πέντε σεισμικές διεγέρσεις, με χαρακτηριστικά που καλύπτουν ικανοποιητικά την ένταση και το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού σχεδιασμού σε συνθήκες επιφανειακής εμφάνισης βραχώδους υποβάθρου για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Τα αντίστοιχα επιταχυνσιογραφήματα χρησιμοποιήθηκαν βέβαια μετά από κατάλληλη επικλιμάκια ή υποκλιμάκια αναγωγή τους στις τιμές σχεδιασμού βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης σεισμικής επικινδυνότητας για τα τρία σενάρια (περίοδο επαναφοράς σεισμού 100, 475 και 1000 έτη).

Η χωρική κατανομή της σεισμικής ταλάντωσης στην επιφάνεια του εδάφους, σε όρους μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) και ταχύτητας (PGV), παρουσιάζονται στο σχήμα 6.4 για την περίπτωση του σεισμικού σεναρίου με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια (μέση περίοδο επαναφοράς σεισμού 475 έτη). Αντίστοιχοι χάρτες δημιουργήθηκαν για άλλες παραμέτρους της εδαφικής ταλάντωσης (PGA σε διαφορετικά βάθη, φασματικές τιμές επιτάχυνσης και ταχύτητας σε διάφορες περιόδους $T_a = 0.3s, 0.6s, 1.0s, 2.0s$, αναπτυσσόμενες διατμητικές παραμορφώσεις σε κρίσιμα βάθη, για παράδειγμα -3.0 και -6.0 μέτρα, συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης και δεσπόζουσες περίοδοι). Όλες αυτές οι παράμετροι της ισχυρής εδαφικής κίνησης προσδιορίστηκαν για τα τρία σεισμικά σενάρια.



Σχήμα 6.4: Χωρική κατανομή των μέσων τιμών α) της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA:g's) και β) της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV:cm/s)($T_m=475$ χρόνια), Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008.

Παράλληλα, μελετήθηκε ο κίνδυνος ρευστοποίησης που είναι υπαρκτός στην παραλιακή ζώνη και ειδικά στις δυτικές παράλιες περιοχές. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας προσδιορίστηκαν οι μόνιμες κατακόρυφες και οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις (καθίζηση, πλευρική εξάπλωση) λόγω ρευστοποίησης στην περιοχή της Θεσσαλονίκης για τα τρία σεισμικά σενάρια με την χρήση εμπειρικών και αναλυτικών μεθόδων. Το σχήμα 6.5 απεικονίζει την χωρική κατανομή των μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων (καθιζήσεων) για το σενάριο των 475 χρόνων.



Σχήμα 6.5: Χωρική κατανομή των μέσων τιμών της «μέγιστης» μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης (καθιζήσεις) λόγω ρευστοποίησης - Δv (cm) για το σενάριο των 475 χρόνων, Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008.

Τονίζεται ότι, οι παραπάνω παράμετροι της ισχυρής εδαφικής κίνησης είναι αναγκαίοι για την αποτίμηση των σεισμικών βλαβών καθώς οι μελέτες εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας των εκτεταμένων δικτύων με συνιστώσες διαφορετικής τυπολογίας και σπουδαιότητας, απαιτούν την χρήση χαρτών με την χωρική κατανομή διαφορετικών παραμέτρων της εδαφικής κίνησης (π.χ. PGA, PGV, PGD) για διαφορετικής έντασης σεισμικά σενάρια.

Ακολούθησε η διαδικασία αποτίμησης της τρωτότητας των δικτύων. Η αποτίμηση των πιθανών αστοχιών πραγματοποιήθηκε για τα υπό μελέτη δίκτυα και κρίσιμες υποδομές στην Θεσσαλονίκη, με βάση τα αποτελέσματα της μικροζωνικής μελέτης για τα τρία σεισμικά σενάρια με μέσες περιόδους επαναφοράς $T_m = 100, 475$ και 1000 έτη μετά την επιλογή κατάλληλων για κάθε συνιστώσα και κάθε δίκτυο σχέσεων τρωτότητας. Ο υπολογισμός του είδους και της έκτασης των βλαβών στηρίχθηκε στα διαθέσιμα τυπολογικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση στοιχείων, καθώς και σε κατάλληλες καμπύλες τρωτότητας που είναι δυνατό να προκύψουν με μεθόδους εμπειρικές, αναλυτικές ή βασισμένες στην έμπειρη κρίση ειδικών. Οι συναρτήσεις τρωτότητας δίνουν την πιθανότητα το υπό εξέταση στοιχείο να βρίσκεται ή να έχει υπερβεί ένα δεδομένο επίπεδο βλάβης κάτω από την επίδραση μιας σεισμικής διέγερσης συγκεκριμένης έντασης. Η τελευταία εκφράζεται αναλόγως του είδους της συνιστώσας με την μέγιστη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετακίνησης ή τις φασματικές τους τιμές ή ακόμη και την μόνιμη εδαφική μετακίνηση. Οι καμπύλες τρωτότητας είναι συνήθως λογαριθμοκανονικές συναρτήσεις σωρευτικής κατανομής δύο παραμέτρων (μέση τιμή και διασπορά) για κάθε επίπεδο βλάβης (Pitilakis et al., 2005).

Για την πρόταση κατάλληλων σχέσεων τρωτότητας ή την επιλογή καμπυλών τρωτότητας της διεθνούς βιβλιογραφίας, αρχικά έγινε συγκέντρωση στοιχείων σχετικών με το είδος και την έκταση των αστοχιών που παρατηρήθηκαν σε συνιστώσες των δικτύων κοινής ωφέλειας και υποδομών, ύστερα από ισχυρούς σεισμούς, προκειμένου να κατανοηθεί η απόκριση τους έναντι των σεισμών και να προσδιοριστούν τα επίπεδα βλάβης που αναμένεται να παρουσιαστούν. Στη συνέχεια, έγινε αξιολόγηση των διαθέσιμων μεθόδων αποτίμησης της τρωτότητας ανά δίκτυο, σε συνδυασμό με τα τυπολογικά χαρακτηριστικά της κάθε συνιστώσας και τα δεδομένα αστοχιών από σεισμούς του ελλαδικού χώρου, όπου αυτά υπήρχαν (π.χ. Λευκάδα). Τελικά προτάθηκαν καμπύλες τρωτότητας για κάθε συνιστώσα, είτε με υιοθέτηση υπαρχόντων σχέσεων, ύστερα από κατάλληλη προσαρμογή, είτε με ανάπτυξη νέων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτίμησης της τρωτότητας για το δίκτυο ύδρευσης. Η αποτίμηση των συνιστωσών του δικτύου, εκτός των κτηρίων, έγινε με χρήση των κορυφαίων τιμών των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης, καθώς δεν υπάρχουν σχετικές κανονιστικές διατάξεις ή προδιαγραφές. Αντίθετα, για τα κτήρια η εφαρμογή των ενεργών τιμών επιτάχυνσης συνάδει με τις σύγχρονες κανονιστικές διατάξεις αντισεισμικού σχεδιασμού. Ειδικά για τις σύνθετες συνιστώσες (π.χ. αντλιοστάσια), η χρήση κορυφαίων τιμών είναι προς την πλευρά της ασφαλείας, καθώς η τρωτότητά τους καθορίζεται από την σύνθετη απόκριση εγκαταστάσεων και κτηρίων, που σημαίνει μεγαλύτερη αβεβαιότητα.

Δίκτυο ύδρευσης

Το δίκτυο ύδρευσης της Θεσσαλονίκης αποτελείται περίπου από 1350 χλμ. αγωγών. Ο κατάλογος απογραφής που αναπτύχθηκε, περιλαμβάνει διάφορα στοιχεία όπως γεωγραφικές συντεταγμένες, διάμετρο, υλικό, ηλικία, λειτουργικό τομέα, δεξαμενή παροχής, είδος, βάθος, μήκος, είδος σύνδεσης και ιστορικό αστοχιών. Η μικροζωνική

μελέτη πραγματοποιήθηκε για τρεις διαφορετικές περιόδους επαναφοράς $T_m = 100, 475$ και 1000 χρόνια. Η αποτίμηση των αναμενόμενων βλαβών (διαρροές και/ή θραύσεις) γίνεται με βάση τον υπολογισμό του αναμενόμενου Ρυθμού Επιδιορθώσεων (Repair Rate) ανά χλμ. (RR/km). Για την αποτίμηση της τρωτότητας των αγωγών λόγω εδαφικής ταλάντωσης χρησιμοποιήθηκε η σχέση τρωτότητας των O' Rourke & Ayala (1993) που προτείνεται από το HAZUS (NIBS, 2004), στην οποία το επίπεδο της σεισμικής διέγερσης καθορίζεται από την τιμή της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV).

$$RR/km = K * (0.0001 * PGV^{2.25}), \text{ O' Rourke \& Ayala (1993),}$$

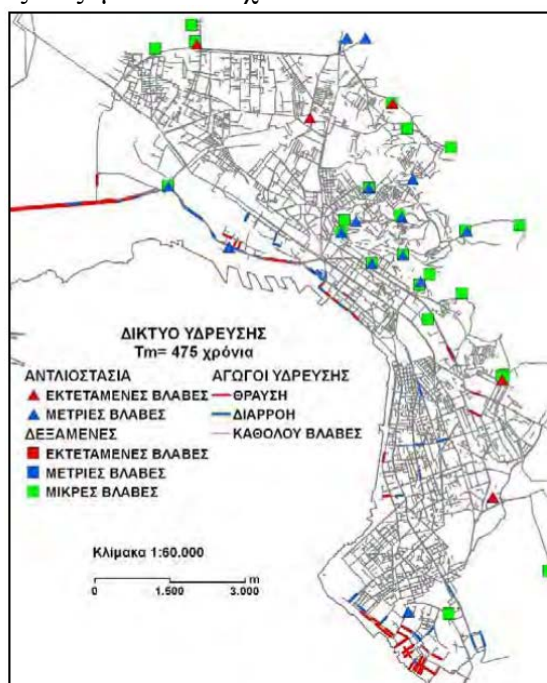
όπου PGV σε cm/sec και K συντελεστής που σχετίζεται με το υλικό του αγωγού (εύκαμπτος, άκαμπτος).

Για την αποτίμηση των αναμενόμενων βλαβών λόγω εδαφικής αστοχίας συναρτήσκει της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης (ρευστοποίησης) χρησιμοποιήθηκε η σχέση τρωτότητας των Honegger & Eguchi (1992).

$$RR/km = K * (7.821 * PGD^{0.56}), \text{ Honegger \& Eguchi (1992),}$$

όπου PGD σε m, η μέγιστη εδαφική παραμόρφωση και K συντελεστής που σχετίζεται με το υλικό του αγωγού.

Ο έλεγχος, η αξιολόγηση και τελικά η επιλογή των παραπάνω εμπειρικών σχέσεων τρωτότητας πραγματοποιήθηκε με βάση τεκμηριωμένα στοιχεία βλαβών από πρόσφατους σεισμούς στην Λευκάδα το 2003 και στην Duzce-Τουρκία το 1999. Η αποτίμηση της τρωτότητας για τις δεξαμενές και τα αντλιοστάσια πραγματοποιήθηκε με χρήση κατάλληλων καμπυλών τρωτότητας με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση στοιχείων. Το σχήμα 6.6 παρουσιάζει την χωρική κατανομή και την έκταση των εκτιμώμενων βλαβών για το σενάριο των 475 χρόνων. Ο αριθμός, η έκταση και η θέση των βλαβών, σχετίζονται με την χωρική κατανομή της σεισμικής διέγερσης για το συγκεκριμένο σενάριο, καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων στοιχείων.



Σχήμα 6.6: Χάρτης αποτελεσμάτων αποτίμησης της τρωτότητας και κατανομή βλαβών για το δίκτυο ύδρευσης της Θεσσαλονίκης ($T_m=475$ χρόνια) (Alexoudi et al, 2007), Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008.

6.3.2. Δίκτυο ύδρευσης Δήμου Θερμαϊκού Θεσσαλονίκης, Μ. Αλεξούδη, Ε. Ρήγα, Κ. Πιτιλάκης, 2008

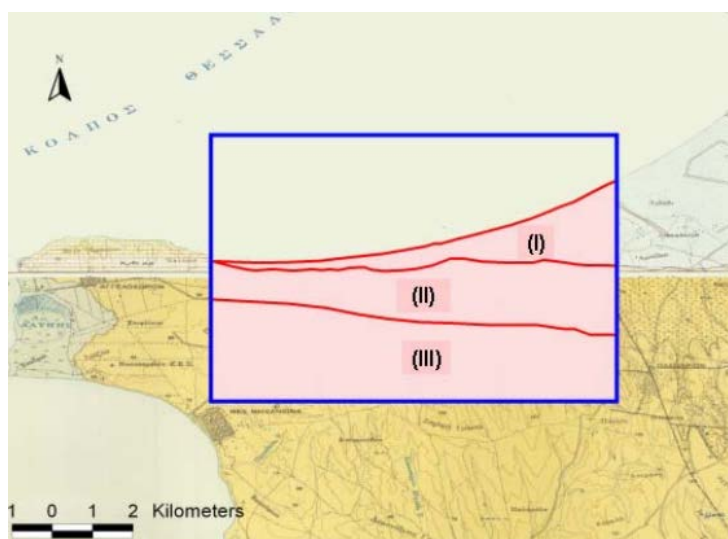
Σε αυτή τη μελέτη, επίσης, έγινε χρήση της μεθοδολογίας SRMLIFE (2003-2007).

Περιγραφή – τυπολογία

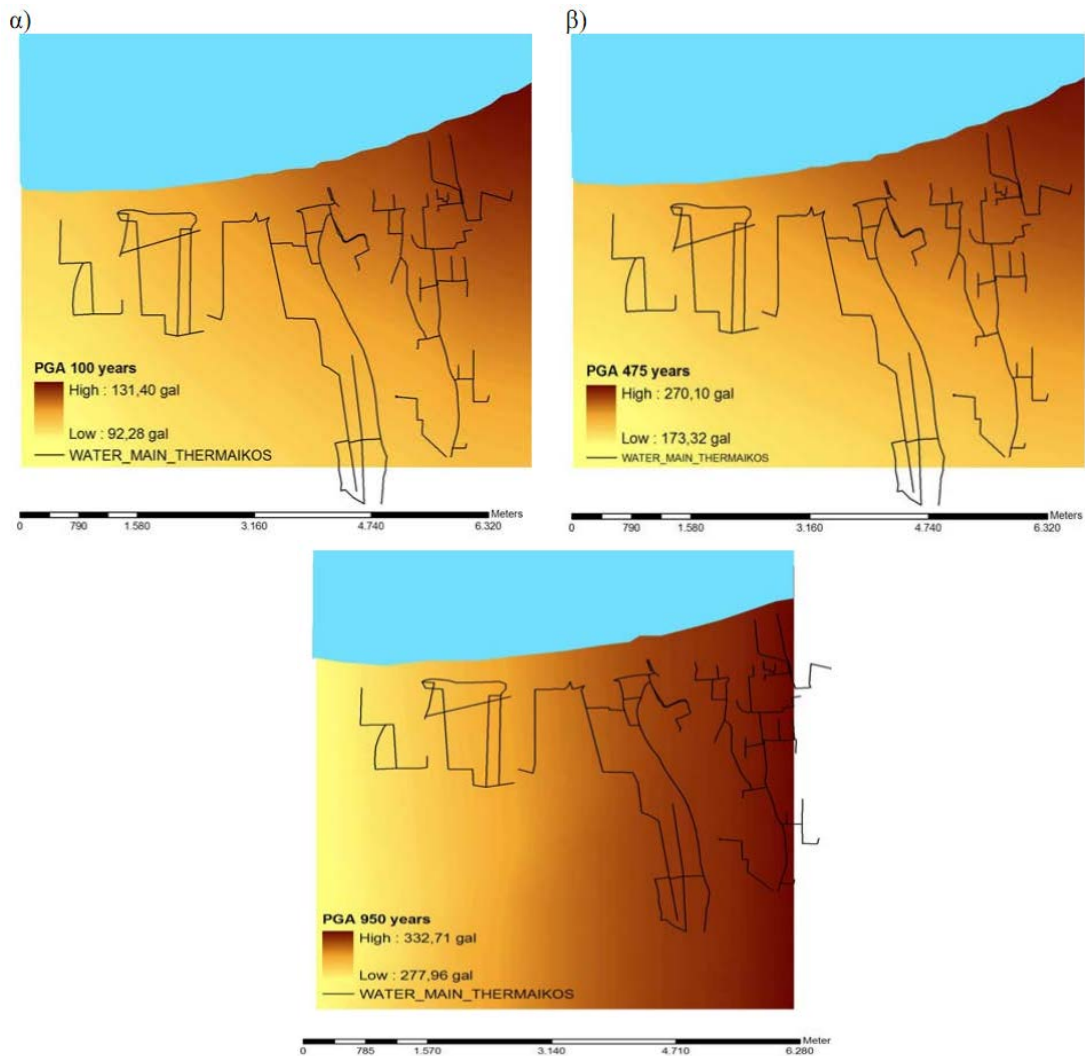
Το δίκτυο ύδρευσης του Δήμου Θερμαϊκού είναι ένα αυτόνομο δίκτυο μήκους 602,88 χλμ. που αποτελείται από 20 υδρογεωτρήσεις, 12 δεξαμενές και από το εξωτερικό και εσωτερικό δίκτυο αγωγών. Η ηλικία του δικτύου κυμαίνεται από 5-15 χρόνια, μπορεί δηλαδή να χαρακτηριστεί ως νέο δίκτυο, καθότι οι συγκεκριμένες περιοχές άρχισαν πρόσφατα να αναπτύσσονται. Είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι τέσσερις από τις υδρογεωτρήσεις δεν λειτουργούν ακόμη αλλά προβλέπεται να λειτουργήσουν εντός της επόμενης πενταετίας. Η τυπολογία των αγωγών εξαρτάται κυρίως από το υλικό τους και το είδος σύνδεσής τους. Οι αγωγοί της περιοχής είναι τοποθετημένοι σε βάθος 2m, είναι κατασκευασμένοι από PVC, με εύκαμπτους συνδέσμους, ενώ οι διάμετροι του εσωτερικού δικτύου κυμαίνονται από 20mm - 110mm και του εξωτερικού δικτύου από 140mm - 250mm.

Σεισμική επικινδυνότητα – ισχυρή εδαφική κίνηση

Για την περιοχή του δήμου Θερμαϊκού η κατηγοριοποίηση των εδαφών της περιοχής έγινε με βάση τα φύλλα των γεωλογικών χαρτών 1:50.000 του ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών) και τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία (σχήμα 6.7). Προκειμένου να εκτιμηθούν οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις (PGA) και ταχύτητες (PGV) στην επιφάνεια για τη συγκεκριμένη περιοχή, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που υπολογίστηκαν πιθανολογικά για το βραχώδες υπόβαθρο με μέση περίοδο επαναφοράς 100, 475 και 950 έτη (σχήμα 6.8) – (Κ. Πιτιλάκης και συνεργάτες, 2008). Στη συνέχεια, οι τιμές αυτές ανάχθηκαν σε τιμές επιτάχυνσης και ταχύτητας στην επιφάνεια του εδάφους με τη χρήση των συντελεστών εδαφικής ενίσχυσης του Πίνακα 6.2.



Σχήμα 6.7: Κατηγοριοποίηση των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής του δήμου Θερμαϊκού (SRM-LIFE, 2003-2007), Μ. Αλεξούδη, Ε. Ρήγα, Κ. Πιτιλάκης, 2008.



Σχήμα 6.8: Χωρική μεταβολή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA (gal) στο βραχώδες υπόβαθρο για σεισμό με μέση περίοδο επαναφοράς : α) 100 έτη, β) 475 έτη, γ) 950 έτη (SRM-LIFE, 2003-2007), Μ. Αλεξούδη, Ε. Ρήγα, Κ. Πιτιλάκης, 2008.

Κατηγορία εδάφους	Περιγραφή εδάφους	Συντελεστής ενίσχυσης
I	Προσχώσεις - αλλουβιακές αποθέσεις με επικράτηση αμμωδών οριζόντων.	1,05
II	Αποθέσεις με επικράτηση ιλυωδών οριζόντων ιλυώδεις-αμμώδεις άργιλοι με εναλλαγές αργιλωδών άμμων γενικά πάχους >60μ.και χαμηλής έως μέσης δυσστησίας.	2,5
III	Αποθέσεις με επικράτηση ιλυωδών οριζόντων ιλυώδεις-αμμώδεις άργιλοι με εναλλαγές αργιλωδών άμμων γενικά πάχους <60μ. μέσης έως υψηλής δυσστησίας	1,2

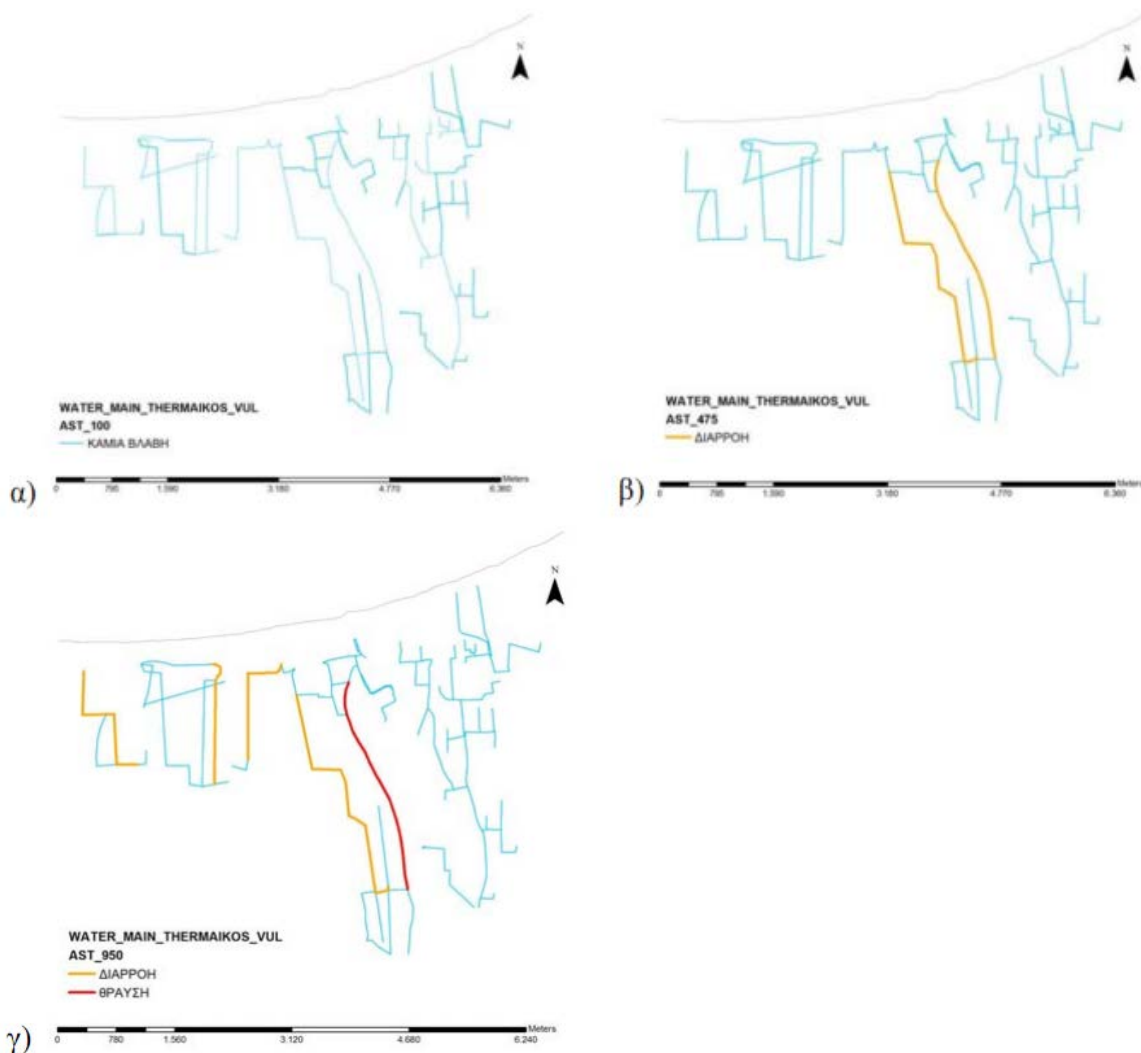
Πίνακας 6.2: Συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης (Pitilakis et al, 2004), Μ. Αλεξούδη, Ε. Ρήγα, Κ. Πιτιλάκης, 2008.

Λαμβάνοντας υπόψη τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των εδαφών της περιοχής του δήμου Θερμαϊκού προκύπτει ότι μόνο οι περιοχές των οποίων τα εδάφη ανήκουν στην κατηγορία I είναι επιδεκτικές σε ρευστοποίηση. Από αυτές, οι περιοχές που

είναι πλησιέστερα στην ακτογραμμή, μπορούν να χαρακτηριστούν ως υψηλής επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση, ενώ οι υπόλοιπες ως μέσης επιδεκτικότητας. Αντίθετα, τα εδάφη κατηγοριών II και III είναι αρκετά δύσμητα και δεν διατρέχουν κανένα κίνδυνο.

Καμπύλες τρωτότητας – εκτίμηση τρωτότητας

Ο υπολογισμός του ρυθμού επισκευών/χλμ. για τους αγωγούς ύδρευσης του δήμου Θερμαϊκού πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τόσο την εδαφική ταλάντωση όσο και τις μόνιμες μετακινήσεις. Οι τιμές της PGV και PGD υπολογίστηκαν για σεισμούς με μέση περίοδο επαναφοράς 100, 475 και 950 έτη. Είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι κατά τον υπολογισμό της τρωτότητας λόγω μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή που υπολογίστηκε για την πλευρική εξάπλωση και την καθίζηση εξαιτίας της ρευστοποίησης. Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζονται οι χάρτες τρωτότητας των αγωγών και στον πίνακα 6.3 ο αναμενόμενος αριθμός αστοχιών για κάθε σεισμικό σενάριο. Με πορτοκαλί χρώμα εικονίζονται οι αναμενόμενες διαρροές και με κόκκινο οι θραύσεις.



Σχήμα 6.9 : Αστοχίες αγωγών του δικτύου ύδρευσης του δήμου Θερμαϊκού για σεισμό με μέση περίοδο επανάληψης α) 100 έτη, β) 475 έτη , γ) 950 έτη, Μ. Αλεξούδη, Ε. Ρήγα, Κ. Πιτιλάκης, 2008.

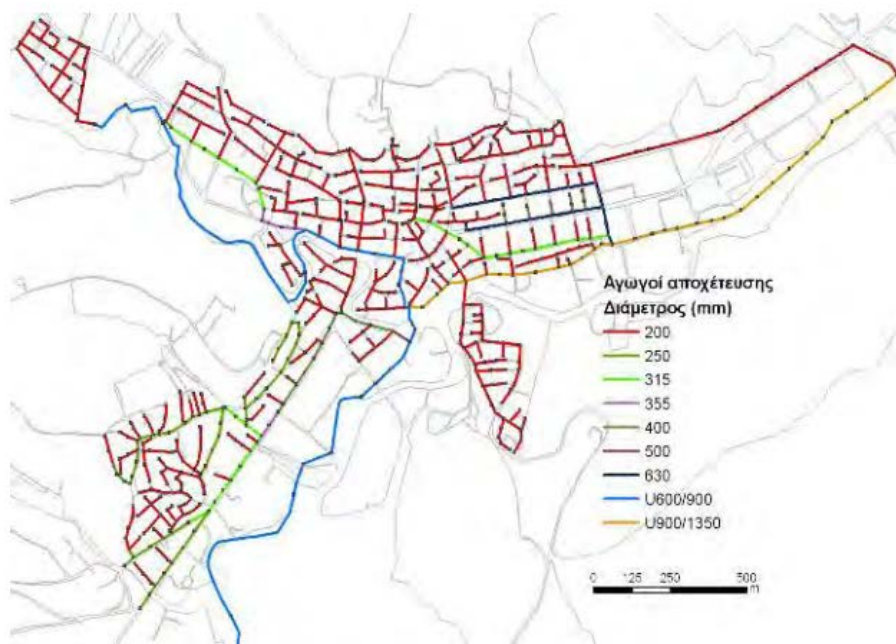
Επίπεδο Αστοχίας	Σεισμικό Σενάριο		
	Tm= 100 έτη	Tm= 475 έτη	Tm= 950 έτη
Διαρροές	0	2	1
Θραύσεις	0	0	4

Πίνακας 6.3: Αριθμός αναμενόμενων αστοχιών αγωγών του δικτύου ύδρευσης του δήμου Θερμαϊκού για τα 3 σεισμικά σενάρια, Μ. Αλεξούδη, Ε. Ρήγα, Κ. Πιτιλάκης, 2008.

6.3.3. Δίκτυο αποχέτευσης της πόλης των Γρεβενών – Σεισμικά σενάρια, Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010

Ταξινόμηση δικτύου

Το αποχετευτικό δίκτυο της πόλης των Γρεβενών αποτελεί ένα νέο δίκτυο, η κατασκευή του οποίου ολοκληρώθηκε το 2006. Περιλαμβάνει αγωγούς βαρύτητας (λυμάτων και ομβρίων) συνολικού μήκους 32 χλμ., με τυπικά βάθη τοποθέτησης που κυμαίνονται μεταξύ 2,5-3,5 μέτρα. Ένα τμήμα του δικτύου ($\approx 21\%$) περιλαμβάνει παλαιούς αγωγούς, που συνδέονται με το νέο δίκτυο, κυρίως περιφερειακά, και χρησιμοποιούνται για την μεταφορά των λυμάτων στον σταθμό επεξεργασίας. Οι νέοι αγωγοί είναι κυκλικής διατομής, κατασκευασμένοι από PVC, ενώ το παλιό δίκτυο αποτελείται από αγωγούς και σήραγγες διατομής U από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι αγωγοί ταξινομούνται με βάση την σπουδαιότητά τους, ενώ οι διάμετροι τους μεταβάλλονται σύμφωνα με την λειτουργία και την θέση τους στο δίκτυο. Επιπλέον, συγκεντρώθηκαν και ψηφιοποιήθηκαν στοιχεία για τα φρεάτια σύνδεσης των αγωγών. Η αντίστοιχη βάση δεδομένων περιλαμβάνει το είδος τους, το υψόμετρο του εδάφους τοποθέτησης και το βάθος του αγωγού. Ο σταθμός επεξεργασίας λυμάτων βρίσκεται σε απόσταση 4 χλμ. από την πόλη και συνδέεται με τον ποταμό Γρεβενιώτικο (παραπόταμο του Αλιάκμονα), που αποτελεί τον αποδέκτη των επεξεργασμένων λυμάτων. Το δίκτυο αποχέτευσης των Γρεβενών, που διαχειρίζεται η Δημόσια Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Γρεβενών, παρουσιάζεται στο σχήμα 6.10 (χρωματική μεταβολή των διαμέτρων των αγωγών).



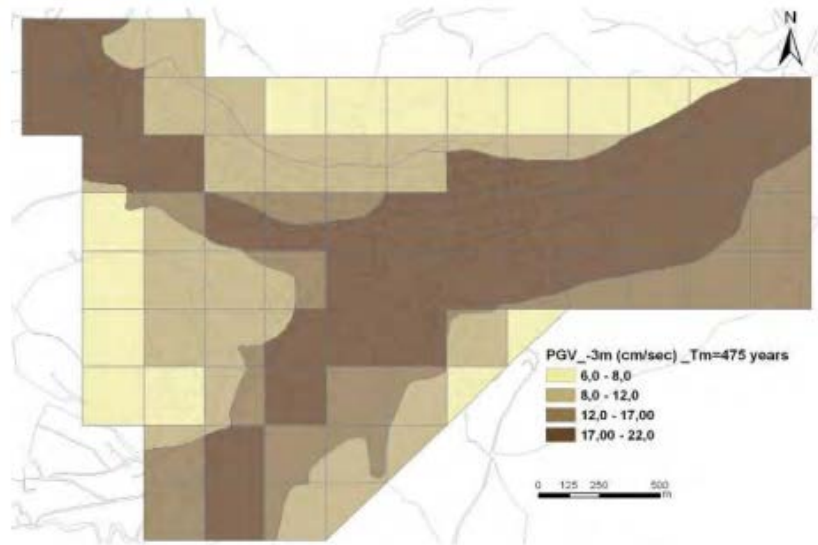
Σχήμα 6.10: Δίκτυο αποχέτευσης της πόλης των Γρεβενών – διάμετροι των αγωγών., Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010.

Σεισμικά σενάρια – ειδικές αναλύσεις σεισμικής εδαφικής απόκρισης

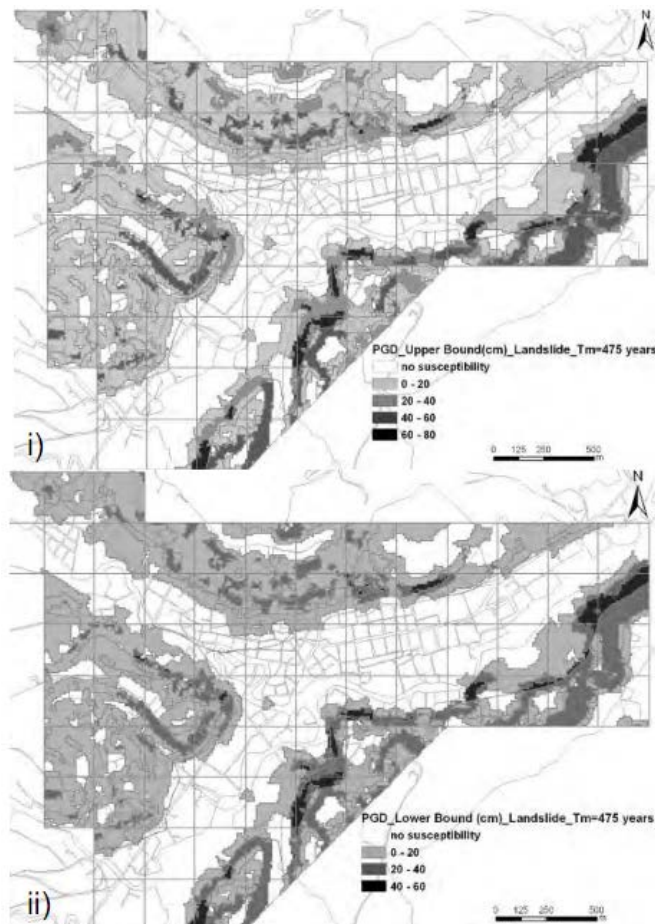
Η μελέτη της σεισμικής απόκρισης του εδάφους της ευρύτερης περιοχής των Γρεβενών πραγματοποιήθηκε για τρία σεισμικά σενάρια με μέση περίοδο επαναφοράς $T_m=100$, 475 και 1000 έτη. Εξετάστηκαν τόσο η ισχυρή εδαφική ταλάντωση, όσο και οι μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις από την πιθανή εκδήλωση κατολισθήσεων. Η μελέτη σεισμικής απόκρισης του υπεδάφους λόγω της εδαφικής ταλάντωσης βασίστηκε στην ειδική μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας των Γρεβενών. Επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά εδαφικά προσομοιώματα σε ολόκληρη την πόλη, τα οποία βαθμονομήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα ενόργανων μεθόδων - τεχνικών μελέτης της σεισμικής απόκρισης, δοκιμών μέτρησης μικροθορύβου καθώς και γεωφυσικών δοκιμών που εκτελέστηκαν από το Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του Α.Π.Θ. στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος. Οι αναλύσεις εδαφικής απόκρισης έγιναν με θεώρηση ισοδύναμης γραμμικής απόκρισης, για τα τρία σενάρια. Το τελικό προϊόν είναι ο διαχωρισμός της πόλης σε ζώνες όμοιας σεισμικής απόκρισης του υπεδάφους. Εξαιτίας του σχετικά έντονου ανάγλυφου, εξετάστηκαν επίσης για τα τρία σενάρια, η επιδεκτικότητα της ευρύτερης περιοχής στον κίνδυνο κατολίστεσης, καθώς και οι αναμενόμενες μόνιμες μετακινήσεις λόγω κατολισθητικών φαινομένων. Για τον σκοπό αυτό, ελήφθησαν υπόψη η κλίση του εδάφους, οι εδαφικές συνθήκες και η κρίσιμη εδαφική επιτάχυνση.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων δίνονται υπό μορφή χαρτών GIS, μέσω των οποίων περιγράφεται το μέγεθος και η χωρική κατανομή της αναμενόμενης σεισμικής έντασης στην επιφάνεια και σε βάθος 3m από την επιφάνεια, εκφρασμένης σε όρους κορυφαίων τιμών επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετάθεσης, φασματικών τιμών απόκρισης, καθώς και μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων λόγω κατολίστεσης. Στο σχήμα 6.11, απεικονίζεται η χωρική κατανομή της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV) στο μέσο βάθος τοποθέτησης των αγωγών (-3m) για $T_m=475$ έτη, ενώ στο σχήμα 6.12 δίνεται η χωρική κατανομή των αναμενόμενων τιμών των μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων (PGD) στην επιφάνεια (άνω και κάτω όριο) λόγω

κατολίσθησης, για το ίδιο σεισμικό σενάριο. Οι τιμές των μετακινήσεων (κάτω και άνω όριο) φτάνουν τα 10 -15 cm, 60 -80 και 80 – 130 cm για $T_m=100$, 475 και 1000 έτη αντίστοιχα.



Σχήμα 6.11: Χωρική κατανομή της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας σε βάθος -3m ($T_m=475$ έτη), Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010.

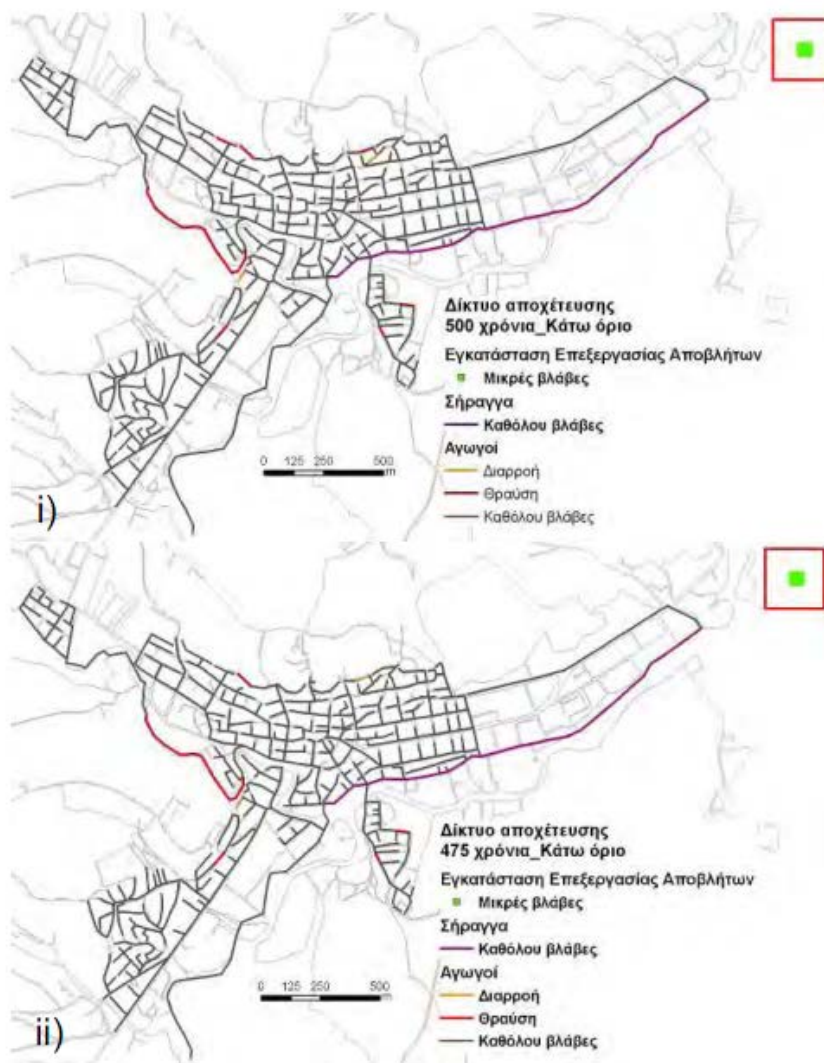


Σχήμα 6.12: Χωρική κατανομή του i) άνω και ii) κάτω ορίου των αναμενόμενων τιμών μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων στην επιφάνεια λόγω κατολίσθησης ($T_m=475$ έτη), Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010.

Αποτίμηση τρωτότητας - σενάρια απωλειών

Τα υπό κίνδυνο στοιχεία για το δίκτυο αποχέτευσης των Γρεβενών περιλαμβάνουν αγωγούς, σήραγγες (αγωγούς διαμέτρου $\Phi > 900\text{mm}$ και τον σταθμό επεξεργασίας λυμάτων. Για την αποτίμηση της τρωτότητας των αγωγών λόγω εδαφικής ταλάντωσης χρησιμοποιήθηκε η σχέση τρωτότητας των O' Rourke & Ayala (1993) που προτείνεται από το HAZUS, στην οποία το επίπεδο της σεισμικής διέγερσης περιγράφεται από την τιμή της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας. Για την αποτίμηση των αναμενόμενων βλαβών λόγω της εδαφικής αστοχίας (κατολίσθησης), συναρτήσεως της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης, χρησιμοποιήθηκε η σχέση τρωτότητας που προτείνεται από την American Lifelines Alliance (ALA, 2002). Ο έλεγχος, η αξιολόγηση και τελικά η επιλογή των σχέσεων τρωτότητας πραγματοποιήθηκε χάρη σε τεκμηριωμένων στοιχείων βλαβών από πρόσφατους σεισμούς στη Λευκάδα το 2003 και στην Duzce, Τουρκία το 1999. Αγωγοί διαμέτρου από U900/1350mm υπολογίστηκαν με βάση αναλυτικές καμπύλες τρωτότητας που προτείνονται για σήραγγες κυκλικής διατομής, λαμβάνοντας υπόψη την τυπολογία και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Τέλος, για την αποτίμηση της τρωτότητας του σταθμού επεξεργασίας λυμάτων χρησιμοποιήθηκαν καμπύλες τρωτότητας που αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του Α.Π.Θ. για μικρές/μεσαίες εγκαταστάσεις με αγκυρωμένα εξαρτήματα. Το σχήμα 6.13 παρουσιάζει τη χωρική κατανομή και την έκταση των εκτιμώμενων βλαβών για το σενάριο των 475 ετών. Ο αριθμός, η έκταση και η θέση των βλαβών, σχετίζονται με τη χωρική κατανομή της σεισμικής διέγερσης, καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων στοιχείων. Ειδικά για τους αγωγούς, καθοριστικός παράγοντας των αναμενόμενων απωλειών αποτελεί η εκδήλωση φαινομένων κατολίσθησης. Οι συνολικές εκτιμώμενες βλάβες (θραύσεις και/ή διαρροές) των αποχετευτικών αγωγών, λόγω εδαφικής ταλάντωσης και αστοχίας και για τα τρία σενάρια δίνονται στον πίνακα 6.4 (ως ποσοστό % του συνολικού μήκους του δικτύου).

Τα κόστη αποκατάστασης των στοιχείων του δικτύου υπολογίζονται σύμφωνα με την μεθοδολογία που προτείνεται από το HAZUS και με τη χρήση ελληνικών δεδομένων για τα κόστη αντικατάστασης λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό αριθμό βλαβών και τις διαθέσιμες τεχνικές για την επιδιόρθωσή τους. Για παράδειγμα, το μέσο κόστος αποκατάστασης των αγωγών ανέρχεται σε 20 χιλιάδες ευρώ και του σταθμού επεξεργασίας λυμάτων σε περίπου 2 εκατομμύρια ευρώ για το σενάριο των 475 ετών. Σημειώνεται εδώ ότι πρόκειται για μία προσεγγιστική εκτίμηση που εξαρτάται από την τιμή μονάδος, που εκτιμήθηκε με την συμμετοχή και των εμπλεκόμενων φορέων. Προφανώς ακριβέστερη εκτίμηση θα αλλάξει και το τελικό κόστος.



Σχήμα 6.13: Αποτίμηση της τρωτότητας του δικτύου αποχέτευσης της πόλης των Γρεβενών λόγω εδαφικής ταλάντωσης και κατολίθωσης για το άνω (i) και κάτω (ii) όριο των μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων ($T_m=475$ έτη)., Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010.

Ποσοστό %	Σεισμικό σενάριο		
	100 έτη	475 έτη	1000 έτη
Άνω όριο	1,66	3,86	4,42
Κάτω όριο	1,48	3,48	4,05

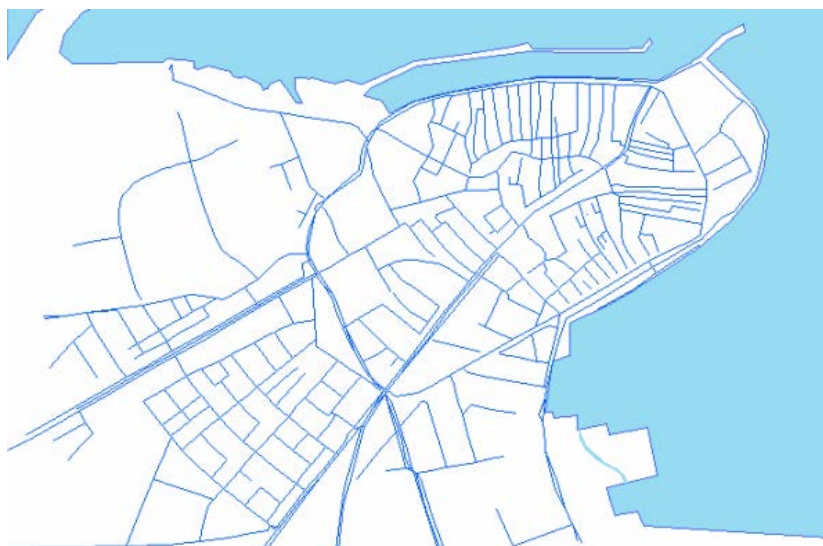
Πίνακας 6.4: Ποσοστό % των αποχετευτικών αγωγών που αναμένεται να υποστούν βλάβη λόγω εδαφικής ταλάντωσης και μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων, Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010.

6.3.4. Δίκτυο ύδρευσης της πόλης της Λευκάδας, Μ. Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2008

Απογραφή δικτύου

Το δίκτυο ύδρευσης της πόλης της Λευκάδας (σχήμα 6.14) κατασκευάστηκε το 1979 και έχει σχεδιαστεί για ημερήσια κατανάλωση νερού ίση με 5400 m^3 . Ως πηγή

υδροληψίας για το δίκτυο εντός της πόλης θεωρείται η παροχή νερού από την δεξαμενή οπλισμένου σκυροδέματος χωρητικότητας 1000 m³. Η υδροληψία του εξωτερικού υδραγωγείου γίνεται από τις πηγές Μοναστηρίου του νομού Αιτωλοακαρνανίας (ποταμό Λούρο). Το δίκτυο είναι βρογχικό 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 - 4.0 atm. Μετά από την συλλογή στοιχείων για τους αγωγούς του δικτύου ύδρευσης από την μελέτη εφαρμογής του, ψηφιοποιήθηκαν σε GIS, περίπου 30 χλμ. 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 6.14: Ψηφιοποιημένο δίκτυο ύδρευσης του ιστορικού κέντρου (Λευκάδα), Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.

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 ψαμμούχοι με εναλλαγές λατυποπαγών ασβεστόλιθων, ενώ στη ζώνη των Ιονίων αποθέσεις μολασικών ιζημάτων μεγάλου πάχους λόγω επίκλισης της θάλασσας (κυρίως μάργες και λιγότερο ψαμμίτες 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 ηλεκτρονικού υπολογιστή των μετασεισμών του κύριου σεισμού της Λευκάδας ($M_w=6.4$, 14-08-2005), όπως επίσης και από διαθέσιμες γεωτεχνικές πληροφορίες (Ο.Α.Σ.Π.). Η επιφανειακή εμφάνιση του βράχου προσδιορίστηκε βάσει γεωλογικών χαρτών της ευρύτερης περιοχής.

Σεισμικότητα

Η Λευκάδα βρίσκεται σε μια από τις πιο σεισμογενείς περιοχές της Ελλάδας (περιοχή σεισμικότητας ΙΙΙ, $\alpha=0.30g$) σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ. 2000. Το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος σεισμού στην περιοχή είναι $M_{\max}=7.1$. 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 κτήρια. Στο σχήμα 6.15, εντοπίζονται οι θέσεις των αστοχιών στα δίκτυα ύδρευσης/αποχέτευσης καθώς και οι εδαφικές αστοχίες που κατεγράφησαν.



Σχήμα 6.15: Κατανομή αστοχιών στο δίκτυο ύδρευσης/αποχέτευσης στο ιστορικό κέντρο της Λευκάδας, Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.

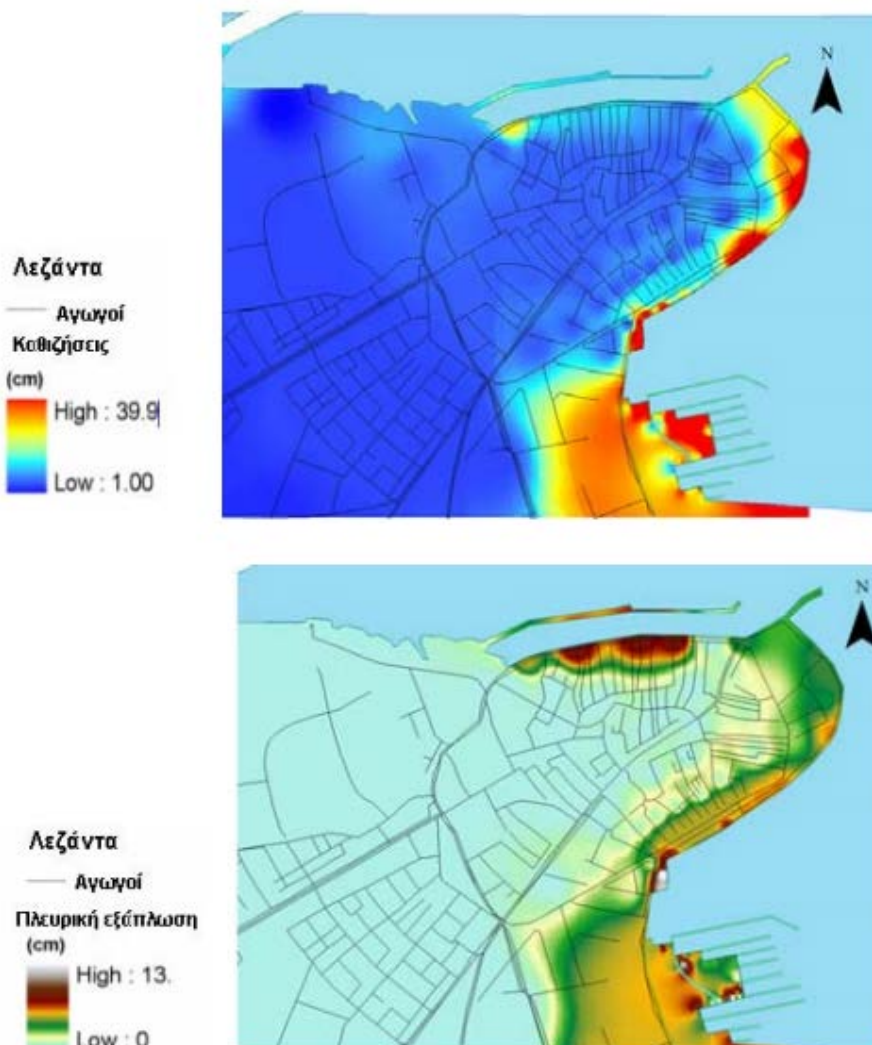
Γεωτεχνικές πληροφορίες και παρατηρήσεις μετά το σεισμό του 2003

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 Α.Π.Θ. στα πλαίσια παλαιότερης ερευνητικής προσπάθειας (Ο.Α.Σ.Π., 1996). Οι εδαφικοί σχηματισμοί του ιστορικού κέντρου κατατάσσονται σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ. 2000 στην κατηγορία Γ, εκτός από την περιοχή της Μαρίνας και την παραλιακή ζώνη όπου εμφανίζονται χαλαρές λεπτόκοκκες, αμμοίλυδεις 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 μικρού βάθους ($h=10km$) πλευρικές εξαπλώσεις κυρίως στην παραλιακή ζώνη και στην περιοχή της Μαρίνας (πίνακας 6.5) της Λευκάδας.

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

Πίνακας 6.5: Μόνιμες παραμορφώσεις λόγω του σεισμού της Λευκάδας, Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.

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 6.16. Γενικά, όλο το ιστορικό κέντρο της Λευκάδας παρουσίασε ομοιόμορφη καθίζηση της τάξεως αρκετών εκατοστών του μέτρου.



Σχήμα 6.16: Χάρτης παρατηρηθεισών καθιζήσεων και πλευρικών εξαπλώσεων στο ιστορικό κέντρο της Λευκάδας κατά το σεισμό του 2003, Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.

Αστοχίες του δικτύου ύδρευσης

Μολονότι το μήκος του βασικού δικτύου ύδρευσης της πόλης της Λευκάδας και συγκεκριμένα του «ιστορικού κέντρου» είναι αρκετά μικρό, παρατηρήθηκαν αρκετές αστοχίες (πίνακας 6.6, σχήμα 6.17) τόσο λόγω της εδαφικής ταλάντωσης (>4 αστοχίες) όσο και λόγω των μόνιμων παραμορφώσεων (συνολικά 7 αστοχίες: 4 στο ιστορικό κέντρο, 3 στην «Γύρα»).

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

Πίνακας 6.6: Αποδεδειγμένες αστοχίες που καταγράφηκαν στο δίκτυο ύδρευσης της Λευκάδας, Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.



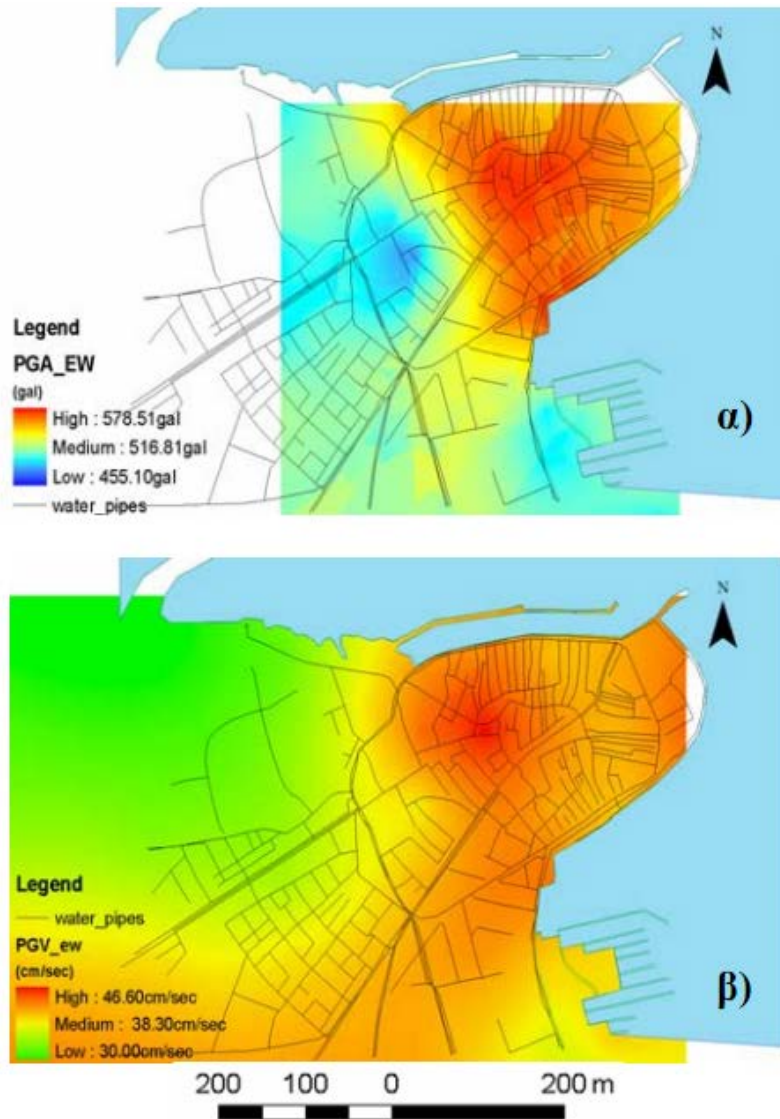
Σχήμα 6.17: Καταγεγραμμένες αστοχίες του βασικού και του δευτερεύοντος δικτύου ύδρευσης (Σύμβολα: p- βασικό δίκτυο, sec- συνδέσεις καταναλωτών), Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.

Στα πλαίσια της έρευνας αυτής, καταρτίστηκε βάση δεδομένων αστοχιών τόσο για το βασικό όσο και για το δευτερεύον δίκτυο ύδρευσης (συνδέσεις με τους καταναλωτές). Ενδεικτικά παρουσιάζεται η βάση δεδομένων αστοχιών για το βασικό δίκτυο ύδρευσης (πίνακας 6.7). Το σύμβολο (?) χρησιμοποιήθηκε στα σημεία στα οποία υπάρχουν αμφιβολίες σχετικά με το είδος της αστοχίας.

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	Χυτοσί- δηρος	1.5- 2.0	Καθίζηση	Αστοχία παράλληλα με τον κορμό
P9	Φ125	Χυτοσί- δηρος	1.5- 2.0	Καθίζηση	Αστοχία παράλληλα με τον κορμό
P10	Φ80	Αμιαντο- τσιμέντο	1.5- 2.0	Καθίζηση	Αστοχία παράλληλα με τον κορμό

Πίνακας 6.7: Βάση δεδομένων αστοχιών των αγωγών του βασικού δικτύου ύδρευσης, Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.

Εκτίμηση της ισχυρής εδαφικής κίνησης του σεισμού της Λευκάδας
 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). Στο σχήμα 6.18 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των βασικών μεγεθών της ισχυρής εδαφικής κίνησης.



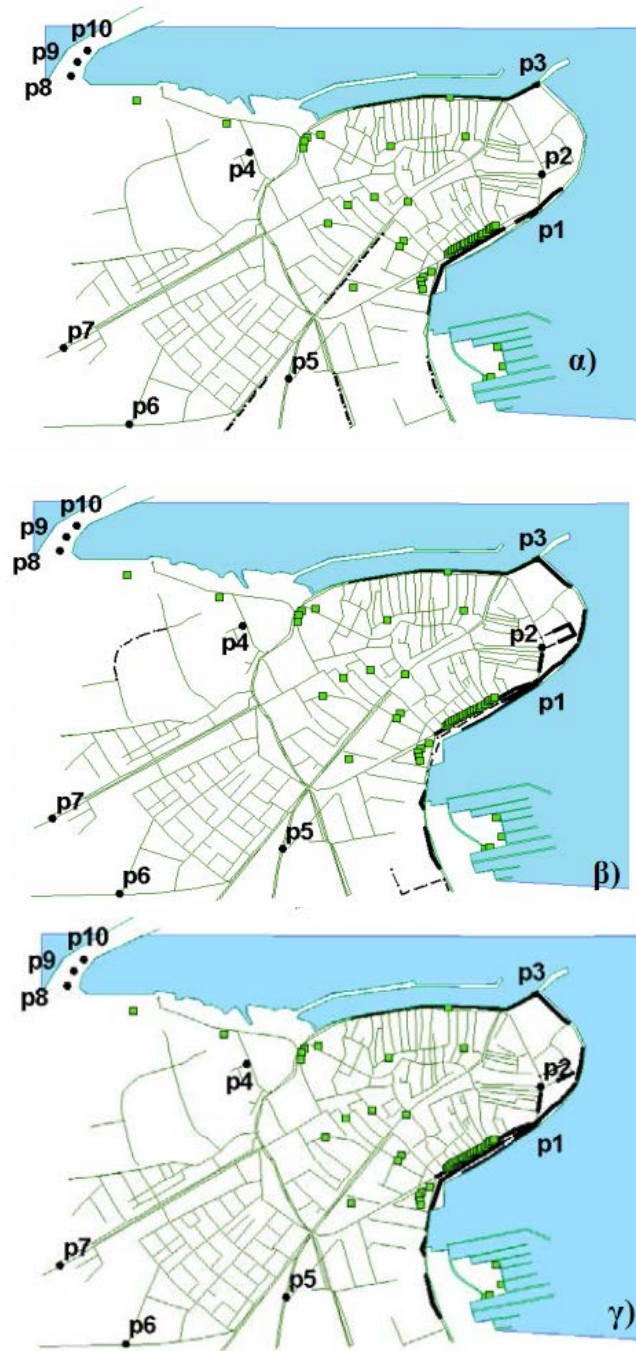
Σχήμα 6.18: Χωρική κατανομή της PGA_{EW} (gal) και PGV_{EW} (cm/sec) για το σεισμό Λευκάδας (14-08-2003) – (Pitilakis et al, 2005), Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.

Εκτίμηση αστοχιών

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις τρωτότητας για την εδαφική ταλάντωση (σχήμα 6.18) διαπιστώνονται ιδιαίτερα σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφόρων σχέσεων τρωτότητας. Συγκεκριμένα, οι σχέσεις του HAZUS 2004, προσεγγίζουν σε σημαντική ακρίβεια τον πραγματικό αριθμό αστοχιών, ενώ τόσο η σχέση των Eidinger, Avila E (1999), όσο και της A.L.A., 2001 υπολογίζουν μεγάλο αριθμό αστοχιών. Αυτό οφείλεται κυρίως στην υπερεκτίμηση του αριθμού των αστοχιών λόγω των μόνιμων μετακινήσεων (πίνακας 6.8). Η χωρική κατανομή των εκτιμώμενων αστοχιών περιγράφεται γραμμικά ενώ η καταγεγραμμένη αστοχία προσδιορίζεται σημειακά (σχήμα 6.19).

Σχέσεις Τρωτότητας	Εδαφική Ταλάντωση PGV _{ew} 30 – 46.60 cm.sec		Μόνιμες μετακινήσεις PGV = 1.0 – 40.42 cm		Συνδυασμός RGV RGD	
O'Rourke & Ayala (1993) & Eguchi (1992) HAZUS 2004	R.R / km	Αστοχίες	R.R / km	Αστοχίες	R.R / km	Αστοχίες
	R.R / km = 0.137	4 επισκευές 3 διαρροές, 1 θραύση	R.R/k m = 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	25 επισκευές 3 διαρροές, 22 θραύσεις
	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	

Πίνακας 6.8: Σύγκριση των αστοχιών που εκτιμήθηκαν και των καταγεγραμμένων στο δίκτυο ύδρευσης, Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.



Σχήμα 6.19: Αποτίμηση της τρωτότητας βάσει των σχέσεων τρωτότητας: α) των O'Rourke & Ayala (1993) και Honegger & Eguchi (1992), β) των Eidinger & Avila E (1999), γ) της A.L.A. (2001). Διακρίνονται με έντονο χρώμα οι αγωγοί οι οποίοι αναμένονται να αστοχήσουν. Μ.Αλεξούδη, Κ. Κακδέρη, Κ. Πιτιλάκης, 2006.

Σύγκριση αναλυτικών και καταγεγραμμένων αστοχιών

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 του παραπάνω σχήματος. 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 Honegger & Eguchi (1992) προσδιορίστηκαν οι αστοχίες P1 (διπλή) και η P3, ενώ εφαρμόζοντας τις άλλες δύο σχέσεις των Eidinger, Avila E, (1999) και A.L.A., (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.

Κεφάλαιο 7

Μεταφορικά δίκτυα

7.1.Περιγραφή μεταφορικών δικτύων

7.1.1.Οδικό δίκτυο

Το οδικό δίκτυο κάθε χώρας πρέπει να εξασφαλίζει και να δίνει ώθηση στην ελεύθερη διακίνηση προσώπων και εμπορευμάτων, όπως και στο εμπόριο αγαθών και υπηρεσιών. Με την παροχή αποδοτικής, ευέλικτης και ασφαλούς οδικής υποδομής αυξάνονται η παραγωγικότητα και η ανταγωνιστικότητα των οικονομικών δραστηριοτήτων μιας χώρας και επομένως αυξάνονται και οι αναπτυξιακές προοπτικές της. Επίσης, η ύπαρξη ενός επαρκούς οδικού δικτύου αποτελεί βασική προϋπόθεση για την οικονομική ανάπτυξη κάθε χώρας, καθώς συμβάλλει στην ενοποίηση της αγοράς της, με τις αγορές γειτονικών και μη χωρών, ενισχύει τον ανταγωνισμό και το εμπόριο και αυξάνει τις ευκαιρίες απασχόλησης. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν σημαντικό παράγοντα όσον αφορά την ανάπτυξη της κοινωνικά αποδοτικής επιχειρηματικότητας που είναι ο βασικός μοχλός για την αύξηση των εισοδημάτων και της κοινωνικής ευημερίας. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα, λόγω της ορεινής μορφολογίας του εδάφους και του συνεπαγόμενου περιορισμένου ρόλου των σιδηροδρομικών μεταφορών της χώρας, το οδικό δίκτυο πλεονεκτεί λόγω χαμηλού κόστους, της μεγάλης ευελιξίας και της ταχύτητας ανάπτυξης.

Το οδικό δίκτυο της Ελλάδας έχει συνολικό μήκος πάνω από 115.000 χιλιόμετρα και διασχίζει τόσο το ηπειρωτικό όσο και το νησιωτικό τμήμα της. Περίπου τα 107.895 χιλιόμετρα αποτελούν το ασφαλτοστρωμένο τμήμα (εκ των οποίων τα 880 είναι αυτοκινητόδρομος) και τα 9.638 χιλιόμετρο το χωμάτινο τμήμα. Το οδικό δίκτυο διαιρείται στις εξής κατηγορίες: αυτοκινητοδρόμους, εθνικές οδούς, κύριες οδούς (συνδέσεις μεγάλων πόλεων), ασφαλτόδρομους, κύριους χωματόδρομους, δασικούς δρόμους, δρόμους κακής βατότητας και μονοπάτια. Στο οδικό δίκτυο συμπεριλαμβάνονται και άλλα τεχνικά έργα που συμβάλλουν στη γρηγορότερη και πιο ομαλή χάραξη του. Τέτοια έργα είναι οι γέφυρες και οι σήραγγες.

Ανάμεσα στις γραμμές ζωής μια πόλης, το αστικό, αλλά και το εθνικό οδικό δίκτυο παίζει κυρίαρχο ρόλο, επιτρέποντας σε ανθρώπους και εμπορεύματα να φτάνουν στον προορισμό τους, με ασφάλεια και σε σύντομο χρόνο. Η σπουδαιότητά του, γίνεται αντιληπτή στη φάση της έκτακτης ανάγκης, αφού η συνέχιση της λειτουργίας του αποκτά κρίσιμη σημασία για την αποκατάσταση των πληττόμενων γραμμών ζωής και υποδομών, την εκκένωση της πόλης και την παροχή ιατρικής βοήθειας στους πληγέντες.

Η Ελλάδα αποτελεί τη γέφυρα της ανατολής με την δύση και πρέπει να έχει ένα οδικό δίκτυο που να εξυπηρετεί αυτόν της το ρόλο. Αυτό το επιτυγχάνει με τη δημιουργία τριών μεγάλων οδικών αξόνων, του οδικού άξονα Π.Α.Θ.Ε. (Πάτρα - Αθήνα - Θεσσαλονίκη - Εύζωνοι), της Εγνατίας οδού και της Ιόνιας Οδού.

Οι κύριοι οδικοί άξονες είναι οι παρακάτω:

- Αυτοκινητόδρομος Π.Α.Θ.Ε. (Πάτρα-Αθήνα-Θεσσαλονίκη-Εύζωνοι) - Α1:

Εύζωνοι - Άγιος Αθανάσιος - Αξίος - Κλειδί - Κατερίνη - Τέμπη - Λάρισα - Βελεστίνο - Λαμία - Θήβα - Σχηματάρι - Αθήνα - Πειραιάς -Κόρινθος - Διακοφτό - Αίγιο - Ρίο - Πάτρα.

- Εγνατία Οδός (αυτοκινητόδρομος Α2):
Ηγουμενίτσα - Ιωάννινα - Καλλιθέα - Γρεβενά - Σιάτιστα - Κοζάνη - Βέροια - Κλειδί - Αξίος - Θεσσαλονίκη - Λαγκαδάς - Βόλβη - Ασπροβάλτα - Καβάλα - Ξάνθη - Κομοτηνή - Αλεξανδρούπολη - Αρδάνι - Κήποι.
- Οδός Κεντρικής Ελλάδος (Α3):
Παναγιά - Τρίκαλα - Καρδίτσα - Λαμία - Άμφισσα - Ιτέα - Αντίρριο.
- Αυτοκινητόδρομος Α4: Λάρισα - Τρίκαλα.
- Ιόνια Οδός (Α5): Κτίσματα - Καλπάκι - Ιωάννινα - Άρτα - Αμφιλοχία - Αμβρακία - Αγρίνιο - Μεσολόγγι - Αντίρριο - Ρίο.



Σχήμα 7.1: Κύριοι οδικοί άξονες Ελλάδας, http://023.img98.net/out.php/i192136_ioniaodos1.jpg

- Αττική Οδός (Α6): Ελευσίνα - Αθήνα - Μαρκόπουλο.
- Αυτοκινητόδρομος Ανατολικής Πελοποννήσου (Α7): Κόρινθος - Νεστάνη - Τρίπολη - Μεγαλόπολη - Λεύκτρο - Τσακώνα - Καλάματα.
- Ολύμπια Οδός (Α8 & Α9): Ελευσίνα - Μέγαρα - Κόρινθος - Αίγιο - Ρίο - Πάτρα - Κάτω Αχαΐα - Ανδραβίδα - Πύργος - Τσακώνα.

Οι οδικές πύλες εισόδου στην Ελλάδα από τις γειτονικές χώρες είναι: ο Προμαχώνας (Σέρρες) και η Εξοχή (Δράμα) από τη Βουλγαρία, οι Εύζωνοι (Κιλκίς) από την ΠΓΔΜ, η Κακαβιά (Ιωάννινα) από την Αλβανία και οι Κήποι (Εβρος) από την Τουρκία. Η Ελλάδα συνδέεται με την υπόλοιπη Ευρώπη με τις εξής ευρωπαϊκές οδούς:

- **E 55:** ξεκινά από Σουηδία, περνάει από Δανία, Γερμανία, Τσεχία, Αυστρία, Ιταλία και καταλήγει στην Καλαμάτα. Έχει συνολικό μήκος 3305 χιλιόμετρα. Στην Ελλάδα περιλαμβάνει το άξονα Πάτρα - Πύργος - Ολυμπία - Καλαμάτα.
- **E65:** ξεκινάει από την Σουηδία και καταλήγει στα Χανιά. Έχει συνολικό μήκος 3.800 χιλιόμετρα. Στην Ελλάδα περιλαμβάνει τον αυτοκινητόδρομο κεντρικής Ελλάδας, ένα τμήμα του Α1, το Κόρινθος - Τρίπολη - Καλαμάτα και το Κόρινθος - Πάτρα.
- **E 75:** ξεκινά από τη Νορβηγία, περνάει από Φινλανδία, Πολωνία, Τσεχία, Σλοβακία, Ουγγαρία, Σερβία, ΠΓΔΜ και καταλήγει στην Σητεία. Στην Ελλάδα περιλαμβάνει τον Α1 και τον βόρειο άξονα της Κρήτης (Χανιά - Άγιος Νικόλαος).
- **E 90:** ξεκινάει από την Πορτογαλία περνάει από Ισπανία, Ιταλία και Ελλάδα και καταλήγει στα ανατολικά της Τουρκίας στα σύνορα με το Ιράκ. Το ευρωπαϊκό κομμάτι της διαδρομής έχει συνολικό μήκος 2821 χιλιόμετρα. Στην Ελλάδα περιλαμβάνει την Εγνατία οδό.



Σχήμα 7.2: Ευρωπαϊκοί αυτοκινητόδρομοι E90,E55,E65 και E75 σε σύνδεση με το ελληνικό δίκτυο, upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/E75_route.svg, <http://www.carsmart.gr/magazine/104>

7.1.2.Δίκτυο ΜΕΤΡΟ Αθηνών – Πειραιά και Θεσσαλονίκης

7.1.2.1.Δίκτυο

Σήμερα, οι δύο Γραμμές του Μετρό της Αθήνας έχουν συνολικό μήκος περίπου 51,1 χλμ. (συμπεριλαμβανομένων των 20,7 χλμ. γραμμής του προαστιακού από τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας προς Αεροδρόμιο) και διαθέτουν 34 σύγχρονους σταθμούς. Μαζί με τη γραμμή 1 του ΗΣΑΠ, το Τραμ και τον Προαστιακό, το Μετρό συμβάλλει στη σύνθεση ενός σύγχρονου συγκοινωνιακού δικτύου και στην αναβάθμιση της ποιότητας ζωής στο λεκανοπέδιο.

- Γραμμή 2 (Αγ. Αντώνιος - Αγ. Δημήτριος) και Γραμμή 3 (Αιγάλεω - Δουκίσσης Πλακεντίας), μήκος 30,4 χιλιόμετρα και 28 σταθμούς.
- Γραμμή 3 (Δουκίσσης Πλακεντίας - Αεροδρόμιο), με μήκος 20,7 χιλιόμετρα και 4 σταθμούς.

Το δίκτυο μετρό αποτελείται από επιμήκη τμήματα (σύστημα σηράγγων) και από κατασκευές μεγάλων διαστάσεων σε πολλαπλές στάθμες (σταθμοί). Συνολικά: 51,1 χιλιόμετρα μήκος με 31 σταθμούς. Οι βιβλιογραφικές αναφορές στον αντισεισμικό σχεδιασμό των έργων αυτών είναι περιορισμένες, αν όχι ανύπαρκτες, παρόλο που σε πολλές χώρες του κόσμου πολύπλοκα δίκτυα μετρό δεκάδων γραμμών βρίσκονται σε λειτουργία εδώ και έναν αιώνα περίπου.

7.1.2.2. Έδαφος, Υπέδαφος

Πριν ξεκινήσει η κατασκευή του έργου πραγματοποιήθηκαν γεωτεχνικές έρευνες προκειμένου να συλλεχθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για τη μελέτη. Το πρόγραμμα περιελάμβανε περισσότερες από 350 γεωτρήσεις που συμπλήρωναν τις 200 γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος της χάραξης των γραμμών σε παλαιότερες έρευνες, δηλαδή κατά μέσο όρο μία γεώτρηση περίπου κάθε 30 μέτρα κατά μήκος της συνολικής χάραξης. Κάθε γεώτρηση έφθανε κατά μέσον όρο τα 20 ως 30 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι γεωτεχνικές έρευνες συνεχίστηκαν και κατά τη διάρκεια της κατασκευής, ενώ συνολικά πραγματοποιήθηκαν 1100 γεωτρήσεις για τις ανάγκες του Βασικού Έργου.

Στα βάθη όπου γίνονται οι εργασίες του ΜΕΤΡΟ, το γεωλογικό υπόβαθρο της Αθήνας αποτελείται από σειρά γεωλογικών σχηματισμών, γνωστοί ως «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος».

Ο όρος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» χρησιμοποιείται για να περιγράψει σειρά αρχικά ιζηματογενών πετρωμάτων φλυσχικού τύπου.

Το σύστημα περιλαμβάνει αργιλικούς και ασβεστιτικούς ψαμμίτες, γραουβάκες, ιλυολίθους ασβεστόλιθους και αργιλικούς σχιστόλιθους. Πυριγενής δραστηριότητα έδωσε τοπικά περιδοτιτικά και διαβασικά σώματα που προκάλεσαν λιθολογική παραμόρφωση και σημαντικές τεκτονικές παραμορφώσεις των προϋπαρχόντων πετρωμάτων.

Η βραχομάζα είναι πολύ ανομοιογενής και ανισότροπη όχι μόνο στη μακροσκοπική-γεωτεκτονική κλίμακα της λεκάνης των Αθηνών, αλλά κυρίως στη μεσοσκοπική κλίμακα των εκσκαφών σηράγγων. Αυτή η εγγενής ανομοιογένεια των πετρωμάτων του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» δημιουργεί αβεβαιότητα κατά το συσχετισμό γειτονικών γεωτρήσεων, γεγονός που καθιστά εξαιρετικά δύσκολο τον σχεδιασμό αξιόπιστων γεωλογικών τομών. Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί που έχουν αποθεθεί πάνω από τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» αποτελούνται από ποτάμιες αποθέσεις (αργιλικά και αμμώδη υλικά και κροκαλοπαγή συνήθως μικρού πάχους). Επίσης, μεγάλες περιοχές καλύπτονται από διλουβιακές αποθέσεις ανάμεσα στους λόφους και αποτελούνται από αργίλους, ιλύες και άμμους σε εναλλαγές με λατυποπαγή χαλαρά συγκολλημένα.

Τέλος, ένα επιφανειακό στρώμα με σύγχρονες αποθέσεις ή τεχνητές επιχώσεις με ποικίλο πάχος (1-6 μ) βρίσκεται στις περισσότερες περιοχές κατά μήκος της χάραξης του έργου. Οι αποθέσεις αυτές δημιουργήθηκαν κατά τους ιστορικούς χρόνους.

Ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» αποτελείται γενικά από πετρώματα με μικρή περατότητα με εξαίρεση την παρουσία πετρωμάτων με μεγάλο δευτερογενές πορώδες (ανοικτές ασυνέχειες, καρστικά έγκοιλα σε ασβεστολιθικά πετρώματα, κατακερματισμένο υλικό σε συμπαγή πετρώματα). Γενικά, δεν βρέθηκαν μεγάλες ποσότητες υπογείων υδάτων που θα δυσκόλευαν τις εκσκαφές παρόλο που τα πιεζόμετρα έδειχναν στάθμες μερικά μόνο μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Το Μετρό έχει μελετηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντιμετωπίζει τις επιπτώσεις ακόμα και των πιο δυσμενών συνθηκών σεισμικής δραστηριότητας που έχουν καταγραφεί έως σήμερα, σύμφωνα με τα ελληνικά μελετητικά πρότυπα.

Οι παρακάτω γεωτεχνικές δραστηριότητες είναι οι πιο σημαντικές από αυτές που πραγματοποιήθηκαν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ :

- Έρευνα των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών με 1100 γεωτρήσεις, οι περισσότερες από τις οποίες έγιναν με συνεχή πυρηνοληψία δειγμάτων από έδαφος και πέτρωμα, ενώ μερικές χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή επί τόπου δοκιμών για να διερευνηθούν καλύτερα οι συνθήκες που επικρατούν στις στάθμες όπου κατασκευάζεται το έργο, αλλά και για την εγκατάσταση ειδικών οργάνων γεωτεχνικής παρακολούθησης.
- Γεωφυσικές έρευνες, χρησιμοποιώντας ποικίλες τεχνικές, όπως το ραντάρ εδάφους που διαπερνά το έδαφος εντοπίζοντας θαμμένα στοιχεία, υπόγειους ποτάμιους διαύλους, δίκτυα οργανισμών κοινής ωφέλειας και μεγάλα αρχαιολογικά στοιχεία (ευρήματα).
- Μέτρηση στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας για να υπολογισθεί η γενική διεύθυνση της ροής των υδάτων εδάφους, καθώς και οι ετήσιες διακυμάνσεις της στάθμης των υδάτων αυτών για τον καλύτερο σχεδιασμό του έργου.
- Ανάπτυξη βασικών παραμέτρων αντοχής του εδάφους και του πετρώματος για να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη των κατασκευών του έργου. Οι παράμετροι βασίζονται σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών δειγμάτων εδάφους και βράχου και σε άλλα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν με επί τόπου δοκιμές.
- Εκτεταμένο πρόγραμμα γεωτεχνικής παρακολούθησης πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη διεξαγωγή των εργασιών εκσκαφής εκτελείται τόσο για την ασφάλεια των υπερκειμένων ή/και παρακειμένων κτισμάτων και κατασκευών, όσο και για την επιβεβαίωση των παραδοχών σχεδιασμού του έργου

7.1.2.3.Μετρό Θεσσαλονίκης

Το 2003 αποφασίστηκε η κατασκευή δικτύου μετρό και στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Το δίκτυο αυτό, σήμερα βρίσκεται υπό κατασκευή και θα περιλαμβάνει:

- 13 σύγχρονους σταθμούς με κεντρική αποβάθρα,
- 9,6 χλμ. γραμμής με δύο ανεξάρτητες σήραγγες μονής τροχιάς,
- 18 υπέρ-αυτόματοι συρμοί τελευταίας τεχνολογίας, πλήρως κλιματιζόμενοι, οι οποίοι θα κινούνται χωρίς οδηγό αλλά με συνοδό,
- συστήματα αυτόματων θυρών επί των αποβάθρων κάθε σταθμού για καλύτερη εξυπηρέτηση και μέγιστη ασφάλεια του επιβατικού κοινού,
- δημιουργία αμαξοστάσιου έκτασης 50.000 m² στην περιοχή της Πυλαία.

Επειδή το έργο είναι ακόμα υπό κατασκευή, μελέτες για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των σιηράγγων και των σταθμών βρίσκονται σε εξέλιξη και χρησιμοποιούν όλη την προηγούμενη εμπειρία από το μετρό Αθήνας και την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

7.2.Γέφυρες

7.2.1.Εισαγωγή

Οι γέφυρες αποτελούν βασικές συνιστώσες του οδικού δικτύου, ιδιαίτερα όσες βρίσκονται σε οδικούς άξονες με υψηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους ή χαρακτηρίζονται ως στρατηγικής σημασίας. Οι βλάβες από σεισμούς που παρατηρήθηκαν παγκοσμίως σε οδικές γέφυρες από σκυρόδεμα και η συνακόλουθη επίδρασή τους στις δράσεις άμεσης ανάγκης, αλλά και στις ευρύτερες οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες των πληγεισών περιοχών, κατέδειξαν ότι αποτελούν την πλέον ευαίσθητη συνιστώσα του οδικού δικτύου από άποψη σεισμικής τρωτότητας.

Μέχρι πρόσφατα, η αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης τόσο του οδικού δικτύου όσο και των υπολοίπων δικτύων κοινής ωφέλειας δεν αποτελούσε πρώτη προτεραιότητα για την διαχείριση του σεισμικού κινδύνου σε αστικές περιοχές. Οι κύριοι λόγοι ήταν η πολυπλοκότητα των δικτύων, η μεγάλη τους έκταση, η ποικιλία συνιστωσών, η έλλειψη στοιχείων από πραγματικές σεισμικές βλάβες, οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας και τρωτότητας, καθώς και η απουσία κατάλληλων εργαλείων και μεθόδων για την πραγματοποίηση μελετών σεισμικής διακινδύνευσης. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί, διεθνώς, μέθοδοι αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων κοινής ωφέλειας που στοχεύουν στην κατά το δυνατό πιο ρεαλιστική εκτίμηση των πιθανών βλαβών για δεδομένο σεισμικό σενάριο.

Οι μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης των γεφυρών διακρίνονται σε αυτές που επικεντρώνονται στην αποτίμηση των δομικών βλαβών και συνοψίζονται παρακάτω και σε αυτές που λαμβάνουν υπόψη, εκτός από τις φυσικές βλάβες και τις επιπτώσεις στο οδικό δίκτυο, συνήθως σε όρους στάθμης εξυπηρευτικότητας ή οικονομικών απωλειών για συγκεκριμένα σεισμικά σενάρια. Ο σκοπός σε κάθε περίπτωση είναι να καταστεί εφικτός ο ορθολογικός προσεισμικός έλεγχος των υφιστάμενων γεφυρών και να καθοριστεί ο βαθμός προτεραιότητας των γεφυρών για περαιτέρω ελέγχους, ώστε τελικά να διαμορφωθεί η κατάλληλη στρατηγική τόσο προσεισμικής ενίσχυσής τους, όσο και αποκατάστασης των ζημιών μετά τον σεισμό. Υπό αυτή την έννοια, είναι φανερό πως ο βαθμός εφαρμογής των προσεγγίσεων που στοχεύουν στην αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης είναι γενικότερα συνηθισμένος με το επίπεδο της οικονομικής και τεχνολογικής ανάπτυξης της κοινωνίας στην οποία αναπτύσσονται και εφαρμόζονται.

Η εμπειρία από προηγούμενους καταστρεπτικούς σεισμούς στον ελληνικό χώρο είναι ενθαρρυντική, υπό την έννοια ότι οι γέφυρες δεν παρουσίασαν σημαντικές βλάβες. Ωστόσο, είναι απαραίτητη η ενδεδειγμένη και συστηματική μελέτη της σεισμικής τους διακινδύνευσης, αφού ο σεισμικός κίνδυνος είναι δεδομένος, ενώ πληθώρα γεφυρών δεν καλύπτουν τις σύγχρονες απαιτήσεις, καθώς μόλις την τελευταία δεκαετία έχει αναβαθμιστεί ουσιαστικά ο αντισεισμικός κανονισμός σχεδιασμού γεφυρών. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί αρκετές μεγάλου μήκους γέφυρες χωρίς να έχουν εκτεθεί σε σημαντικές σεισμικές δράσεις μέχρι τώρα, καθιστώντας απαραίτητη την εφαρμογή μεθόδων αποτίμησης της σεισμικής τους διακινδύνευσης.

7.2.2.Επισκόπηση μεθόδων αποτίμησης τρωτότητας γεφυρών

Η μελέτη της τρωτότητας των γεφυρών μπορεί να γίνει με μεθόδους, οι οποίες διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (Σ. Αργυρούδης και συνεργάτες, 2006):

- Εμπειρικές μέθοδοι βασισμένες σε στατιστική επεξεργασία πραγματικών στοιχείων. Οι καμπύλες τρωτότητας εκτιμώνται μετά από στατιστική επεξεργασία και χρησιμοποιούνται στοιχεία βλαβών που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενους σεισμούς, κυρίως στις Η.Π.Α. και την Ιαπωνία. Συνήθως, αναφέρονται σε διαφορετικές κατηγορίες γεφυρών, οι οποίες καθορίζονται με βάση την τυπολογία τους, καθώς γίνεται η παραδοχή πως κατασκευές με παρόμοια χαρακτηριστικά θα παρουσιάσουν παρόμοια συμπεριφορά για την ίδια σεισμική δράση.
- Μέθοδοι βασισμένες στην κρίση του μηχανικού. Σε περίπτωση όπου υπάρχει έλλειψη από στατιστικά στοιχεία, χρησιμοποιείται η εμπειρία ως εναλλακτικός τρόπος εκτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς των γεφυρών. Οι μέθοδοι αυτοί, βασίζονται στην στατιστική επεξεργασία της «κρίσης» εμπειρών μηχανικών για τη συμπεριφορά της κατασκευής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μητρώων πιθανότητας βλάβης και τελικά τον προσδιορισμό καμπύλων τρωτότητας για κάθε κατηγορία γεφυρών.
- Αναλυτικές μέθοδοι. Σε αυτές τις μεθόδους με τη βοήθεια αναλυτικών προσομοιωμάτων, από τα οποία, μέσω κατάλληλης συσχέτισης των υπολογιζόμενων μεγεθών απόκρισης με το βαθμό βλάβης προκύπτουν οι καμπύλες τρωτότητας. Η διαδικασία ανάλυσης περιλαμβάνει τα εξής στάδια: α) καθορισμός της εισαγόμενης σεισμικής κίνησης, β) προσομοίωση της γέφυρας, γ) καθορισμός του δείκτη και των σταθμών βλάβης, δ) εκτίμηση των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στην εκτίμηση της εισαγόμενης σεισμικής κίνησης και της αντοχής της κατασκευής, καθώς και στον καθορισμό του δείκτη και των σταθμών βλάβης, ε) υπολογισμός των καμπύλων τρωτότητας βάσει των αποτελεσμάτων της σεισμικής απόκρισης της γέφυρας. Η σεισμική απόκριση της γέφυρας μπορεί να προκύψει μέσω ανελαστικών δυναμικών αναλύσεων, δυναμικών φασματικών αναλύσεων ή στατικών ανελαστικών αναλύσεων.
- Μέθοδοι βασισμένες σε εμπειρικούς δείκτες τρωτότητας. Στοχεύουν σε μια προκαταρκτική ιεράρχηση κατάταξης των γεφυρών η οποία πραγματοποιείται βαθμολογώντας μέσω ενός ερωτηματολογίου τα κύρια χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη σεισμική συμπεριφορά μιας γέφυρας και υπολογίζοντας με αυτόν τον τρόπο έναν συνολικό δείκτη δομικής τρωτότητας. Αντίστοιχα, υπολογίζονται δείκτες που σχετίζονται με τη σεισμικότητα και το έδαφος και σε αρκετές περιπτώσεις με τη σπουδαιότητα της γέφυρας, εξάγοντας έτσι έναν συνολικό δείκτη διακινδύνευσης της κατασκευής. Η κατάταξη των γεφυρών γίνεται μέσω μιας συνάρτησης, προσθέτοντας ή πολλαπλασιάζοντας τις βαθμολογίες που έχουν δοθεί σε κάθε κατηγορία παραμέτρων, ενώ συχνά χρησιμοποιούνται συντελεστές βαρύτητας ώστε να συνυπολογιστεί η σημασία της κάθε παραμέτρου. Ο προσδιορισμός των επιμέρους βαθμολογιών έχει προκύψει είτε με την στατιστική επεξεργασία στοιχείων από βλάβες σε προηγούμενους σεισμούς, είτε με βάση την ποσοτικοποιημένη «κρίση» εμπειρών μηχανικών. Διάφορες τέτοιες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί διεθνώς, αλλά και στην Ελλάδα το 2002 από τον Ο.Α.Σ.Π..

Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε μεμονωμένες γέφυρες όσο και σε ένα απόθεμα γεφυρών, χωρίς συνήθως να απαιτούνται πολλά και λεπτομερή

στοιχεία, οπότε είναι δυνατή η γρήγορη προκαταρκτική αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης και ο καθορισμός του βαθμού προτεραιότητας για περαιτέρω έλεγχο. Οι μέθοδοι που βασίζονται σε καμπύλες τρωτότητας παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι συσχετίζουν άμεσα τη στάθμη σεισμικής διέγερσης με τη στάθμη των αναμενόμενων βλαβών με πιθανοτικό τρόπο. Ωστόσο, η αξιοπιστία τους εξαρτάται από την επάρκεια των στατιστικών στοιχείων, την πληρότητα και αξιοπιστία των αναλυτικών προσομοιωμάτων, αλλά και τον επαρκή καθορισμό των κατηγοριών τρωτότητας με βάση τα τυπολογικά χαρακτηριστικά (π.χ. αριθμός ανοιγμάτων, τύπος σύνδεσης βάρων-ανωδομής, έτος κατασκευής). Οι μέθοδοι των δεικτών τρωτότητας είναι λεπτομερέστερες των εμπειρικών-στατιστικών μεθόδων, αν και σε κάποιες περιπτώσεις απαιτούνται πολλά στοιχεία, ενώ από την εφαρμογή τους δεν προκύπτει σαφής εικόνα της στάθμης των αναμενόμενων βλαβών.

Παρακάτω περιγράφονται οι βασικές αρχές έξι μεθόδων αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης που βασίζονται σε εμπειρικούς δείκτες με προσπάθεια διαχωρισμού των επιμέρους δεικτών σε δείκτες τρωτότητας και σεισμικής επικινδυνότητας, καθώς και σε δείκτες που επηρεάζουν την διακινδύνευση (σε πολλές μεθόδους υπάρχει σχετική σύγχυση).

7.2.2.1. Μέθοδος της FHWA (Federal Highway Administration)

Η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων των Η.Π.Α., το 1995, εξέδωσε ένα εγχειρίδιο όπου προτείνεται μέθοδος για τον προσδιορισμό ενός δείκτη προτεραιότητας για σεισμική ενίσχυση. Η αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης (R) βασίζεται στην εκτίμηση της δομικής τρωτότητας (V) και της σεισμικής επικινδυνότητας (E), οι οποίες βαθμολογούνται από 0 έως 10, ενώ ο δείκτης σεισμικής διακινδύνευσης ($R=V \cdot E$) μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 100. Ο δείκτης δομικής τρωτότητας συντίθεται από τον δείκτη τρωτότητας εφεδράνων, συνδέσεων και εδράσεων, και τον δείκτη τρωτότητας μεσοβάρων, ακροβάρων και ρευστοποίησης εδάφους. Σύμφωνα με το προτεινόμενο σύστημα βαθμολόγησης οι δείκτες αυτοί παίρνουν τιμές από 0 έως 10 με βάση τη σεισμική κατηγορία της γέφυρας, τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της, την κατηγορία του εδάφους και την σεισμική επικινδυνότητα της αντίστοιχης θέσης. Ο δείκτης σεισμικής επικινδυνότητας εξαρτάται από την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε συνθήκες βράχου και την κατηγορία του εδάφους. Τελικά, ο δείκτης προτεραιότητας είναι συνάρτηση του δείκτη σεισμικής διακινδύνευσης (R) και της σπουδαιότητας της γέφυρας. Για τον προσδιορισμό της τελευταίας, δίνονται γενικές οδηγίες, χωρίς ωστόσο να προτείνεται συγκεκριμένος τρόπος υπολογισμού του αντίστοιχου δείκτη.

7.2.2.2. Μέθοδος του WSDOT (Washington State Department of Transportation)

Οι Babei & Hawkins (1991) προτείνουν ένα απλό μοντέλο για τον προσδιορισμό ενός δείκτη προτεραιότητας (I) για τη σεισμική ενίσχυση των γεφυρών στην πολιτεία της Washington, ως γινόμενο του δείκτη «κρισιμότητας» (C) και του δείκτη σεισμικής διακινδύνευσης (V). Ο δείκτης C εξαρτάται από την σπουδαιότητα των επί της, και υπό την, γέφυρα διερχόμενων οδών, των μεταφερόμενων δικτύων και της γέφυρας ως δομήματος. Ο δείκτης V (που λανθασμένα αναφέρεται ως δείκτης τρωτότητας) εξαρτάται από την σεισμική επικινδυνότητα και τη δομική τρωτότητα. Πιο συγκεκριμένα, είναι $V = 9.85 \cdot \{[(a) \cdot (K)] \cdot [SV]\} \cdot 0.41$, όπου:

a, ο συντελεστής που αντιπροσωπεύει την σεισμικότητα στη θέση της γέφυρας και είναι ίσος με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια,

K, ο συντελεστής προσαρμογής του a στην διάρκεια ζωής της γέφυρας, ώστε να προσδιοριστεί η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση με πιθανότητα υπέρβασης 10% εντός της εναπομένουσας διάρκειας ζωής της γέφυρας και

SV, ο συντελεστής που εκφράζει την δομική τρωτότητα της γέφυρας.

7.2.2.3.Μέθοδος των Pezeshk et al.

Η μέθοδος αυτή είναι μία απλοποιημένη μέθοδος βαθμολόγησης που αναπτύχθηκε το 1993 για την προκαταρκτική εξέταση της σεισμικής τρωτότητας των γεφυρών σε επαρχίες των Η.Π.Α.. Μία επιτροπή που αποτελούταν από μηχανικούς, επαγγελματίες και ακαδημαϊκούς, μετά από αξιολόγηση υφιστάμενων σχετικών μεθόδων, πρότεινε τα κριτήρια για την αποτίμηση της τρωτότητας και το σύστημα βαθμολόγησης. Στη μέθοδο αυτή, εξετάζονται ξεχωριστά η θεμελίωση, η κατασκευή και η σπουδαιότητα και η τελική βαθμολογία προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους βαθμολογιών. Η σεισμική επικινδυνότητα θεωρείται ενιαία για την περιοχή μελέτης, οπότε δεν ορίζεται αντίστοιχος δείκτης. Τελικά, οι γέφυρες με τη χαμηλότερη βαθμολογία θεωρούνται οι πιο τρωτές έναντι σεισμού.

7.2.2.4.Μέθοδος των Kawashima & Unjoh

Οι Kawashima & Unjoh (1990) συνδυάζοντας την έμπειρη κρίση με την στατιστική επεξεργασία στοιχείων για γέφυρες που υπέστησαν ή όχι βλάβες σε σεισμούς της Ιαπωνίας, ανέπτυξαν μια μέθοδο εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας που συνίσταται στην κατάταξη των γεφυρών σε τρεις κατηγορίες τρωτότητας (χαμηλής, μέσης και υψηλής) εφαρμόζοντας ένα σύστημα βαθμολόγησης των παραμέτρων που επηρεάζουν την σεισμική συμπεριφορά των γεφυρών. Εξετάζονται ξεχωριστά οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη υψηλής μετακίνησης μεταξύ ανωδομής και στηρίξεων και την αστοχία λόγω ανεπαρκούς αντοχής των βάθρων. Συνολικά, βαθμολογούνται 22 παράμετροι, ενώ τελικά με βάση τα αποτελέσματα για τα δύο αυτά κριτήρια γίνεται η κατάταξη σε μία από τις τρεις κατηγορίες τρωτότητας. Με βάση την αξιολόγηση της βαρύτητας των επιμέρους παραγόντων στην αποτίμηση του συνολικού βαθμού τρωτότητας παρατηρείται ότι οι πλέον σημαντικές παράμετροι είναι η ύπαρξη μηχανισμών παρεμπόδισης πτώσης της ανωδομής, οι τοπικές εδαφικές συνθήκες και η στάθμη του αντισεισμικού σχεδιασμού (που εκφράζεται μέσω του έτους κατασκευής). Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση εξαιρείται από το σύστημα βαθμονόμησης, καθώς σκοπός της μεθόδου είναι να εκτιμηθεί η σεισμική τρωτότητα γεφυρών για δεδομένη (ενιαία) σεισμική ένταση.

7.2.2.5.Μέθοδος του Kim

Ο Kim, το 1993 ανέπτυξε αρχικά μια κατά το δυνατό ομογενοποιημένη βάση δεδομένων για 109 γέφυρες που υπέστησαν βλάβες σε 13 σεισμούς μεταξύ του 1964 και 1991 ανά τον κόσμο και με τον τρόπο αυτό προσδιόρισε και ταξινομήσε τους παράγοντες που επηρεάζουν την σεισμική τους συμπεριφορά. Στη συνέχεια, αναλύοντας στατιστικά τις παρατηρήσεις, πρότεινε δύο μοντέλα εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης, τα οποία βασίζονται στην βαθμολόγηση 12 συνολικά παραμέτρων, λαμβάνοντας υπόψη στην τελική αποτίμηση την σχετική βαρύτητα της

καθεμίας. Έτσι, προκύπτει ένας δείκτης σεισμικής διακινδύνευσης (y_i) ο οποίος αντιστοιχεί σε μία κατηγορία βαθμού διακινδύνευσης και σε μία στάθμη αναμενόμενης βλάβης. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στην προτεινόμενη μέθοδο είναι η σεισμική ένταση, η στάθμη του αντισεισμικού σχεδιασμού, ο τύπος της ανωδομής, η λοξότητα / καμπυλότητα της ανωδομής, η ύπαρξη ενδιάμεσων αρθρώσεων, ο τύπος των βάθρων, ο τύπος της θεμελίωσης, το υλικό, η ανισοϋψία των βάθρων, οι τοπικές εδαφικές συνθήκες, η επιρροή της ρευστοποίησης, και το μήκος έδρασης. Ο καθορισμός της σχετικής βαρύτητας της κάθε παραμέτρου στην αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης, σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο, δείχνει πως οι πιο σημαντικοί παράγοντες είναι η σεισμική ένταση (31,4%), η επιρροή της ρευστοποίησης (20,5%), το επίπεδο σχεδιασμού (10,4%) και το πλάτος έδρασης (8,7%). Στη συγκεκριμένη μέθοδο, όπως και στην αμέσως προηγούμενη, δεν λαμβάνεται υπόψη η σπουδαιότητα της γέφυρας, οπότε η τελική βαθμολογία δεν δίνει απευθείας το δείκτη προτεραιότητας για περαιτέρω έλεγχο της σεισμικής επάρκειας και πιθανή λήψη μέτρων προσεισμικής ενίσχυσης, όπως συμβαίνει στις άλλες μεθόδους.

7.2.2.6. Μέθοδος του Ο.Α.Σ.Π., 2002

Η μέθοδος που προτάθηκε το 2002 από τον Ο.Α.Σ.Π. για τις γέφυρες συνίσταται σε έναν προκαταρκτικό έλεγχο κατά τον οποίο υπολογίζεται ο δείκτης σεισμικής διακινδύνευσης των γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Με βάση αυτό το δείκτη, αξιολογείται κατά πόσον απαιτείται περαιτέρω λεπτομερής έλεγχος τρωτότητας για την υπό μελέτη γέφυρα. Στη μέθοδο αυτή, οι γέφυρες κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τη σπουδαιότητά τους και τη ζώνη επικινδυνότητας στην οποία ανήκουν. Η μέθοδος του Ο.Α.Σ.Π. βασίζεται στη μέθοδο που ανέπτυξε η FHWA (Federal Highway Administration) στις Η.Π.Α., το 1995. Ο συνολικός δείκτης σεισμικής διακινδύνευσης (T), εκφράζεται ως

$$T = (0.4 \cdot \Delta + 0.6 \cdot \Sigma) \cdot E \leq 100, \text{ όπου:}$$

Δ , ο δείκτης δομικής τρωτότητας με $\Delta = 0.35 \cdot \Delta_1 + 0.25 \cdot \Delta_2 + 0.25 \cdot X + 0.15 \cdot \Gamma$

Δ_1 , ο δείκτης τρωτότητας εφεδράνων, συνδέσεων και εδράσεων της γέφυρας,

Δ_2 , ο δείκτης τρωτότητας μεσοβάθρων, ακροβάθρων και ρευστοποίησης εδάφους,

X , ο δείκτης χρονολογίας της μελέτης και

Γ , ο δείκτης γενικής κατάστασης της γέφυρας.

Οι δείκτες αυτοί παίρνουν τιμές από 0 έως 10 ανάλογα με τη σεισμική κατηγορία της γέφυρας, τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της, καθώς και του εδάφους και την σεισμική επικινδυνότητα της αντίστοιχης θέσης ακολουθώντας τη μεθοδολογία της FHWA, προσαρμοσμένη κατά περίπτωση στα ελληνικά δεδομένα.

Σ , ο δείκτης σπουδαιότητας, ο οποίος αξιολογεί την κοινωνική, οικονομική και στρατηγική σημασία της γέφυρας,

E , ο δείκτης σεισμικής επικινδυνότητας, $E = 11.6 \cdot \alpha \cdot S \leq 10$, όπου:

α , η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ανάλογα με τη ζώνη του Ν.Ε.Α.Κ. και

S , ο συντελεστής που εξαρτάται από την κατηγορία του εδάφους.

Στη μέθοδο του Ο.Α.Σ.Π., δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός της δομικής τρωτότητας και της σεισμικής επικινδυνότητας, διότι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) υπάρχει και στα στάδια της εκτίμησης του δείκτη σεισμικής επικινδυνότητας και στο στάδιο του υπολογισμού της δομικής τρωτότητας.

7.2.3. Αρχές διαμόρφωσης φορέων γεφυρών

Για την βελτίωση της απόκρισης των κατασκευών στις αναμενόμενες ισχυρές σεισμικές δονήσεις, αλλά και προκειμένου να αναπτυχθεί η ικανότητα των φορέων να αναλάβουν περιορισμένες διαφορικές μετακινήσεις των βάθρων τους, η διαμόρφωση του φορέα των γεφυρών πρέπει να διέπεται από τις παρακάτω αρχές:

- α) ελαφρότητα κατασκευής,
- β) ευκαμψία ή παραμορφωσιμότητα των φορέων,
- γ) ευκολία επισκευών και
- δ) οικονομία.

Η πρώτη αρχή εκπληρώνεται με τον οικονομικότερο τρόπο με την επιλογή σχεδιασμού σύμμικτου καταστρώματος για τις γέφυρες. Για την εκπλήρωση της δεύτερης απαίτησης συνίσταται η επιλογή ισοστατικών φορέων (γέφυρες με αμφιέριστα ανοίγματα). Προκειμένου να αυξηθεί η ευστρεφία του καταστρώματος, συνίσταται η χρήση ανοικτής και όχι κιβωτοειδούς διατομής και ο περιορισμός των διαδοκίδων στο απαραίτητο. Η πλάκα του καταστρώματος προτείνεται να προενταθεί εγκάρσια για τη μείωση του πάχους της και τον περιορισμό της ρηγμάτωσης.

Όσον αφορά στα βάθρα των γεφυρών, προτείνεται να σχεδιαστούν σαν δίστυλα πλαίσια, για την αύξηση της πλαστιμότητάς τους, ενώ προτείνεται ο σχεδιασμός τους να επιδιώξει την σταδιακή μείωση των διατομών των βάθρων από τα υψηλά μεσόβαθρα προς τα χαμηλά βάθρα κοντά στα ακρόβαθρα, έτσι ώστε να μην αλλάζει δραστικά η δυσκαμψία κατά μήκος της γέφυρας. Για την αποφυγή της ενίσχυσης των σεισμικών δονήσεων στα επιχώματα των ακροβάθρων που οδηγούν σε αυξημένες ωθήσεις στους τοίχους αντιστήριξης των ακροβάθρων και αυξάνουν τον κίνδυνο δυναμικής συνίζησης του υλικού των επιχωμάτων πρόσβασης, συνίσταται ο περιορισμός των υψών των επιχωμάτων προσέγγισης των γεφυρών, επιλογή που θα έχει μικρή επίπτωση στην αύξηση του συνολικού μήκους των γεφυρών. Η επιλογή του τύπου θεμελίωσης δεν μπορεί να γίνει πριν ολοκληρωθεί η γεωτεχνική διερεύνηση. Πάντως, πρέπει να ληφθούν μέτρα (περιορισμός επιβαλλόμενων τάσεων ή βελτίωση του εδάφους) για την αποφυγή απώλειας αντοχής ή αστοχίας του εδάφους θεμελίωσης κατά τη σεισμική επιπόνηση, όπως επίσης και της επιλογής μιας σχετικά δύσκαμπτης θεμελίωσης για τον περιορισμό των στροφών των βάθρων, που, λόγω του μεγάλου τους ύψους, θα έχουν αποτέλεσμα μεγάλες μετακινήσεις της κεφαλής των βάθρων.

Η απαίτηση για ευκολία επισκευών σε περίπτωση ιδιαίτερα έντονης σεισμικής φόρτισης, ικανοποιείται με τον προσδιορισμό επιτρεπτών μορφών αστοχίας, για παράδειγμα, καταστροφές εφεδράνων, αλλά όχι κατάπτωση καταστρώματος ή υπερβολικά μεγάλες μετακινήσεις που οδηγούν σε φαινόμενα αστάθειας, ενώ πρέπει να υπάρξει και κατάλληλη πρόβλεψη για την αποκατάσταση των βλαβών αυτών. Η διαμόρφωση πολλαπλών ανεξάρτητων ανοιγμάτων επιτρέπει τον περιορισμό των βλαβών σε συγκεκριμένα ανοίγματα και αποτρέπει τις αλυσιδωτές μορφές αστοχίας που μπορούν να οδηγήσουν σε πλήρη απώλεια του τεχνικού έργου.

7.3. Σήραγγες

7.3.1. Εισαγωγή

Τα υπόγεια έργα εμφανίστηκαν στον Ελλαδικό χώρο πολύ νωρίς. Υπόγεια συγκοινωνιακά έργα με τη μορφή σιδηροδρομικών σιηράγγων, εμφανίζονται στην

Ελλάδα κατά την περίοδο ανάπτυξης των ελληνικών σιδηροδρόμων. Σε περιορισμένη έκταση υπόγεια έργα αναπτύσσονται πριν από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα κατά την κατασκευή του μητροπολιτικού σιδηροδρόμου της Αθήνας και στις σχεδιαζόμενες επεκτάσεις των ελληνικών σιδηροδρόμων. Τη δεκαετία του '70, δειλά αρχίζουν να εμφανίζονται και οι πρώτες πολύ μικρές σε μήκος, οδικές σήραγγες, όπως αυτές στους δρόμους προς το Σούνιο, στη Φιλιπιάδα, στους Δελφούς και στην Κρήτη, ενώ τη δεκαετία του '80 αρχίζουν οι κατασκευές των μεγάλων οδικών σιδηράγγων του Μετσόβου, της Εγνατίας οδού και του Αρτεμισίου στην Πελοπόννησο. Η δεκαετία του '90 και ειδικά η περίοδος των τελευταίων χρόνων της δεκαετίας, θα μπορούσε να θεωρηθεί σημαντικότερη περίοδος ανάπτυξης των οδικών υπόγειων έργων με αιχμή του δόρατος της ανάπτυξης, το σύνολο των υπόγειων έργων της Εγνατίας οδού.

Η Ελλάδα, ως γνωστόν, είναι εξόχως ορεινή χώρα με έντονο ανάγλυφο. Η βελτίωση του οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου της, δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την κατασκευή πολυάριθμων σιδηράγγων, η εξόρυξη των οποίων συνήθως δεν αποτελεί απλό εγχείρημα. Οι σήραγγες αποτελούν έργα που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής από πλευράς μηχανικού, όμως άρρηκτα συνδεδεμένα όσο κανένα άλλο τεχνικό έργο με τις τεχνικο-γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες του χώρου διέλευσης, από το στάδιο σχεδιασμού του έργου μέχρι το στάδιο λειτουργίας του.

Η Ελλάδα μέχρι το 1999 είχε ελάχιστες οδικές σήραγγες, με μεγαλύτερη τη σήραγγα Αρτεμισίου, μήκους περίπου 1300 μέτρων. Σήμερα, όμως, η κατάσταση αυτή έχει αλλάξει λόγω των μεγάλων αναπτυξιακών έργων που έχουν υλοποιηθεί, όπως η Εγνατία οδός (680 χλμ.), η Αττική οδός (65 χλμ.) και ο Π.Α.Θ.Ε. (780 χλμ.). Ο αριθμός των εν λειτουργία οδικών σιδηράγγων το 2010 ξεπέρασε τις 100 με μήκη έως και 5000 μέτρα.

Λαμβάνοντας υπόψη τη σεισμικότητα της χώρας μας, είναι αναγκαία η μελέτη των ιδιοτεροτήτων και της συμπεριφοράς των οδικών σιδηράγγων έναντι σεισμού. Οι υπόγειες κατασκευές θεωρούνται γενικά ασφαλείς κατά τη διάρκεια των σεισμών, κυρίως λόγω της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς τους στο παρελθόν. Πολλές σήραγγες έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί χωρίς να λαμβάνονται υπόψη σεισμικές δράσεις. Εντούτοις, τα τελευταία χρόνια και μετά την πλήρη κατάρρευση του υπόγειου σταθμού του μετρό Dakaί το 1995 στο Kobe της Ιαπωνίας, έγινε αισθητή η ανάγκη συνυπολογισμού των σεισμικών φορτίσεων στον σχεδιασμό υπόγειων έργων. Η κατάρρευση τμήματος μήκους 400 μέτρων της δίδυμης σιδηράγγας Bolu στην Τουρκία κατά τον σεισμό του Duzce το 1999 επιβεβαιώνει την ανάγκη αυτή.

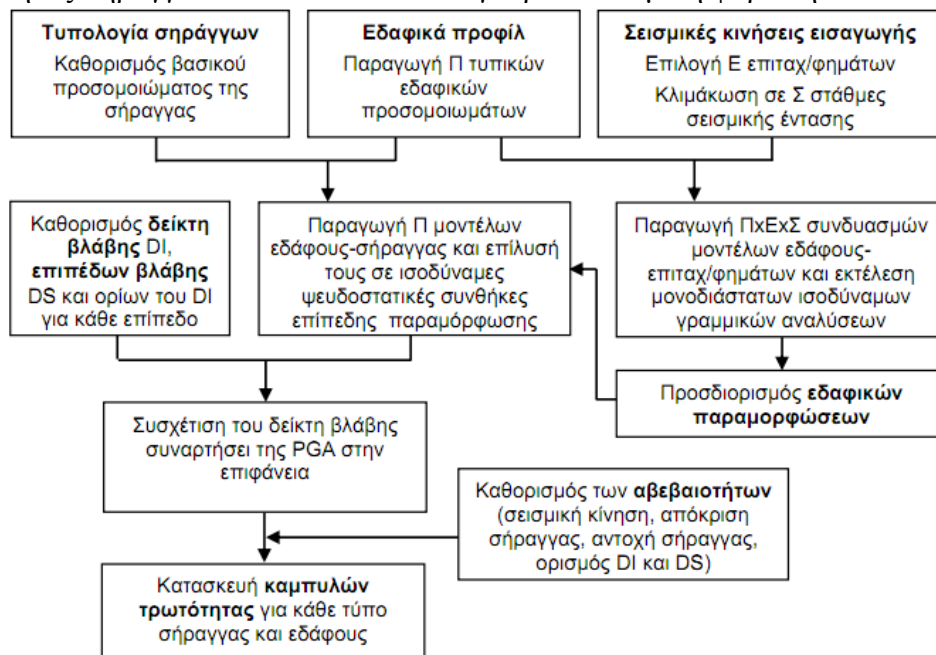
7.3.2.Επισκόπηση μεθόδων αποτίμησης τρωτότητας σιδηράγγων

Κατά καιρούς, ανά τον κόσμο έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των σιδηράγγων. Η American Lifelines Alliance (ALA, 2002) προτείνει εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης για σήραγγες ολομέτωπης διάνοιξης και cut & cover, που ταξινομούνται ποιοτικά με βάση τις γενικότερες συνθήκες της κατασκευής (καλή ή μέτρια/κακή) και του εδάφους (βράχος ή αλούβια). Οι καμπύλες προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία στοιχείων από σεισμικές βλάβες σε 217 σήραγγες διαφόρων χρήσεων. Στην μεθοδολογία του HAZUS (NIBS, 2004) περιλαμβάνονται καμπύλες τρωτότητας για σήραγγες ολομέτωπης διάνοιξης και cut & cover εκφρασμένες σε όρους μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης και μόνιμης εδαφικής μετακίνησης. Οι καμπύλες στηρίζονται σε σεισμικές βλάβες που περιγράφονται από τους Dowding and Rozen (1978) και Owen and Scholl (1981). Τα επίπεδα βλάβης στις παραπάνω περιπτώσεις ορίζονται

με ποιοτικό τρόπο, με βάση κυρίως την έκταση των ρωγμών της επένδυσης της σήραγγας και διακρίνονται σε μικρές, μέτριες, εκτεταμένες και πλήρεις βλάβες. Τονίζεται το γεγονός ότι οι εμπειρικές καμπύλες δεν λαμβάνουν υπόψη τον τύπο του εδάφους, ενώ αναφέρονται σε όλους τους τύπους βλαβών και όχι μόνο κατά την εγκάρσια διεύθυνση της διατομής, οπότε είναι μάλλον γενικευμένες εκφράζοντας μια μέση συμπεριφορά των σήραγγων έναντι σεισμικής δράσης.

Το 2008 οι Σ. Αργυρούδης και Κ. Πιτιλάκης, πρότειναν νέες καμπύλες τρωτότητας για σήραγγες μικρού βάθους σε αλουβιακές αποθέσεις, μέσω μιας αναλυτικής μεθοδολογίας βασισμένης σε μια αριθμητική προσέγγιση, κατά την οποία η σήραγγα υποβάλλεται σε εγκάρσια σεισμική φόρτιση. Η απόκριση της κατασκευής υπολογίζεται σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, για την κινηματική φόρτιση που προκύπτει από την εδαφική ταλάντωση και ειδικότερα από τις εδαφικές παραμορφώσεις που εν είδη καταναγκασμού επιβάλλονται στην σήραγγα. Πιο συγκεκριμένα, οι εδαφικές παραμορφώσεις που προκύπτουν μέσω μονοδιάστατων ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων για διάφορα σεισμικά σενάρια επιβάλλονται στα όρια του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων που περιλαμβάνει τόσο την σήραγγα όσο και το έδαφος. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά τυπικά εδαφικά προφίλ και γεωμετρικές σήραγγων, ενώ εισήχθησαν σεισμικές κινήσεις με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο, κλιμακωμένες σε διαφορετικές στάθμες σεισμικής έντασης. Ορίζοντας διαφορετικά επίπεδα βλάβης με βάση το ποσοστό υπέρβασης της αντοχής της υπό μελέτη διατομής, προέκυψαν καμπύλες τρωτότητας ως συνάρτηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους. Ελήφθησαν, επίσης, υπόψη και οι αβεβαιότητες που υπεισέρχονται σε μια τέτοια προσέγγιση και οι οποίες σχετίζονται με την εισαγόμενη σεισμική κίνηση, την αντοχή της διατομής και τον προσδιορισμό των επιπέδων βλάβης.

Στο σχήμα 7.3 δίνονται τα επιμέρους βήματα της μεθοδολογίας που προτάθηκε από τους Σ. Αργυρούδη και Κ. Πιτιλάκη το 2008 για την εξαγωγή αναλυτικών καμπύλων τρωτότητας σήραγγων που υπόκεινται σε εγκάρσια σεισμική φόρτιση.



Σχήμα 7.3: Μεθοδολογία για την κατασκευή καμπύλων τρωτότητας σήραγγων μικρού βάθους, Σ. Αργυρούδης, Κ. Πιτιλάκης, 2008.

7.3.3.Γενική θεώρηση σχεδιασμού

Για τον σχεδιασμό των φορέων των σηράγγων θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη οι εξής περιπτώσεις φόρτισης:

- α) παραμορφώσεις λόγω διάδοσης των σεισμικών (διατμητικών κυρίως) κυμάτων και/ή επιπρόσθετες σεισμικές ωθήσεις γαιών,
- β) παραμορφώσεις και διαφορικές καθιζήσεις επαγόμενες από ενδεχόμενες κινήσεις δευτερευόντων σεισμικών ρηγμάτων.

Η περίπτωση της ρευστοποίησης ή γενικότερα απώλειας της αντοχής του εδάφους στην περιοχή των σηράγγων με εκσκαφή και επανεπίχωση, με συνακόλουθες μετακινήσεις πολλών δεκάδων εκατοστών πρέπει να διερευνηθεί υπό το φως των στοιχείων της γεωτεχνικής διερεύνησης και να αντιμετωπιστεί, αν χρειαστεί, με βελτίωση του περιβάλλοντος εδάφους και των συνθηκών ευστάθειας.

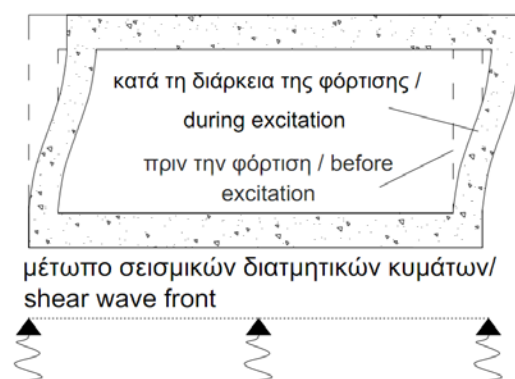
Για τη διαστασιολόγηση των υπόγειων φορέων έναντι σεισμικών δράσεων δεν υπάρχει πλήρες και συνεπές πλαίσιο κανονισμών. Ελλείψει συγκεκριμένων κανονισμών η ανάλυση γίνεται σε πολλές περιπτώσεις με βάση όσα προβλέπει ο Ν.Ε.Α.Κ. για κατασκευές αντιστήριξης με κατάλληλες προσαρμογές.

7.3.4.Χαρακτηριστικά υπόγειων σηράγγων στο σεισμό

Τα χαρακτηριστικά των υπόγειων κατασκευών, όπως ο πλήρης εγκιβωτισμός τους σε εδάφη ή βράχο και το σημαντικό τους μήκος σε σχέση με τη διατομή τους, καθιστούν την σεισμική τους συμπεριφορά διαφορετική από αυτή των συνήθων επιφανειακών κατασκευών. Συνεπώς, ο σχεδιασμός υπόγειων έργων έναντι σεισμικών δράσεων διαφέρει από τον αντισεισμικό σχεδιασμό των συνήθων επιφανειακών έργων.

Γενικώς, τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού για τις υπόγειες κατασκευές επιβάλλονται σε όρους παραμόρφωσης και τάσεων στην κατασκευή από το περιβάλλον έδαφος. Αντιθέτως, οι επιφανειακές κατασκευές σχεδιάζονται για τις αδρανειακές δυνάμεις που προκαλούνται από τις εδαφικές επιταχύνσεις. Εγκιβωτισμένες στο έδαφος, οι υπόγειες κατασκευές, είναι αναγκασμένες να παρακολουθούν, σε κάποιο βαθμό, τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις του εδάφους κατά τη διάρκεια του σεισμού. Τα κύρια αίτια του σεισμικού κινδύνου για τις υπόγειες κατασκευές είναι η ρευστοποίηση, η διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων, οι κατολισθήσεις που προκαλούνται από σεισμό και η ένταση της σεισμικής δόνησης. Ως προς την παρατηρηθείσα σεισμική συμπεριφορά των υπόγειων κατασκευών μπορούν να γίνουν οι παρακάτω γενικές παρατηρήσεις: α) η ένταση των βλαβών μειώνεται με την αύξηση των υπερκείμενων και β) οι σήραγγες που κατασκευάζονται σε έδαφος είναι πιο ευάλωτες σε σχέση με αυτές που διανοίγονται σε υγρή βράχο.

Στην περίπτωση των ορθογωνικών σηράγγων, η βασική μορφή παραμόρφωσης είναι εγκάρσια παραμόρφωση τύπου racking, η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.4: Παραμόρφωση τύπου racking, Κ. Πιτιλάκης, Γ. Τσινίδης, Α. Χαλάτης, Ε. Κίρτας, 2010.

Η σεισμική απόκριση των κατασκευών αυτών εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό, από την ανάπτυξη των διατμητικών τάσεων περιμετρικά της κατασκευής κατά τη διάρκεια του σεισμικού φαινομένου. Η προσομοίωση των τάσεων αυτών συναρτάται με τις παρακάτω δύο συνθήκες επαφής εδάφους- σήραγγας:

- Δυνατότητα πλήρους ολίσθησης. Σε αυτή την περίπτωση δεν αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις περιμετρικά της κατασκευής και η κατασκευή δύναται να ολισθήσει ελεύθερα πάνω στο έδαφος.
- Πλήρης σύνδεση μεταξύ κατασκευής – εδάφους, μηδενική ολίσθηση. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει δυνατότητα σχετικής ολίσθησης κατασκευής-εδάφους και η κατασκευή ακολουθεί πλήρως το έδαφος.

Η πραγματική κατάσταση βρίσκεται βέβαια κάπου ενδιάμεσα. Μπορεί να υπάρχουν αποκολλήσεις ή ολισθήσεις της κατασκευής σε κάποια τμήματα, ενώ σε άλλα να αναπτύσσονται ικανές διατμητικές τάσεις, που όμως θα πρέπει να παραμένουν μικρότερες της οριακής αντοχής του εδάφους, ή έστω της οριακής τριβής στη διεπιφάνεια.

Η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων εξαρτάται προφανώς από την οριακή αντοχή του εδάφους, σε συνδυασμό με την αναπτυσσόμενη διατμητική παραμόρφωση. Και τα δύο εξαρτώνται από την ένταση και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής φόρτισης και την απόκριση της κατασκευής, όπως βρίσκεται εγκιβωτισμένη στο έδαφος. Η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους και κατασκευής είναι το επόμενο κομβικό σημείο στη μελέτη σηράγγων. Θα πρέπει, λοιπόν, η μέθοδος ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί να λαμβάνει υπόψη της τα παραπάνω.

Από την εμπειρία που έχει αποκομιστεί τις τελευταίες δεκαετίες, έχει παρατηρηθεί ότι η απόκριση των υπόγειων κατασκευών κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική. Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι δεν έχουν παρατηρηθεί πολλές και συνάμα σοβαρές βλάβες. Η συμπεριφορά των σηράγγων έχει άμεση σύνδεση με το είδος του εδάφους εντός του οποίου είναι κατασκευασμένη. Συνεπώς, κατά τη μελέτη κατασκευής μιας σήραγγας οι γεωλογικές και γεωτεχνικές αναλύσεις του εδάφους στην περιοχή, είναι καθοριστικής σημασίας σε όλα τα στάδια της μελέτης.

7.3.5.Συμπεριφορά σήραγγων ανάλογα με το έδαφος θεμελίωσης

7.3.5.1.Σήραγγες σε βραχώδη εδάφη

Γενικά οι σήραγγες που είναι κατασκευασμένες σε βραχώδη εδάφη δεν είναι ιδιαίτερα ευπαθείς. Έτσι, οι βλάβες αρχίζουν να παρουσιάζονται για σεισμική διέγερση με PGA μεγαλύτερη από 0.20 - 0.25g. Ιδιαίτερη όμως ευπάθεια επιδεικνύουν στις εισόδους και εξόδους από τους σταθμούς (στόμια) και στις ζώνες μετάβασης από το ένα εδαφικό υλικό στο άλλο και ιδιαίτερα όταν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των μέτρων ελαστικότητας των υλικών και επομένως της δυσκαμψίας. Ένα άλλο σημείο ευπάθειας είναι και οι θέσεις διασταύρωσης με σεισμικώς ενεργά ρήγματα. Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να επιδεικνύεται και σε διατάξεις που απέχουν πολλαπλάσια του μήκους κύματος S, P, SW(R) στη βραχώμαζα.

7.3.5.2.Σήραγγες σε μαλακά εδάφη

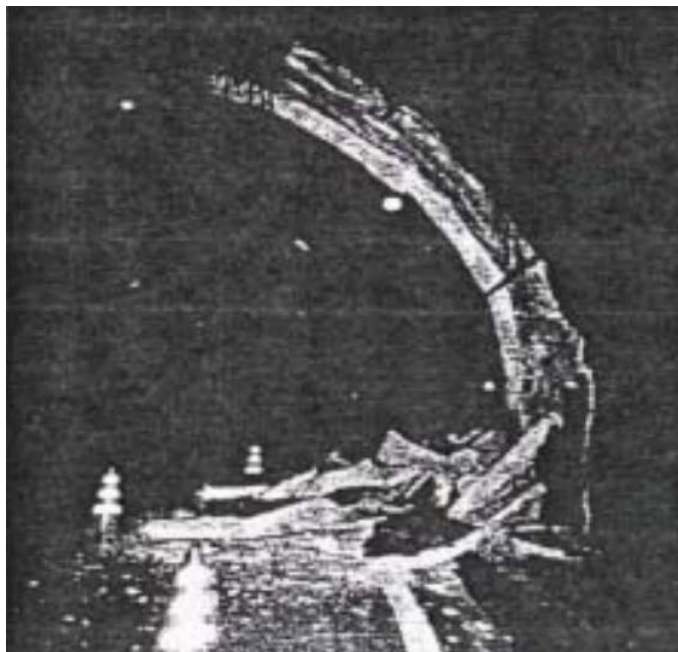
Είναι πιο ευπαθείς σε σχέση με τις σήραγγες της προηγούμενης κατηγορίας, ακόμα και για μικρότερης έντασης σεισμική διέγερση. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στις μεταβατικές ζώνες των εδαφικών υλικών. Ένα επιπλέον πρόβλημα που δεν υπάρχει στις υπόγειες κατασκευές σε βραχώδη εδάφη είναι αυτό της άνωσης. Η άνωση, είτε ως στατικό φορτίο, είτε ως σεισμικό λόγω της ρευστοποίησης που ενδεχομένως να προκύψει εξαιτίας της σεισμικής διέγερσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη με προσοχή. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά το στάδιο της κατασκευής όπου τα ανωστικά φορτία μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στην πλάκα της θεμελίωσης. Τέλος, όπως και στις κατασκευές της προηγούμενης κατηγορίας, και εδώ απαιτείται προσοχή στις διασταυρώσεις με σεισμικώς ενεργά ρήγματα, καθώς και στους αρμούς που απέχουν πολλαπλάσια του μήκους κύματος.

7.3.6.Παραδείγματα σεισμικών αστοχιών για οδικό δίκτυο και ΜΕΤΡΟ

Ο σεισμός του Duzce, Τουρκία, στις 12 Νοεμβρίου 1999 προκάλεσε κατάρρευση και των δύο κλάδων της οδικής σήραγγας Bolu, σε μήκος 300 m από το ανατολικό στόμιο. Οι σήραγγες έχουν συνολικό μήκος 3.3 χλμ. και διαστάσεις 15 μέτρα ύψος και 16 μέτρα πλάτος περίπου. Η διάνοιξη ήταν ιδιαίτερος δυσχερής καθώς το έργο διασχίζει πολλά μικρά ρήγματα, παράλληλα με το ρήγμα της Ανατολίας. Κατά τον σεισμό, ή μόνιμη επένδυση είχε τοποθετηθεί σε μήκος περίπου 300 μέτρα, ενώ είχαν διανοιχθεί περίπου 800 μέτρα συνολικά. Η κατάρρευση έλαβε χώρα εντός αργιλώδους εδάφους, σε τμήμα της σήραγγας στο οποίο δεν είχε ακόμα τοποθετηθεί η μόνιμη επένδυση. Η προσωρινή επένδυση του τμήματος αυτού περιελάμβανε εκτοξευμένο σκυρόδεμα και αγκύρια. Διάφοροι μηχανισμοί έχουν προταθεί ως εξήγηση για την κατάρρευση, όπως ισχυρή εδαφική κίνηση, μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του υλικού πλήρωσης του ρήγματος και κατολίσθηση.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ικανοποιητικής συμπεριφοράς των υπόγειων κατασκευών είναι η περίπτωση του σεισμού Hyogoken – Nanbu (17/1/1995). Κατά τον σεισμό αυτό, σε υπό κατασκευή σήραγγα που ήταν κοντά στο επίκεντρο, με επικεντρική απόσταση 4 χλμ., συνέβη μόνο μικρή μετακίνηση του τόξου της διατομής και περιορισμένες αποκολλήσεις τμημάτων της επένδυσης. Σε αντίθεση με αυτό, το τετράωρο κτήριο που βρισκόταν στην επιφάνεια ακριβώς πάνω από τη σήραγγα, κατέρρευσε.

Στη σήραγγα Bentaki όμως, ένα τμήμα του σκυροδέματος επικάλυψης του ημικυκλικού τόξου και του πλευρικού τοίχου (από άοπλο σκυρόδεμα) κατέπεσε σε πλάτος 3 μέτρα (εικόνα 7.1). Σε απόσταση 80 μέτρα από το παραπάνω σημείο, εμφανίστηκε θλιπτικού τύπου αστοχία στο οπλισμένο σκυρόδεμα του κελύφους και λυγισμός των οπλισμών. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη μορφή αστοχίας, πιθανώς να υπήρξε δυσμενής δράση, ισχυρής κατακόρυφης σεισμικής δύναμης .



Εικόνα 7.1: Αστοχία της επένδυσης της σήραγγας, Π. Ματσούκας, Β. Φλεντζούρης, 2007.

Περίπτωση κατάρρευσης έλαβε χώρα στη σήραγγα Kinura που απείχε 26 χλμ. από το επίκεντρο του σεισμού Noto Peninsular Offshore (1993). Το πλάτος της ήταν 6 μέτρα και το ύψος της 4 μέτρα, ενώ το σχήμα της ήταν σχήμα οπλής αλόγου. Η τελική υποστήριξη αποτελούνταν από μη οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 30 cm. Κατά τη σεισμική δόνηση αρχικά κατέρρευσε το τόξο της επένδυσης που βρισκόταν σε απόσταση 21 μέτρων από την είσοδο, ενώ σταδιακά και σε διάστημα 2 ημερών κατέρρευσαν και τα υπόλοιπα τμήματα της σήραγγας.

Οι περισσότερες σήραγγες στην κεντρική Ταϊβαν, λόγω του σεισμού Chi-Chi (21/9/1999), έμειναν σχεδόν ανέπαφες, με την εμφάνιση μόνο περιορισμένων θραύσεων και ρηγμάτων. Οι κυριότερες ζημιές περιορίστηκαν σε αστοχίες από ολίσθηση στις εισόδους των σηράγγων, με αποτέλεσμα το μπλοκάρισμά τους.

Το δίκτυο METPO του Los Angeles κατασκευάστηκε σε διάφορα στάδια, ορισμένα από τα οποία, ήδη ήταν υπό λειτουργία κατά τη διάρκεια του σεισμού του Northridge το 1994. Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση που καταγράφηκε κοντά στις διατομές που υπέστησαν βλάβες ήταν της τάξης του 0,3g. Οι βλάβες που παρατηρήθηκαν ήταν ρηγματώσεις του σκυροδέματος της επένδυσης της σήραγγας.

Ο σεισμός του Hyogoken - Nambu (Ιαπωνία) έγινε στις 17 Ιανουαρίου 1995 και προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές σε πολλές κατασκευές. Όπως προέκυψε από τις μετρήσεις του Ιαπωνικού Μετεωρολογικού Ινστιτούτου η σεισμική ένταση του συγκεκριμένου γεγονότος ξεπέρασε το X της κλίμακας Mercalli. Μεταξύ άλλων, παρατηρήθηκαν ζημιές και κατάρρευση τμήματος του υπόγειου σταθμού Dakai της μιας κύριας γραμμής του METPO του Kobe. Ο συγκεκριμένος σταθμός, είναι

κιβωτιοειδής πλαισιακή κατασκευή με υποστυλώματα στο κέντρο της διατομής και εξωτερικές διαστάσεις πλάτους 17 μέτρα, ύψους 7,2 μέτρα και μήκους 120 μέτρα. Ο σταθμός σχεδιάστηκε το 1962 και δεν περιείχε ιδιαίτερες προβλέψεις αντισεισμικού σχεδιασμού. Είναι η πρώτη σύγχρονη σχετικά υπόγεια κατασκευή που αστοχεί υπό σεισμικά φορτία. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πλήρης αστοχία σε περισσότερα από τα μισά υποστυλώματα της κεντρικής συστοιχίας. Το γεγονός αυτό οδήγησε και στην κατάρρευση της πλάκας οροφής, με επακόλουθο την καθίζηση του υπερκείμενου εδάφους περισσότερο από 2,5 μέτρα, ενώ η πλάκα θεμελίωσης υπέστη ελάχιστες και ελαφρές βλάβες. Τα υποστυλώματα, που ήταν σχεδιασμένα με οπλισμό διάτμησης μορφής zigzag επιπρόσθετο του αραιά διατεταγμένου περιμετρικού συνδετήρα, παρουσίασαν καλύτερη συμπεριφορά σε σύγκριση με τα υποστυλώματα από τα οποία απουσίαζε ο οπλισμός αυτός. Επίσης, παρατηρήθηκαν και εκτεταμένες διαγώνιες ρηγματώσεις σε τοίχους οπλισμένου σκυροδέματος κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Οι τοίχοι αυτοί, κατά τη διάρκεια του σεισμού, λειτούργησαν ως διατμητικοί τοίχοι και απέτρεψαν την πλήρη κατάρρευση της κατασκευής. Τα υποστυλώματα που βρίσκονταν στην περιοχή των δύσκαμπτων αυτών στοιχείων δεν υπέστησαν τις ζημιές που παρατηρήθηκαν στην κεντρική περιοχή. Όπως προκύπτει από τις βλάβες που προκλήθηκαν, η κατασκευή δέχτηκε μεγάλη οριζόντια δύναμη από το περιβάλλον έδαφος. Η σχετική μετακίνηση του άνω και κάτω επιπέδου της κατασκευής, κατά τη διάρκεια του σεισμού και η αδρανειακή δύναμη του υπερκείμενου εδάφους που μεταφέρθηκε από αυτό στην πλάκα οροφής, θεωρήθηκε ότι προκάλεσαν τις δεδομένες βλάβες. Δεν υπήρξε ξεκάθαρη ένδειξη της επιρροής της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού. Η καθίζηση του εδάφους εξαπλώθηκε σε μια περιοχή μήκους 90 μέτρων και πλάτους 23 μέτρων με μέγιστη τιμή πάνω από 2,5 μέτρα. Επίσης, καθίζηση κατά διάρκεια του σεισμού παρατηρήθηκε και κάτω από την πλάκα θεμελίωσης, η οποία όμως διατήρησε τη θέση της, λόγω της δυσκαμψίας της.



Εικόνα 7.2: Καθίζηση οδοστρώματος λόγω κατάρρευσης της οροφής του σταθμού Dakai, Kobe, Ιαπωνία, Π. Ματσούκας, Β. Φλεντζούρης, 2007.



Εικόνα 7.3: Αστοχία κεντρικής συστοιχίας υποστυλωμάτων που οδήγησε στην κατάρρευση της πλάκας της οροφής του σταθμού Dakai, Kobe, Ιαπωνία, Π. Ματσούκας, Β. Φλεντζούρης, 2007.

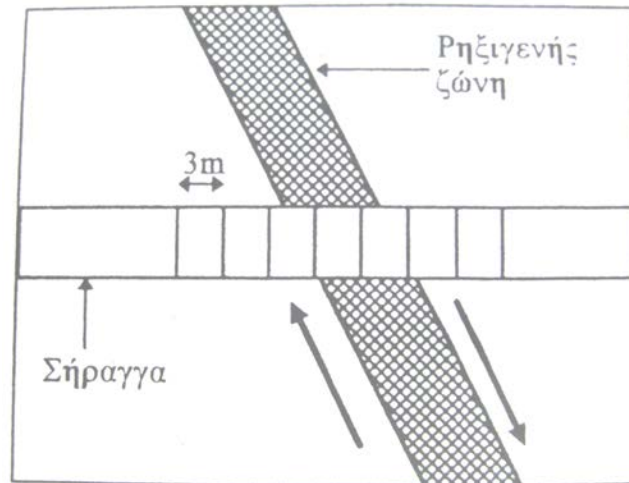
7.3.7.Σεισμός – στοιχεία που απαιτούν προσοχή

Περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται έλεγχος είναι:

- α)Στις περιοχές των στομιών,
- β)Σε σήραγγες όπου το ύψος υπερκείμενων δεν ξεπερνά το μισό της ισοδύναμης διαμέτρου της διατομής εκσκαφής,
- γ)Σε σήραγγες εντός κλιτύων εφόσον αναγνωρισθεί κίνδυνος εμφάνισης γενικευμένης αστάθειας,
- δ)Σε περιοχές διέλευσης της σήραγγας που χαρακτηρίζονται από την παρουσία πιθανών ενεργών ρηγμάτων,
- ε)Σε σήραγγες εντός ιδιαίτερα μαλακών ή χαλαρών εδαφικών σχηματισμών,
- στ)Σε θέσεις διασταυρώσεων σηράγγων που βρίσκονται πλησίον σημαντικών ενεργών ρηγμάτων.

7.3.7.1.Διατομές σε περιοχές εγκάρσιας διασταύρωσης με ρήγμα

Η κατασκευή μιας σήραγγας δεν μπορεί να αντισταθεί έστω και σε μικρές παραμορφώσεις που θα προκληθούν στην περίπτωση που συναντά ρήγμα που μετατοπίζεται σε κάποιο σεισμό. Η προσπάθεια θα πρέπει να εστιαστεί στην αποφυγή τοπικής κατάρρευσης και την προετοιμασία των απαραίτητων επισκευών. Η επισκευή διευκολύνεται με την διαμόρφωση αρμών στην μόνιμη επένδυση ανά τρία μέτρα σε όλο το μήκος της ζώνης διάρρηξης και με μικρή επέκταση έξω από αυτή. Αυτή η κατασκευαστική διαμόρφωση θα διευκολύνει και την παραλαβή γενικότερης παραμόρφωσης της ρηξιγενούς ζώνης.

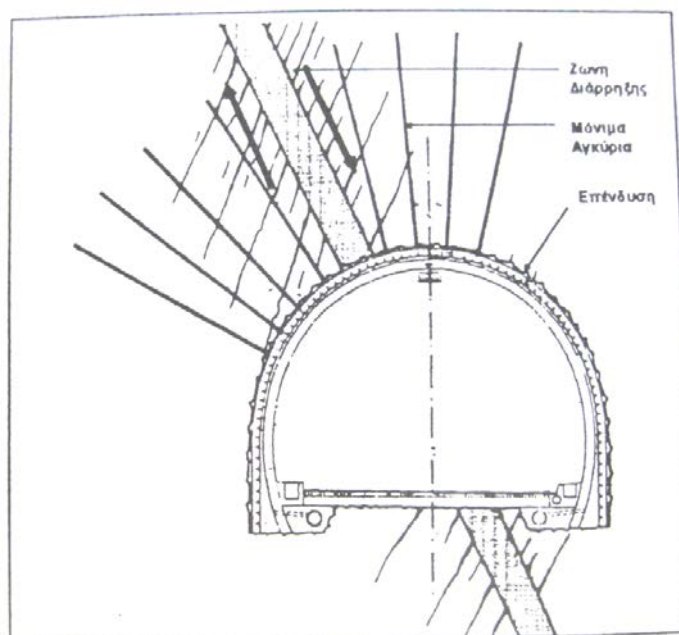


Σχήμα 7.5: Διάταξη πυκνών εγκάρσιων αρμών σε ρηξιγενείς ζώνες, μελέτη αυτοκινητόδρομου Αθηνών - Θεσσαλονίκης (τμήμα Αγ. Κωνσταντίνος - Καμμένα Βούρλα), 1998.

Η περίπτωση διασταύρωσης με ρήγματα που συναντούν τον άξονα της σήραγγας με μικρές γωνίες είναι ιδιαίτερα δυσμενής. Ακόμη και για σχετικά μικρές αναμενόμενες μετακινήσεις των ρηγμάτων αυτών, ο σχεδιασμός της επένδυσης για την ανάληψη συγκεντρωμένης διατμητικής παραμόρφωσης χωρίς καταστροφική αστοχία δεν είναι εύκολος, ενώ τα μέτρα διασφάλισης της επιβίωσης της κατασκευής είναι δαπανηρά. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η εξέταση των ρηγμάτων από εξειδικευμένο γεωλόγο, ο οποίος θα αποφανθεί τόσο για την πιθανότητα ανάδρασης όσο και για το μέγεθος των δυνατών μετακινήσεων.

Για την ανάληψη μικρών τεκτονικών παραμορφώσεων χωρίς κατάρρευση της κατασκευής, σε περίπτωση που συναντάται ένα τέτοιο ρήγμα κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, θα δημιουργηθεί εντός της βραχόμαζας μια «οπλισμένη» ζώνη με την τοποθέτηση ικανού αριθμού μόνιμων αγκυρίων μήκους μεγαλύτερου των 7 μέτρων και τουλάχιστον διπλής αντιδιαβρωτικής προστασίας. Ο οπλισμός της ευρύτερης ζώνης με αγκύρια, έχει ως στόχο την συγκράτηση των σφηνών που πιθανόν να δημιουργηθούν με την αποδιοργάνωση της βραχόμαζας κατά τη σεισμική κίνηση του ρήγματος.

Για τη διαστασιολόγηση της επένδυσης θα θεωρηθεί ότι η ποιότητα της βραχόμαζας ανήκει στη δυσμενέστερη κατηγορία, ενώ το πάχος της επένδυσης θα είναι αυξημένο και μεγαλύτερο από 60 cm για αναμενόμενη τεκτονική μετακίνηση έως και 30 cm. Ο οπλισμός θα προκύψει από τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από την περιβάλλουσα εντατικών μεγεθών για τα επιπρόσθετα φορτία αλλά και για τις επιβαλλόμενες σεισμικές μετατοπίσεις (από τα σεισμικά κύματα). Δεν θα πρέπει όμως να είναι λιγότερες από 80 kg/m^3 , διατεταγμένος σε διπλή εσχάρα στο εσω- και εξω-ράχιο της επένδυσης.



Σχήμα 7.6: Κίνηση ρήγματος παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας και μέτρα αντιμετώπισης καταπτώσεων, μελέτη αυτοκινητόδρομου Αθηνών - Θεσσαλονίκης (τμήμα Αγ. Κωνσταντίνος – Καμμένα Βούρλα), 1998.

Οι παραπάνω κατασκευαστικές διατάξεις αποβλέπουν στη δημιουργία δύο γραμμών άμυνας. Η πρώτη συνίσταται από τα μόνιμα αγκύρια και αποσκοπεί στη διατήρηση της συνοχής της παραμορφούμενης βραχώμαζας. Η δεύτερη γραμμή άμυνας επιτυγχάνεται με τον επιπρόσθετο οπλισμό της μόνιμης επένδυσης, η οποία έτσι θα μπορεί να υποστεί μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις χωρίς την πλήρη αποδιοργάνωσή της.

7.3.7.2.Θεώρηση σεισμικών δράσεων

Η μελέτη για την κατασκευή της σήραγγας θα αναγνωρίσει την αναγκαιότητα εκτέλεσης ελέγχου των αποτελεσμάτων των αναμενόμενων σεισμικών δράσεων. Γι' αυτό, θα χρησιμοποιηθεί κατ' αρχάς η υφιστάμενη διεθνής εμπειρία και οι παρακάτω παρατηρήσεις που έχουν γίνει για την επιτελεσματικότητα των σηράγγων σε σεισμική δράση.

- α)Οι υπόγειες κατασκευές παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερη τρωτότητα από τις επιφανειακές κατασκευές.
- β)Οι παρατηρηθείσες ζημιές μειώνονται με την αύξηση του βάθους των υπερκείμενων γεωολικών.
- γ)Οι υπόγειες κατασκευές που διανοίχθηκαν σε εδαφικά υλικά παρουσίασαν περισσότερες ζημιές σε σχέση με τις αντίστοιχες κατασκευές σε υγιείς βραχώμαζες.
- δ)Οι σήραγγες με τελική επένδυση σε βραχώμαζες είναι ασφαλέστερες από τις αντίστοιχες ανεπένδυτες.
- ε)Η κατασκευαστική εξασφάλιση ικανοποιητικής επαφής μεταξύ γεωολικού και στοιχείων άμεσης υποστήριξης ή/και τελικής επένδυσης μειώνει την παρουσία ζημιών.

στ) Οι παρατηρηθείσες ζημιές φαίνονται να συσχετίζονται με τη μέγιστη επιτάχυνση και ταχύτητα δόνησης του γεωυλικού και την διάρκεια της σεισμικής δόνησης.

ζ) Οι κινήσεις υψηλής συχνότητας μπορούν να προκαλέσουν αποφλοιώση του σκυροδέματος ή της βραχώμαζας κατά μήκος επιπέδων μειωμένων μηχανικών χαρακτηριστικών. Επειδή τέτοιες συχνότητες κατά κανόνα εξασθενούν με την απόσταση, αντίστοιχες ζημιές αναμένονται σε μικρές αποστάσεις από το γενεσιουργό ρήγμα.

η) Η δόνηση του γεωυλικού μπορεί να ενισχυθεί στην περιοχή της σήραγγας όταν το μήκος κύματος είναι μεταξύ μιας και τεσσάρων διαμέτρων αυτής.

θ) Οι ζημιές στα στόμια μπορούν να είναι σημαντικές κυρίως λόγω αστάθειας του πρανούς.

Τα αποτελέσματα σεισμικών δράσεων στις σήραγγες θα ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες:

- Δονήσεις γεωυλικού, δηλαδή παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στον γήινο φλοιό. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος των ζημιών από τις δονήσεις είναι το σχήμα, οι διαστάσεις και το βάθος της σήραγγας, οι ιδιότητες του γεωυλικού, οι ιδιότητες της κατασκευής και τα χαρακτηριστικά της δόνησης.
- Αστοχία του γεωυλικού λόγω ρευστοποίησης, μετατόπισης ρηγμάτων, αστάθειας πρανών. Για τις περισσότερες σήραγγες η αδράνεια του περιβάλλοντος γεωυλικού είναι μεγάλη συγκρινόμενη με αυτή της επένδυσής τους. Για αυτό, η απόκριση της σήραγγας εξαρτάται κυρίως από την απόκριση του πρώτου και όχι από την αδράνεια της επένδυσης. Ο σχεδιασμός, επομένως, έναντι σεισμικής καταπόνησης εστιάζεται στην παραμόρφωση ελεύθερου πεδίου του περιβάλλοντος γεωυλικού και στην αλληλεπίδρασή του με το φορέα της σήραγγας. Γενικά, εφόσον η σήραγγα δύναται να αναλάβει τις παραμορφώσεις του ελεύθερου πεδίου ελαστικά, δεν απαιτούνται περαιτέρω μέτρα για την αντιμετώπιση της δόνησης του σεισμού. Αυτή η μέθοδος ελέγχου της συμπεριφοράς της σήραγγας βάσει της παραμόρφωσης του ελεύθερου πεδίου αποτελεί εύχρηστο και αποτελεσματικό εργαλείο όταν η σήραγγα είναι εύκαμπτη και προκαλούμενες εντάσεις στην επένδυση λόγω σεισμού είναι μικρές. Σε αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει να αρθούν κάποιες από τις απλοποιήσεις προκειμένου να προσεγγισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η πραγματική ένταση της σήραγγας. Συνηθέστερα, αίρεται η απλοποίηση της τελείως εύκαμπτης σήραγγας και υπολογίζεται η αλληλεπίδραση περιβάλλοντος γεωυλικού και κατασκευής. Η σχετική ευκαμψία της σήραγγας ως προς το περιβάλλον πέτρωμα εκφράζεται από τους λόγους συμπίεστικότητας C και ιδίως ευκαμψίας F που δίνονται από τις σχέσεις (Ο.Μ.Ο.Ε., 2002):

Σε αξονική καταπόνηση:

$$C = \frac{E_m(1 - \nu_l^2)R}{E_l I(1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)}$$

και σε καμπτική καταπόνηση:

$$F = \frac{E_m(1 - \nu_l^2)R^3}{6E_l I(1 + \nu_m)}$$

όπου E_m το μέτρο παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού,
 I η ροπή αδράνειας της επένδυσης της κυκλικής σήραγγας με μοναδιαίο πλάτος,

R η ακτίνα της επένδυσης,

t το πάχος της επένδυσης,

ν_l ο λόγος Poisson του υλικού της επένδυσης και

ν_m ο λόγος Poisson του γεωυλικού.

Σπανιότερα αίρεται και η παραδοχή της πλήρους επαφής μεταξύ των σηράγγων και περιβάλλοντος γεωυλικού, με την παραδοχή ολίσθησης στην επιφάνεια της μεμβράνης στεγάνωσης ή επένδυσης- γεωυλικού. Σε αυτή την περίπτωση, η οριακή αντίσταση τριβής καθίσταται μία από τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ιδιότητες του γεωυλικού, όσο και τον τρόπο κατασκευής της σήραγγας.

Οι συνηθέστεροι τύποι παραμορφώσεων- μετατοπίσεων που αντιστοιχούν στην απόκριση της σήραγγας σε σεισμική δράση και για τις οποίες κατ' ελάχιστον θα γίνεται θεώρηση, αν αναγνωριστεί η αναγκαιότητα εκτέλεσης αναλύσεων, είναι:

α) αξονικός εφελκυσμός - θλίψη. Από τις συνιστώσες των σεισμικών κυμάτων προκαλούνται κινήσεις παράλληλες προς τον άξονα της σήραγγας με αποτέλεσμα εναλλασσόμενη θλίψη και εφελκυσμό.

β) διαμήκης κάμψη που προξενείται από τις συνιστώσες των σεισμικών κυμάτων που επιφέρουν κινήσεις κάθετες στον διαμήκη άξονα της σήραγγας.

γ) παραμόρφωση (στρέβλωση) του σχήματος της διατομής της σήραγγας που παρατηρείται όταν διατμητικά κύματα διαδίδονται σχεδόν κάθετα στον άξονα.

Η μελετητική προσέγγιση του προβλήματος των επιδράσεων των σεισμικών δράσεων στις σήραγγες θα περιλαμβάνει τρία κύρια βήματα:

1. Καθορισμός του σεισμικού περιβάλλοντος και απόληψη των σεισμικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών που απαιτούνται για τις αναλύσεις. Αυτά θα πραγματοποιούνται στο στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης και θα περιλαμβάνονται σε ειδικό κεφάλαιο της σχετικής Έκθεσης Γεωλογικής και Γεωτεχνικής Αξιολόγησης.
2. Εκτίμηση της απόκρισης του γεωυλικού στη σεισμική δράση με θεώρηση αστοχίας και παραμορφώσεων του. Αυτή θα πραγματοποιείται κατά την προκαταρκτική μελέτη και θα περιλαμβάνεται σε ειδικό κεφάλαιο της σχετικής Τεχνικής Έκθεσης.
3. Εκτίμηση της συμπεριφοράς της σήραγγας υπό τις συνθήκες της σεισμικής δράσης. Αυτή θα πραγματοποιείται στο στάδιο της οριστικής μελέτης και θα περιλαμβάνεται σε ειδικό κεφάλαιο της Τεχνικής Έκθεσης. Η μελέτη, στις αντίστοιχες Εκθέσεις Εκτίμησης Έργου, θα δώσει πλήρη περιγραφή των μεθόδων τις οποίες θα χρησιμοποιήσει για να διαπραγματευθεί και προσεγγίσει τα ανωτέρω θέματα ενσωματώνοντας τις πλέον εξελιγμένες και διεθνώς αποδεκτές τεχνικές.

Ο σχεδιασμός αντιμετώπισης της δράσης του σεισμού πραγματοποιείται σε ένα ή δύο επίπεδα. Το επίπεδο 1 αφορά τις μέγιστες δράσεις με μικρή πιθανότητα υπέρβασης. Ο έλεγχος του επιπέδου αυτού πραγματοποιείται μόνον εφόσον τον ζητήσει ο κύριος του έργου. Το επίπεδο 2 αφορά δράσεις μικρότερης έντασης και μεγαλύτερης πιθανότητας υπέρβασης. Η συμπεριφορά της σήραγγας και το μέγεθος της δράσης κάθε επιπέδου έχουν ως εξής:

Επίπεδο 1 – (όριο υπέρβασης)

Σημαντικές βλάβες μπορούν να συμβούν. Μερικά από τα στόμια των σήραγγων μπορεί να εμφραχθούν, αλλά δίοδοι διαφυγής θα είναι διαθέσιμες λόγω του σχεδιασμού πολλαπλών εξόδων. Η πιθανότητα κατάρρευσης τμήματος της τελικής επένδυσης της σήραγγας πρέπει να είναι επαρκώς μικρή και θα συνδυάζεται με διατήρηση της ακεραιότητας και επαρκούς παραμένουσας αντοχής μετά τη λήξη της σεισμικής ακολουθίας. Οι βλαφθείσες κατασκευές θα είναι περιορισμένες και επιδιορθώσιμες και ο αυτοκινητόδρομος ή ο σιδηρόδρομος μπορεί να διατεθεί σε λειτουργία σε λίγους μήνες. Ο μελετητής θα προτείνει πιθανότητα υπέρβασης 5% στα 100 έτη (τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας) που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς περίπου 2000 έτη.

Επίπεδο 2 – (όριο ελεγχόμενων βλαβών σύμφωνα με ισχύοντες κανονισμούς)

Μικρές βλάβες μπορούν να συμβούν στις κυρίως σήραγγες, τα στόμια και τις λοιπές υπόγειες κατασκευές. Οι βλάβες θα είναι δυνατό να επισκευαστούν σε μερικές ημέρες. Ο αυτοκινητόδρομος/σιδηρόδρομος μπορεί να χρειαστεί να κλείσει για αυτές τις επισκευές. Ο μελετητής θα προτείνει και ο εργοδότης θα αποφασίζει για τα χαρακτηριστικά του σεισμού σχεδιασμού. Ενδεικτικά, προτείνεται πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 έτη (σεισμός σχεδιασμού E.A.K.) που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς περίπου 500 έτη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μετά από απαίτηση του κυρίου του έργου, είναι δυνατό να εκτελείται ένας μόνο έλεγχος για μέγιστο σεισμό επιπέδου 1 με απαίτηση συμπεριφοράς επιπέδου 2. Τα χαρακτηριστικά του σεισμού σχεδιασμού κάθε επιπέδου δύναται να λαμβάνονται με κατάλληλη κρίση από τον E.A.K. 2000 ή από ειδικά συνταγμένη μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας.

7.3.8. Πρόγραμμα ενόργανης παρακολούθησης

Για την πρόληψη και την προστασία από τυχόν αστοχίες στις σήραγγες που μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές απώλειες είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της συμπεριφοράς των στοιχείων της σήραγγας. Η μελέτη του έργου θα καθορίζει λεπτομερειακά το πρόγραμμα ενόργανης παρακολούθησης, τόσο για τη διάρκεια κατασκευής όσο και λειτουργίας του έργου. Τα θέματα που η μελέτη πρέπει να διερευνήσει είναι κυρίως η επιλογή των μεγεθών που πρέπει να παρακολουθούνται. Τέτοια μεγέθη που απαιτούν κατά περίπτωση παρακολούθηση είναι:

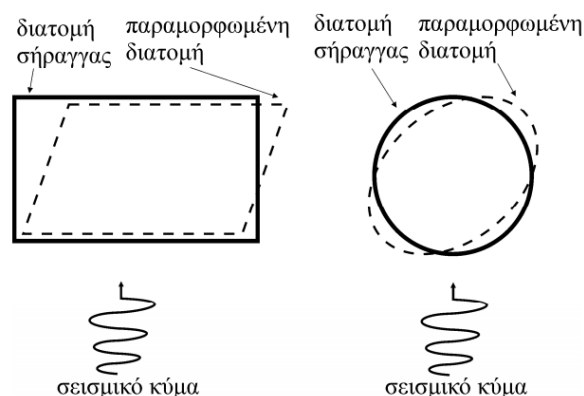
- συγκλίσεις,
- ανύψωση πυθμένα και καθίζηση οροφής,
- χωρικές μετατοπίσεις του γεωυλικού (μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, στο μέτωπο και πίσω από αυτό),
- φορτία αγκυρίων και πλαισίων,
- εξωτερικές πιέσεις και τάσεις στις από εκτοξευμένο ή έγχυτο σκυρόδεμα επενδύσεις,
- παραμορφώσεις πλαισίων,
- πίεση νερού στο περιβάλλον της σήραγγας γεωυλικό ή και την ευρύτερη περιοχή,
- πίεση νερού που δρα πάνω στην επένδυση,
- επιφανειακές καθιζήσεις,
- κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις του γεωυλικού από την επιφάνεια μέχρι τη σήραγγα,

- κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις υπερκείμενων ή παρακείμενων κατασκευών,
- μέτρηση των δομήσεων από την κατασκευαστική διαδικασία.

Στην περίπτωση που κρίνεται από μελετητές που παρακολουθούν τα όργανα, ότι η ασφαλής λειτουργία της σήραγγας κινδυνεύει, θα πρέπει να υπάρξει προειδοποίηση για διακοπή της χρήσης της μέχρι να αποκατασταθεί το πρόβλημα που έχει παρουσιαστεί.

7.3.9. Δυναμική απόκριση σιράγγων – αναλυτικές λύσεις

Η δυναμική απόκριση μιας σήραγγας εξετάζεται συχνά θεωρώντας τη σήραγγα ως ελαστική δοκό υποβαλλόμενη σε παραμορφώσεις από το περιβάλλον έδαφος. Αυτές οι παραμορφώσεις διακρίνονται σε α) κατά τον διαμήκη άξονα της σήραγγας, που συνίσταται σε αξονική συμπίεση και επιμήκυνση ή σε διαμήκη κάμψη και β) εγκάρσιως του άξονα της σήραγγας, που εμφανίζονται ως διατμητικές παραμορφώσεις της διατομής της σήραγγας (σχήμα 7.7). Η τελευταία διακρίνεται σε ωοειδή παραμόρφωση των κυκλικών διατομών (ovaling) και στρέβλωση των ορθογωνικών διατομών (racking).



Σχήμα 7.7: Παραμόρφωση της διατομής της σήραγγας λόγω διάδοσης διατμητικού κύματος, Α. Γιαννάκου, Π. Νομικός, Ι. Αναστασόπουλος, Π. Γιούτα - Μήτρα, Α. Σοφιανός, Γ. Γκαζέτας, 2006.

Οι αξονικές παραμορφώσεις προκαλούνται από τις συνιστώσες των σεισμικών κυμάτων που παράγουν κινήσεις παράλληλες στον άξονα της σήραγγας και προκαλούν εναλλασσόμενη σύνθλιψη και επιμήκυνση. Οι καμπτικές παραμορφώσεις προκαλούνται από τις συνιστώσες των σεισμικών κυμάτων που παράγουν κινήσεις κάθετα στο διαμήκη άξονα.

7.3.9.1. Ωοειδής παραμόρφωση «ελεύθερου πεδίου»

Η διατμητική παραμόρφωση του εδάφους, η οποία προκαλείται από κατακορύφως διαδιδόμενα διατμητικά κύματα (S-waves) θεωρείται γενικώς ως η πιο κρίσιμη σεισμικώς επιβαλλόμενη παραμόρφωση στη σήραγγα. Για την εκτίμηση της εν λόγω παραμόρφωσης, χωρίς να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους- κατασκευής, υπάρχουν δύο εναλλακτικές λύσεις, α) υπολογισμός της διατμητικής παραμόρφωσης που προκαλείται από τα σεισμική διέγερση, π.χ. θεωρώντας το έδαφος ως ισοδύναμο ελαστικό μέσο και β) για βαθιές σήραγγες σε σχετικά ομοιογενή βράχο, χρήση

απλουστευμένης μεθόδου Newmark για την εκτίμηση των μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων «ελεύθερου πεδίου» γ_{\max} :

$$\gamma_{\max} = \frac{V_s}{C_s}$$

όπου V_s είναι η μέγιστη ταχύτητα της σεισμικής ταλάντωσης και C_s είναι η ταχύτητα διατμητικού κύματος.

7.3.9.2. Ωοειδής παραμόρφωση με αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής

Όταν η δυσκαμψία της σήραγγας είναι σημαντική σε σχέση με το περιβάλλον έδαφος, η κατασκευή τείνει να αντισταθεί στις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις από το έδαφος και άρα τις τροποποιεί. Η αλληλεπίδραση εδάφους - σήραγγας παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της απόκρισης της σήραγγας. Οι παραμορφώσεις της επένδυσης της σήραγγας εξαρτώνται από την ακαμψία της κατασκευής, την πίεση των υπερκείμενων γ^*h και τον συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0 . Η δυσκαμψία μιας σήραγγας σε σχέση με το περιβάλλον έδαφος ποσοτικοποιείται με τους δείκτες συμπίεστότητας C και ευκαμψίας F , που εκφράζουν την αντίσταση της κατασκευής έναντι επιμήκυνσης και ωοειδούς παραμόρφωσης αντίστοιχα (Merritt et al., 1985):

$$C = \frac{E_m(1-\nu_l^2)r}{E_t(1+\nu_m)(1-2\nu_m)}$$

$$F = \frac{E_m(1-\nu_l^2)r^3}{6E_L I(1+\nu_m)}$$

όπου E_m και ν_m το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson του εδάφους αντίστοιχα, E_L και ν_L το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson της επένδυσης αντίστοιχα, t και I το πάχος και η ροπή αδράνειας της επένδυσης και r η ακτίνα της σήραγγας. Αν υποθέσουμε συνθήκες πλήρους ολίσθησης στη διεπιφάνεια σήραγγας - εδάφους, η διαμετρική παραμόρφωση, η μέγιστη ώθηση και η μέγιστη ροπή κάμψης είναι (Wang, 1993):

$$\frac{\Delta d}{d} = \pm \frac{1}{3} K_1 F \gamma_{\max}$$

$$T_{\max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} r \gamma_{\max}$$

$$M_{\max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} r^2 \gamma_{\max}$$

όπου:

$$K_1 = \frac{12(1-\nu_m)}{2F + 5 - 6\nu_m}$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η ολίσθηση στη διεπιφάνεια σήραγγας- εδάφους είναι δυνατή μόνο για σήραγγες σε μαλακά εδάφη ή σε περιπτώσεις έντονης σεισμικής φόρτισης. Για τις περισσότερες περιπτώσεις, η συνθήκη στη διεπιφάνεια σήραγγας-εδάφους είναι μεταξύ ολίσθησης και μη - ολίσθησης, οπότε και οι δύο περιπτώσεις πρέπει να μελετηθούν για τον προσδιορισμό της καταπόνησης της επένδυσης και των εδαφικών παραμορφώσεων. Για την περίπτωση μη - ολίσθησης η μέγιστη αξονική

ώθηση στην επένδυση μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση (Hashash et. Al., 2001, 2005):

$$T_{\max} = \pm \frac{1}{2} K_2 \frac{E_m}{(1 + \nu_m)} r \gamma_{\max}$$

όπου:

$$K_2 = 1 + \frac{F[(1 - 2\nu_m) - (1 - 2\nu_m)C] - \frac{1}{2}(1 - 2\nu_m)^2 + 2}{F[(3 - 2\nu_m) + (1 - 2\nu_m)C] + C \left[\frac{5}{2} - 8\nu_m + 6\nu_m^2 \right] + 6 - 8\nu_m}$$

7.3.10. Χαρακτηριστικά δικτύου ΜΕΤΡΟ στο σεισμό

Σε γενικές γραμμές η απόκριση των σηράγγων του δικτύου μετρό στο σεισμό δεν διαφέρει σημαντικά από τη συμπεριφορά των οδικών-σιδηροδρομικών σηράγγων που αναλύθηκε παραπάνω. Μόνη διαφορά μπορεί να θεωρηθεί ότι οι σήραγγες του μετρό είναι εξ' ολοκλήρου υπόγειες και έτσι αίρεται ο κίνδυνος που αντιμετωπίζουν οι οδικές-σιδηροδρομικές σήραγγες στην περιοχή των στομιών, οι οποίες απαιτούν λεπτομερή έλεγχο. Παρόλα αυτά, εκείνο που κάνει το δίκτυο του μετρό να διαφέρει ως προς τον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι το γεγονός ότι, όπως αναλύθηκε παραπάνω, το δίκτυο του ΜΕΤΡΟ αποτελείται από επιμήκη τμήματα (σήραγγες) και από κατασκευές μεγάλων διαστάσεων σε πολλαπλές στάθμες (σταθμοί). Ο αντισεισμικός σχεδιασμός υπόγειων έργων μεγάλων διαστάσεων, όπως είναι για παράδειγμα οι σταθμοί του μετρό, διαφέρει σημαντικά από τον σχεδιασμό τόσο των υπέργειων κατασκευών, όσο και των υπόγειων έργων μεγάλου μήκους, όπως είναι οι σήραγγες. Η έλλειψη συγκεκριμένων κανονιστικών διατάξεων για την αντισεισμική μελέτη έργων αυτού του τύπου και η σχετικά βραδεία εξέλιξη της ερευνητικής δραστηριότητας διεθνώς στο αντικείμενο, αναγκάζει το μελετητή στην υιοθέτηση μιας σειράς από παραδοχές και προσεγγίσεις κατά τον υπολογισμό των υπόγειων κατασκευών, οι οποίες ενδεχομένως δεν ενδείκνυνται σε έναν μεγάλο αριθμό περιπτώσεων.

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ – μέθοδος Kuessel

Στην ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, για τον σεισμικό έλεγχο των σηράγγων του δικτύου, γίνεται η χρήση της μεθόδου Kuessel, η οποία βασίζεται σε σεισμική επιτάχυνση εδάφους 0.33g και σε χαμηλό υπερκείμενο και στην οποία σεισμικός έλεγχος γίνεται μόνο για τη μόνιμη επένδυση. Λόγω της γραμμικής σχέσης μεταξύ μετακίνησης και επιτάχυνσης, η μέθοδος μπορεί να προσαρμοστεί στις διαφορετικές επιταχύνσεις α του έργου του ΜΕΤΡΟ. Ειδικότερα, αν ο συντελεστής διόρθωσης για $\alpha = 0.16g$ είναι $k = 0.16/0.33 = 0.48$ και για $\alpha = 0.24$ είναι $k = 0.24/0.33 = 0.73$.

Η παραμόρφωση λόγω καμπυλότητας θα υπολογιστεί ως εξής:

$$\varepsilon = (5.2 * A * k) / L, \text{ όπου:}$$

L είναι το κρίσιμο μήκος κύματος, που λαμβάνεται ως 6 φορές το μέγιστο πλάτος της κατασκευής στο επίπεδο της κάμψης και

A είναι το πλάτος που αντιστοιχεί στο μήκος κύματος L, $A = 1.1 * 10^{-8} * L^{1.95}$, (A και L σε ft).

Εάν προκύψει $\varepsilon < 10^{-4}$, τότε δεν χρειάζεται καμία ιδιαίτερη πρόβλεψη για την κατασκευή.

Εάν προκύψει $\varepsilon > 10^{-4}$, τότε η κατασκευή θα πρέπει να εφοδιαστεί με εγκάρσιους αρμούς.

Η διατμητική παραμόρφωση των άκαμπτων διαφραγμάτων θα υπολογιστεί ως ακολούθως:

$(Y/h) = (5 \cdot H \cdot k) / (2 \cdot V^2)$, όπου:

V είναι η μέση σεισμική ταχύτητα και

H είναι το βάθος του εδάφους πάνω από το βραχώδες υπόστρωμα (σε ft).

Εάν $Y < (b/1000)$, τότε δεν χρειάζεται να ληφθεί καμία ιδιαίτερη πρόβλεψη.

Εάν $Y < (b/1000)$, τότε πρέπει να προβλεφθούν ειδικοί αρμοί στο φορέα, όπου b είναι το πλάτος του διαφράγματος.

Ιδιαίτερη προσοχή θα δοθεί κατά τη μελέτη σε εκείνες τις θέσεις των υπόγειων κατασκευών οι οποίες συμπίπτουν με σημεία απότομης μεταβολής της συνεκτικότητας του εδάφους, επειδή στις θέσεις αυτές μπορεί να παρατηρηθεί μεγάλη αύξηση δυνάμεων, ανάλογη προς την τοπική αύξηση της καμπυλότητας της κατασκευής, λόγω της διαφορικής κινήσεως του εδάφους, εκτός αν προβλεφθεί εγκάρσιος αρμός.

Κεφάλαιο 8

Μελέτες για το οδικό δίκτυο

8.1.Εισαγωγή

Η εμπειρία των μεγάλων σεισμών σε όλο τον κόσμο καταδεικνύει ότι το οδικό δίκτυο παρουσιάζει υψηλή τρωτότητα. Οι επιπτώσεις από τις βλάβες είναι και βραχυπρόθεσμες, αλλά και μακροπρόθεσμες. Ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα, ή σε περιοχές με πυκνή δόμηση και κατοίκηση, είναι απαραίτητη η αποτίμηση της τρωτότητας του οδικού δικτύου, δηλαδή όλων των επιμέρους συνιστωσών του (οδοί, γέφυρες και σήραγγες).

Οι βλάβες των οδικών δικτύων λόγω σεισμού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: α) άμεσες, βλάβες σε γέφυρες και άλλα τεχνικά έργα, μόνιμες οριζόντιες ή κατακόρυφες μετακινήσεις λόγω ρήγματος, ρευστοποίησης του υποκείμενου εδάφους, κατολισθήσεων, ή αστοχίας επιχωμάτων, β) έμμεσες, δηλαδή βλάβες εξαιτίας μερικής ή ολικής κατάρρευσης παρακείμενων κτηρίων, κατολισθήσεων πρανών, αστοχίας υποκείμενων αγωγών ή εκδήλωσης πυρκαγιών και γ) δευτερογενείς επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου λόγω αύξησης της κυκλοφορίας για την διαφυγή του κοινού, δυσλειτουργίας του συστήματος σηματοδότησης, λήψης μέτρων προστασίας έναντι κινδύνου κατάρρευσης κτηρίων ή εκτέλεσης εργασιών αποκατάστασης σε συνιστώσες δικτύων.

Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά αναφέρεται η μεθοδολογία που ακολουθείται, κυρίως στη χώρα μας, για την αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης ενός οδικού δικτύου και εξετάζεται και η περίπτωση δρόμων σε αστικό περιβάλλον που κινδυνεύουν από κατάρρευση παρόδιων κτηρίων. Επιπλέον, περιγράφεται και ένα σύστημα ιεράρχησης της σπουδαιότητας, το οποίο στηρίζεται σε δείκτες αξιολόγησης συγκοινωνιακών, πολεοδομικών και άλλων συνιστωσών οι οποίες διαμορφώνουν την ολική αξία της κάθε οδού. Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται και η εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας στο οδικό δίκτυο της Θεσσαλονίκης, χρησιμοποιώντας και εκτιμήσεις των αναμενόμενων ζημιών στα κτήρια.

8.2.Μεθοδολογία αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης του οδικού δικτύου

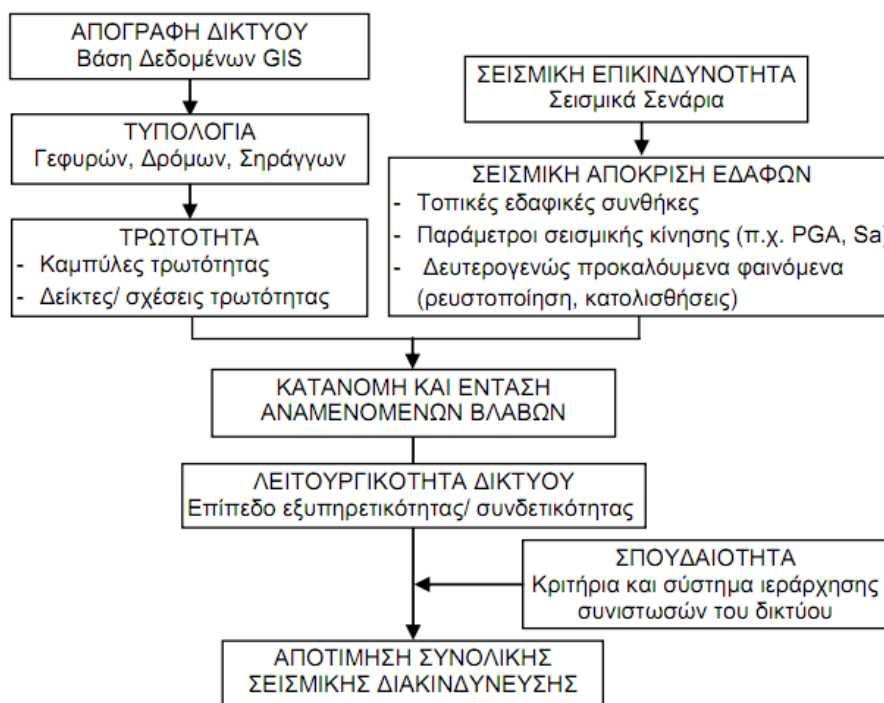
8.2.1.Γενικά

Οι μεθοδολογίες που έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια για τη μελέτη της σεισμικής διακινδύνευσης του οδικού δικτύου στοχεύουν καταρχήν στην εκτίμηση των αναμενόμενων άμεσων βλαβών στις βασικές συνιστώσες του δικτύου. Σε κάποιες περιπτώσεις γίνεται αποτίμηση του επιπέδου λειτουργικότητας του οδικού δικτύου αμέσως μετά το σεισμό, ενώ σε άλλες υπολογίζονται και οι αντίστοιχες συνολικές οικονομικές απώλειες. Σπάνια εξετάζονται οι έμμεσες βλάβες, όπως η επιρροή κατάρρευσης κτηρίων στο δίκτυο. Παρακάτω, περιγράφονται συνοπτικά ορισμένες ενδεικτικές μεθοδολογίες αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης του οδικού δικτύου.

Η μεθοδολογία του HAZUS (NIBS, 2004), στηρίζεται σε καμπύλες τρωτότητας για γέφυρες, σήραγγες και δρόμους. Οι Werner et al., 2000, προτείνουν μια πολυεπίπεδη προσέγγιση που περιλαμβάνει μοντέλα ανάλυσης δικτύου, σεισμικής επικινδυνότητας, σεισμικής τρωτότητας των επιμέρους συνιστωσών και υπολογισμού των άμεσων και έμμεσων οικονομικών και λειτουργικών απωλειών. Παρόμοια μεθοδολογία αναπτύχθηκε από τους Kiremidjian et al., 2006, η οποία εφαρμόστηκε για συγκεκριμένα σεισμικά σενάρια στην περιοχή του San Francisco. Οι Shinozuka et al., 2003, πρότειναν μία μέθοδο αποτίμησης της συμπεριφοράς του οδικού δικτύου στην οποία η εκτίμηση των επιπέδων βλάβης των γεφυρών γίνεται με προσέγγιση Monte Carlo, με βάση καμπύλες τρωτότητας που αναπτύχθηκαν από εμπειρικά δεδομένα των σεισμών του Kobe και Northridge.

Οι μέχρι τώρα εργασίες πάνω στο συγκεκριμένο θέμα είναι λιγοστές εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων για τη θέση και τα χαρακτηριστικά των αποκλεισμών δρόμων λόγω κατάρρευσης κτηρίων σε προηγούμενους σεισμούς και της πολυπαραμετρικής φύσης του προβλήματος, που καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη την ανάπτυξη επαρκώς τεκμηριωμένων μεθόδων. Ο Goretti, 2005, πρότεινε μια μεθοδολογία για την ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς του οδικού δικτύου που εφαρμόζεται στις αστικές περιοχές της νότιας Ιταλίας, συνδυάζοντας τις πιθανότητες κατάρρευσης κτηρίων και αποκλεισμού των δρόμων, ενώ για τον προσδιορισμό της συνδετικότητας του δικτύου γίνεται προσομοίωση Monte Carlo. Τέλος, οι Α. Αναστασιάδης και Σ. Αργυρούδης, 2007, εξετάζουν την αλληλεπίδραση δομημένου περιβάλλοντος και οδικού δικτύου, παρουσιάζοντας ένα πλαίσιο ανάλυσης της σεισμικής τρωτότητας σε αστικά συστήματα.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία για την αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης ενός οδικού δικτύου φαίνεται στο σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1: Μεθοδολογία αποτίμησης σεισμικής διακινδύνευσης οδικού δικτύου, Σ. Αργυρούδης, Κ. Πιτιλάκης, Θ. Χατζηγώγος, 2008.

Ο προσδιορισμός των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών (τεχνικών, γεωμετρικών, λειτουργικών κ.τ.λ.) των συνιστωσών του δικτύου βάσει ενός ενιαίου καταλόγου

απογραφής και η δημιουργία ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων, είναι υψίστης σημασίας για την τυπολογική κατηγοριοποίηση, την μελέτη της δομικής τρωτότητας και τον προσδιορισμό της σπουδαιότητας των εκτιθέμενων σε σεισμικό κίνδυνο στοιχείων. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές δεν υπάρχει στις αρμόδιες υπηρεσίες οργανωμένο αρχείο μελετών, ιδιαίτερα για την περίπτωση των γεφυρών, οπότε η συγκέντρωση όλων των απαιτούμενων στοιχείων καθίσταται δυσχερής. Η τυπολογική κατηγοριοποίηση στηρίζεται στην ταξινόμηση των κρίσιμων χαρακτηριστικών ως προς την σεισμική συμπεριφορά των συνιστωσών. Η κατηγοριοποίηση αυτή, απαιτείται για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας και διαφοροποιείται ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

Η ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας προκύπτει με βάση τη σεισμικότητα της υπό μελέτη περιοχής. Θα πρέπει, επίσης, να λαμβάνονται υπόψη η επιρροή των τοπικών γεωλογικών και εδαφικών συνθηκών και η τοπογραφία. Σημαντικός παράγοντας στην αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας για το σύνολο ενός οδικού δικτύου είναι η αστοχία του εδάφους από μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις που προκαλούνται λόγω ρευστοποίησης ή κατολίσθησης. Η εδαφική ταλάντωση και η πιθανή αστοχία, περιγράφεται από κατάλληλες παραμέτρους για κάθε συνιστώσα του οδικού δικτύου. Για τις γέφυρες χρησιμοποιείται η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ή η φασματική τιμή της επιτάχυνσης σε μία συγκεκριμένη περίοδο, για τις σήραγγες χρησιμοποιείται η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ή η ταχύτητα, ενώ για τις οδούς χρησιμοποιείται η μόνιμη εδαφική μετακίνηση. Η ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας στο οδικό δίκτυο, όπως και στα υπόλοιπα δίκτυα κοινής ωφελείας, θα πρέπει να πραγματοποιείται για σεισμικά σενάρια με διαφορετική μέση περίοδο αναφοράς λόγω της ύπαρξης κατασκευών υψηλής σπουδαιότητας αλλά και για μία πιο ολοκληρωμένη διαχείριση του σεισμικού κινδύνου. Η προσέγγιση αυτή επιτυγχάνεται μέσω λεπτομερούς μικροζωνικής μελέτης, όπου αναλύεται η απόκριση του εδάφους λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών.

Η συνολική διακινδύνευση καθορίζεται εκτός από τον βαθμό τρωτότητας και από την σπουδαιότητα του εκτιθέμενου στοιχείου. Το προτεινόμενο σύστημα ιεράρχησης της σπουδαιότητας βασίζεται σε ένα σύνολο κριτηρίων που συνθέτουν την ολική αξία του κάθε στοιχείου που εκτίθεται σε σεισμικό κίνδυνο, περιγράφοντας την χρησιμότητα και τον σχετικό ρόλο του στο αστικό περιβάλλον, σε περιόδους κανονικής λειτουργίας, κρίσης και αποκατάστασης. Για την περίπτωση του οδικού δικτύου τέτοια κριτήρια είναι η λειτουργική ιεράρχηση της οδού, η κυκλοφοριακή ικανότητα, η πρόσβαση σε κρίσιμες χρήσεις, η χρήση σε κατάσταση επείγουσας ανάγκης και ο βαθμός της αστικής σπουδαιότητας των παρόδιων χρήσεων βάσει πολεοδομικών δεικτών. Αντίστοιχοι δείκτες χρησιμοποιούνται και για τις υπόλοιπες συνιστώσες. Η ιεράρχηση της σπουδαιότητας επιτυγχάνεται μέσω της βαθμονόμησης της κάθε οδού βάσει των παραμέτρων περιγραφής των προτεινόμενων δεικτών αξιολόγησης, όπως περιγράφεται παρακάτω κατά την εφαρμογή στο οδικό δίκτυο Θεσσαλονίκης.

Συνιστώσες	Δρόμοι σε αστικές περιοχές		Περίοδος			
	Δείκτες	Περιγραφή	Κανονική	Κρίσης	Αποκατάστασης	
Λειτουργίες Δικτύου	1. Λειτουργική Ιεράρχηση	Κατηγορίες λειτουργικής ιεράρχησης	•	•	•	
Λειτουργίες Δικτύου	2. Κυκλοφοριακή Ικανότητα	Ενεργό πλάτος της οδού.	•	•	•	
Αστικές δραστηριότητες και αλληλεπιδράσεις	3. Πρόσβαση σε κρίσιμες χρήσεις.	Γεινίαση με κρίσιμες χρήσεις (π.χ. νοσοκομεία, χώροι συγκέντρωσης κοινού, τερματικοί σταθμοί, κτίρια διαχείρισης κρίσης κτλ)	-	•	•	
Αστικές δραστηριότητες και αλληλεπιδράσεις	4. Χρήση σε κατάσταση επείγουσας ανάγκης	Σπουδαιότητα οδού σε κατάσταση επείγουσας ανάγκης.	-	•	•	
Αστικές δραστηριότητες και αλληλεπιδράσεις	5. Πολεοδομικοί δείκτες	Σπουδαιότητα των παρόδιων οικοδομικών τετραγώνων όπως προκύπτει από τους πολεοδομικούς δείκτες ανά περίοδο λειτουργίας.	πυκνότητα κατοίκων	•	• ¹	-
		πυκνότητα λειτουργιών	-	• ²	-	
		οικιστική πυκνότητα	-	-	•	

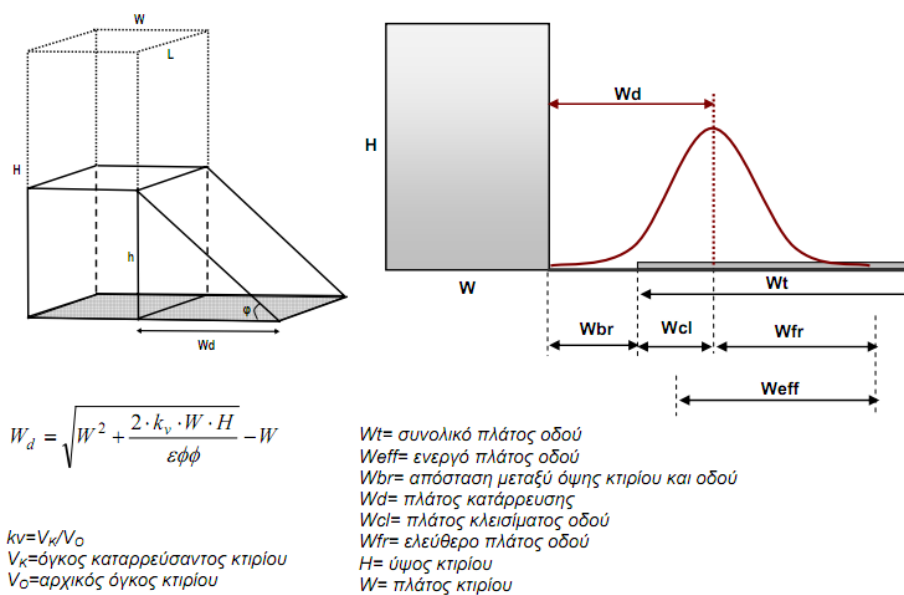
• συμμετοχή της συνιστώσας στην περίοδο που εξετάζεται
 - μη συμμετοχή της συνιστώσας στην περίοδο που εξετάζεται
¹ σεισμικό σενάριο κατά τις μη εργάσιμες ώρες
² σεισμικό σενάριο κατά τις ώρες εργασίας

Πίνακας 8.1: Δείκτες αξιολόγησης σπουδαιότητας οδών, Σ. Αργυρούδης, Κ. Πιτιλάκης, Θ. Χατζηγώγος, 2008.

Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων αποτίμησης της τρωτότητας και σπουδαιότητας οδηγεί στον προσδιορισμό των στοιχείων ή περιοχών του δικτύου που παρουσιάζουν την υψηλότερη διακινδύνευση. Με τον τρόπο, αυτό επιτυγχάνεται αποτελεσματική διαχείριση του σεισμικού κινδύνου, τόσο πριν όσο και αμέσως μετά το σεισμικό συμβάν, με την λήψη κατάλληλων μέτρων ενίσχυσης των πλέον τρωτών στοιχείων, ή τον καθορισμό των δράσεων αποκατάστασης σεισμικών βλαβών.

8.2.2. Προτεινόμενη μέθοδος αποτίμησης τρωτότητας οδών έναντι κατάρρευσης κτηρίων

Ο αποκλεισμός μίας οδού εξαιτίας καταρρεύσεων παρόδιων κτηρίων εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά της οδού, αλλά και από τα χαρακτηριστικά των παρόδιων κτηρίων. Το πλάτος των συντριμμιών που θα προκαλέσουν μερικό ή ολικό αποκλεισμό της οδού εξαρτάται από τον δομικό τύπο του κτηρίου (υλικό, τύπος κατασκευής), από την γεωμετρία του κτηρίου (κυρίως το ύψος) και από το σύστημα δόμησης (συνεχές σύστημα, πανταχόθεν ελεύθερο). Αυτό που έχει προταθεί είναι μία απλουστευμένη σχέση μεταξύ του αρχικού ύψους του κτηρίου (αριθμός ορόφων) και του πλάτους που καταλαμβάνουν τα συντρίμια μετά την κατάρρευση. Και αυτό διότι, το πρόβλημα είναι πολύπλοκο, υπάρχει έλλειψη δεδομένων από προηγούμενους σεισμούς και οι αβεβαιότητες είναι πολλές. Εφόσον το πλέον κυρίαρχο στις κεντρικές περιοχές των ελληνικών πόλεων είναι η συνεχής δόμηση, θεωρείται μορφή κατάρρευσης προς τη μία πλευρά που είναι η δυσμενέστερη περίπτωση για συνεχές σύστημα δόμησης. Άλλωστε η εμπειρία από φωτογραφίες προηγούμενων σεισμών στην Ελλάδα καταδεικνύει ότι τέτοια σχήματα κατάρρευσης (σχήμα 8.2) είναι τα πλέον αντιπροσωπευτικά για ένα μεγάλο εύρος κτηρίων.



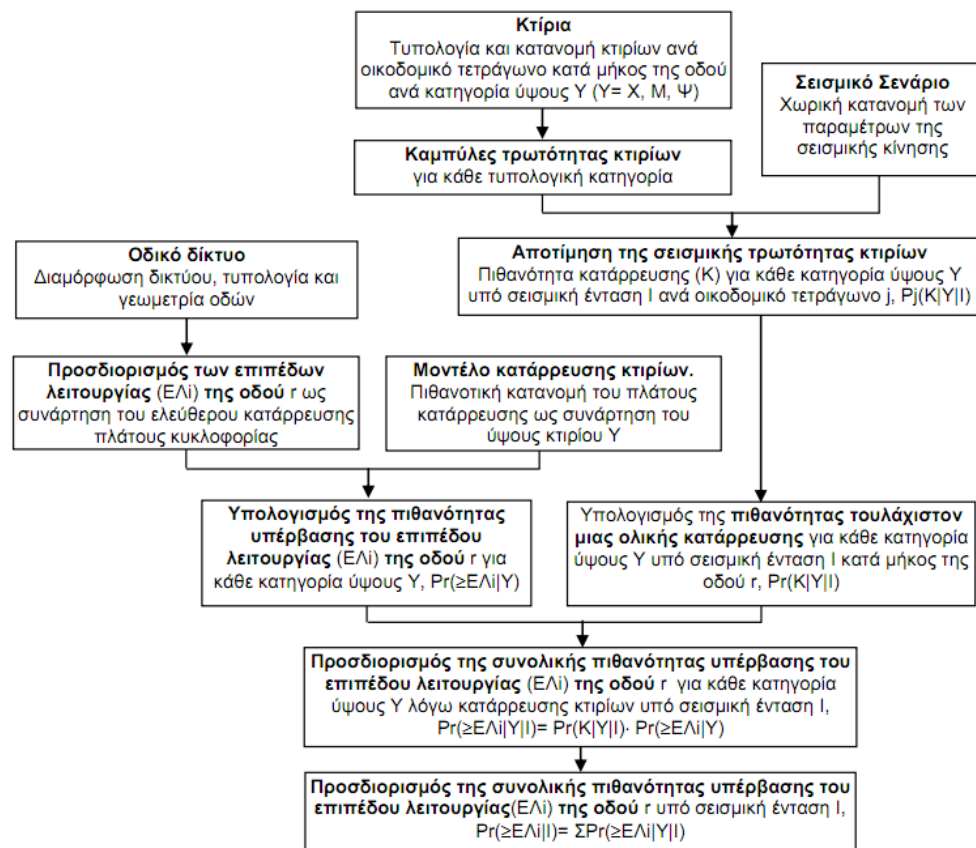
Σχήμα 8.2: Μοντέλο προσδιορισμού του πλάτους κατάρρευσης (W_d) κτηρίων και ελεύθερου πλάτους οδού (W_{fr}), Σ. Αργυρούδης, Κ. Πιτιλάκης, Θ. Χατζηγώγος, 2008

Για τον υπολογισμό της σχέσης μεταξύ του αρχικού ύψους κτιρίου (H) και του πλάτους των χαλασμάτων (W_d) που εκτείνονται πέραν του αρχικού πλάτους του κτιρίου (W), θεωρείται ότι ο όγκος του καταρρεύσαντος κτιρίου (V_K) είναι ένα κλάσμα του αρχικού όγκου (V_0). Με βάση αυτή την υπόθεση, υπολογίζεται το πλάτος W_d ως συνάρτηση του αρχικού πλάτους W , της γωνίας ϕ και του ποσοστού k_v ($=V_K / V_0$) (σχήμα 8.2). Η ανάλυση ευαισθησίας της συγκεκριμένης σχέσης δείχνει ότι οι παράμετροι ϕ και k_v έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στην διαμόρφωση του πλάτους W_d .

Στο τελικό μοντέλο κατάρρευσης, θεωρείται ως αντιπροσωπευτική τιμή ίση με 15 μέτρα για το W , ενώ οι παράμετροι ϕ και k_v λαμβάνουν μέση τιμή ίση με 45° και 50% αντίστοιχα, ενώ ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι 30%. Η αναμενόμενη μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του πλάτους W_d για κάθε ύψος κτιρίου (H) προσδιορίζονται σύμφωνα με την μέθοδο σημειακής εκτίμησης (Haft, 1987) για συνάρτηση δύο μεταβλητών (ϕ , k_v). Η πιθανότητα υπέρβασης ενός δεδομένου πλάτους κατάρρευσης W_d , το οποίο αποτελεί την τιμή κατωφλίου σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο λειτουργίας της κάθε οδού, προσδιορίζεται υποθέτοντας ότι το W_d ακολουθεί κανονική κατανομή. Μέσω της παραπάνω πιθανοτικής θεώρησης λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες στην μεταβολή του πλάτους W_d .

Όπως περιγράφεται στο σχήμα 8.3, για την αποτίμηση της τρωτότητας μιας οδού έναντι κατάρρευσης κτηρίων υπό δεδομένη σεισμική ένταση (I), εκτός από την πιθανότητα υπέρβασης ενός συγκεκριμένου επιπέδου λειτουργίας ($E\Lambda_i$) της οδού για δεδομένο ύψος κτιρίου Y , $P(\geq E\Lambda_i | Y)$, θα πρέπει να υπολογιστεί και η πιθανότητα κατάρρευσης (K) των κτηρίων ύψους (Y), $P(K | Y | I)$, μα βάση κατάλληλες καμπύλες τρωτότητας. Τα στοιχεία απογραφής των κτηρίων είναι συνήθως διαθέσιμα ανά οικοδομικό τετράγωνο (j), οπότε η εκτίμηση της πιθανότητας κατάρρευσης αναφέρεται στο κάθε οικοδομικό τετράγωνο, $P(K | Y | I)$. Οι πιθανότητες κατάρρευσης των κτηρίων ανάγονται στις πλευρές του κάθε j οικοδομικού τετραγώνου που έχουν πρόσοψη προς την εξεταζόμενη οδό, με βάση το μήκος των πλευρών, θεωρώντας ότι υπάρχει η ίδια πιθανότητα εμφάνισης του κάθε κτιρίου στην κάθε πλευρά του

τετραγώνου. Η συνολική αποτίμηση ενός τμήματος οδού (μεταξύ δύο κόμβων), προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανότητες που αντιστοιχούν στις εκατέρωθεν της οδού πλευρές των οικοδομικών τετραγώνων $P_j(K|Y|I)$ και $P(\geq E_{Li}|Y)$, για κάθε κατηγορία ύψους κτηρίων. Παρακάτω περιγράφεται η εφαρμογή της διαδικασίας για τμήμα του οδικού δικτύου της Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 8.3: Διαδικασία αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας οδών έναντι κατάρρευσης κτηρίων, Σ. Αργυρούδης, Κ. Πιτιλάκης, Θ. Χατζηγώγος, 2008

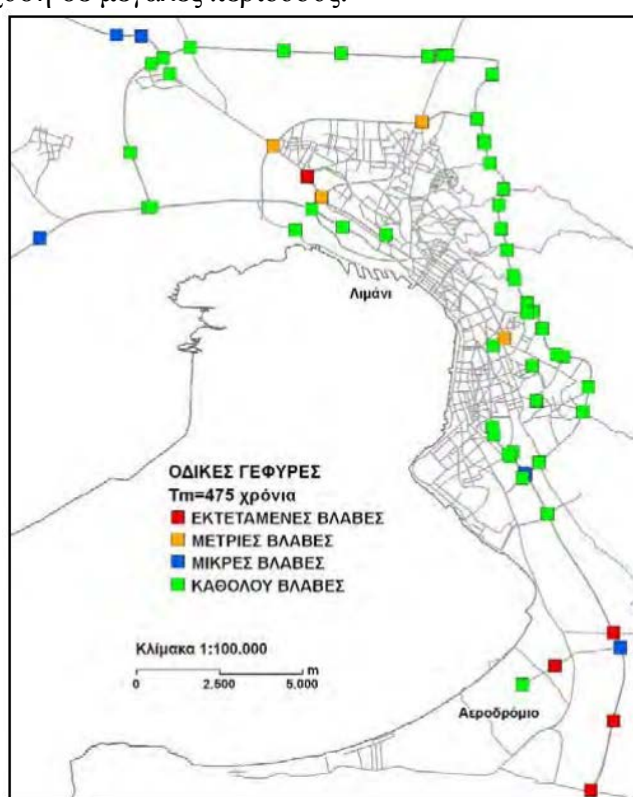
8.3.Εφαρμογές στο οδικό δίκτυο

8.3.1.Οδικό δίκτυο Θεσσαλονίκης έναντι σεισμού (οδοί και γέφυρες)

Η βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε για το οδικό δίκτυο της μητροπολιτικής περιοχής της Θεσσαλονίκης περιλαμβάνει περίπου 600 χλμ. δρόμων και 80 γέφυρες. Η πλειοψηφία των τελευταίων, βρίσκεται στην περιφερειακή οδό και τις κύριες εξόδους της πόλης, ενώ η ταξινόμησή τους στηρίζεται στον αριθμό των ανοιγμάτων (μονά ή πολλαπλά), το επίπεδο αντισεισμικού σχεδιασμού (χαμηλό ή υψηλό), τον τύπο στήριξης των βάθρων (μονά ή πολλαπλά) και την συνέχεια των ανοιγμάτων (απλή έδραση ή συνεχή στήριξη). Η αποτίμηση της τρωτότητας περιλαμβάνει την εκτίμηση των άμεσων απωλειών σε γέφυρες και δρόμους λόγω εδαφικής ταλάντωσης και εδαφικής αστοχίας αντίστοιχα, καθώς και των έμμεσων απωλειών όπως κλεισίματα των δρόμων λόγω κατάρρευσης των παράπλευρων κτηρίων (Σ. Αργυρούδης και συνεργάτες, 2008).

Το αναμενόμενο επίπεδο βλαβών για τις γέφυρες υπολογίζεται με την υιοθέτηση καμπυλών τρωτότητας που προτείνονται από το HAZUS (NIBS, 2004), ενώ το σεισμικό σενάριο εισαγωγής παρέχεται από τα αποτελέσματα της μικροζωνικής

μελέτης και αναφέρεται στη μέση τιμή της φασματικής επιτάχυνσης για περίοδο $T=1,0\text{sec}$. Το σχήμα 8.4 παρουσιάζει για κάθε γέφυρα το εκτιμώμενο δυσμενέστερο πιθανό επίπεδο βλάβης (πιθανότητα υπέρβασης $> 50\%$). Η εφαρμογή του μοντέλου τρωτότητας αποδεικνύει ότι η πλειοψηφία των γεφυρών θα αποκριθεί με ικανοποιητικό τρόπο. Υπάρχουν, όμως, ορισμένες γέφυρες, που αναμένεται να υποστούν σοβαρές βλάβες για το συγκεκριμένο σενάριο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη τρωτότητα των γεφυρών αυτών (γέφυρες με μονά βάθρα, απλής έδρασης και ανεπαρκούς σεισμικού σχεδιασμού), και τις υψηλές τιμές της αναμενόμενης φασματικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια. Οι τελευταίες αποδίδονται στις τοπικές εδαφικές συνθήκες και την εγγύτητα της σεισμικής πηγής (π.χ. στο νοτιότερο τμήμα). Για παράδειγμα, στο δυτικό και παράλιο τμήμα της πόλης το έδαφος αποτελείται από βαθιές, μαλακές αλλουβιακές αποθέσεις, ιλυοαμμώδης αργίλους έως αργιλώδεις άμμους και ιλύες, με χαμηλή αντοχή και μεγάλη συμπιεστότητα (κατηγορία C κατά EC8). Επομένως, η αναμενόμενη σεισμική διέγερση στην περιοχή αυτή, παρουσιάζει μεγαλύτερη ενίσχυση σε μεγάλες περιόδους.



Σχήμα 8.4: Κατανομή βλαβών για τις οδικές γέφυρες της Μητροπολιτικής περιοχής της Θεσσαλονίκης ($T_m=475$ χρόνια), Κ. Πιτιλάκης, Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Κακδέρη, Μ. Αλεξούδη, 2008

8.3.2. Οδικό δίκτυο Θεσσαλονίκης έναντι κατάρρευσης κτηρίων

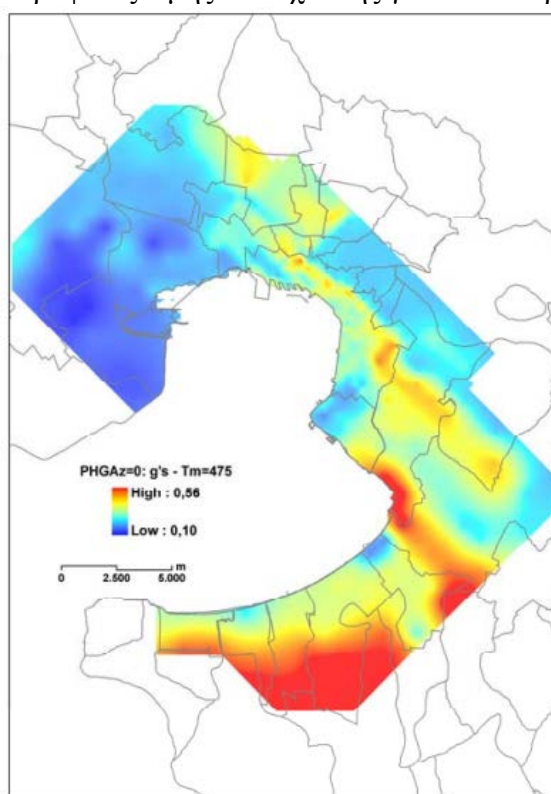
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή (Σ. Αργυρούδης και συνεργάτες, 2008), η αποτίμηση της τρωτότητας οδών λόγω κατάρρευσης παρόδων κτηρίων γίνεται σε περιβάλλον GIS για τμήμα του οδικού δικτύου του Π.Σ. (Πολεοδομικού Συγκροτήματος) οι οποίοι αξιολογήθηκαν ως μεγάλης σπουδαιότητας σε κατάσταση επείγουσας ανάγκης, με συνολικό μήκος περί τα 250 χλμ.. Τονίζεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό (περίπου 90%) του υπό μελέτη δικτύου έχει μηδενική τρωτότητας ως προς τις καταρρεύσεις κτηρίων, καθώς πρόκειται για ελεύθερες λεωφόρους ή κύριες αρτηρίες

οι οποίες διατρέχουν αδόμητες περιοχές ή βρίσκονται σε απόσταση ασφαλείας από κτήρια.

Καταρχήν, το δίκτυο διαμορφώθηκε σε τμήματα μεταξύ κόμβων οι οποίοι επιλέγονται έτσι ώστε να αποτελούν κρίσιμες διασταυρώσεις ως προς τον κυκλοφοριακό φόρτο, προκειμένου να υπολογισθεί για κάθε τέτοιο τμήμα η συνολική πιθανότητα υπέρβασης συγκεκριμένων επιπέδων λειτουργίας, λόγω καταρρεύσεων κτηρίων. Επίσης, τα ενοποιημένα τμήματα δρόμων είναι ομοιογενή όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού. Η βάση δεδομένων των οδών περιλαμβάνει στοιχεία όπως η ονομασία, η ιεράρχηση της οδού, το συνολικό και ενεργό πλάτος, ο αριθμός λωρίδων ανά κατεύθυνση, η ύπαρξη ή όχι κτηρίων, η μέση απόσταση απέναντι κτηρίων, η ύπαρξη νησίδας.

8.3.2.1. Σεισμικό σενάριο

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιούνται τα τρία σεισμικά σενάρια της μικροζωνικής μελέτης Θεσσαλονίκης για μέση περίοδο επαναφοράς ίση με 100, 475 και 1000 έτη (Κ. Πιτιλάκης και συνεργάτες, 2008). Για τις σεισμικές διεγέρσεις που προτάθηκαν στα πλαίσια της σεισμολογικής μελέτης και της μελέτης σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής, εκτιμήθηκε η σεισμική απόκριση των πρόσφατων εδαφικών αποθέσεων στην ευρύτερη περιοχή συνεκτιμώντας όλα τα διαθέσιμα γεωλογικά, γεωφυσικά και γεωτεχνικά δεδομένα. Η κατανομή της μέσης τιμής των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης προσδιορίστηκε με βάση τα αποτελέσματα ενός πλήθους μονοδιάστατων αναλύσεων εδαφικής απόκρισης. Στο σχήμα 8.5 δίνεται η κατανομή της μέσης κορυφαίας τιμής επιτάχυνσης για το δεύτερο σενάριο.



Σχήμα 8.5: Κατανομή της μέσης κορυφαίας τιμής επιτάχυνσης (PHGAz=0: g's) στην επιφάνεια του εδάφους σύμφωνα με τα αποτελέσματα σεισμικής απόκρισης του εδάφους για το σεισμικό σενάριο με μέση περίοδο επανάλιψης $T_m=475$ χρόνια, Σ. Αργυρούδης, Κ. Πιτιλάκης, Θ. Χατζηγώγος, 2008.

8.3.2.2. Αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας κτηρίων έναντι κατάρρευσης

Αναφορικά με την σύνθεση της τυπολογίας και την αποτίμηση της τρωτότητας των κτηρίων, γίνεται χρήση των δεδομένων από προηγούμενες ερευνητικές εργασίες. Για όσα τετράγωνα δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία υπολογίζεται μια μέση πυκνότητα κτηρίων με βάση τα γειτονικά, γνωστής σύνθεσης, τετράγωνα. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη τα στοιχεία χρήσεων γης, ώστε να εξαιρεθούν οι χώροι πρασίνου και ειδικών χρήσεων (π.χ. γήπεδα, αρχαιολογικοί χώροι κ.τ.λ.). Εξαιρούνται ακόμη τα τετράγωνα στα οποία βρίσκονται κτήρια σε μεγάλη απόσταση από το δρόμο, οπότε σε καμία περίπτωση δεν υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης εντός της οδού. Με βάση τις καμπύλες τρωτότητας που προτείνονται από τους Karros et al. (2006) για συνήθη κτήρια του ελληνικού χώρου, υπολογίζεται για κάθε οικοδομικό τετράγωνο (j) η πιθανότητα κατάρρευσης (K) της κάθε κατηγορίας κτηρίων (Y), υπό την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (I), που στην παρούσα εφαρμογή αναφέρεται στο σεισμικό σενάριο με μέση περίοδο επαναφοράς 475 ετών, $P_j(K|Y|I)$. Η τυπολογία και οι αντίστοιχες καμπύλες τρωτότητας ταξινομούνται ως προς το ύψος σε τρεις κατηγορίες, Χαμηλά (X : 1-3 όροφοι), Μεσαία (M : 4-7 όροφοι), Ψηλά (Ψ : 8 ή παραπάνω όροφοι), οπότε και οι πιθανότητες κατάρρευσης προσδιορίζονται ξεχωριστά για τις τρεις κατηγορίες ύψους Y ($Y = X, M, \Psi$). Στη συνέχεια προσδιορίζεται η πιθανότητα να συμβεί τουλάχιστον μια κατάρρευση κτηρίων ύψους Y κατά μήκος του κάθε τμήματος οδού (από κόμβο σε κόμβο), όπως περιγράφεται πιο αναλυτικά παρακάτω.

Από τον ορισμό της «κατάρρευσης» ως επιπέδου βλάβης κατά την εξαγωγή των καμπυλών τρωτότητας των κτηρίων, αλλά και με βάση την εμπειρία από προηγούμενους σεισμούς, συνάγεται ότι δεν πρόκειται πάντοτε για ολοσχερή κατάρρευση που θα οδηγήσει σε μορφή η οποία θα αποκλείσει την παρακείμενη οδό. Από τα στοιχεία και την εμπειρία προηγούμενων σεισμών στην Ελλάδα, εκτιμάται ότι ένα ποσοστό της τάξεως του 20% θα είναι τέτοιας μορφής, οπότε οι προηγούμενες πιθανότητες πολλαπλασιάζονται με ένα μειωτικό συντελεστή ίσο με 0,20. Τέλος, γίνεται αναγωγή των πιθανοτήτων στην πλευρά του κάθε οικοδομικού τετραγώνου που έχει πρόσοψη στην οδό, όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

8.3.2.3. Αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των οδών έναντι κατάρρευσης κτηρίων

Καταρχήν ορίζονται επίπεδα λειτουργίας (EL) της κάθε οδού, με βάση το ελεύθερο από κατάρρευση ενεργό πλάτος της οδού. Για παράδειγμα, οδός ανοικτή, 50% ανοικτή, κλειστή, ή ανοικτή κατά ένα κρίσιμο πλάτος για το οποίο είναι δυνατή η διέλευση οχημάτων άμεσης επέμβασης (π.χ. 3 μέτρα). Βάσει, λοιπόν, της γεωμετρίας της κάθε οδού (απόσταση από κτήρια και ενεργό πλάτος οδού), προσδιορίζεται το πλάτος κατάρρευσης (W_d) που αποτελεί την τιμή κατωφλίου για το αντίστοιχο επίπεδο λειτουργίας. Με βάση το μοντέλο κατάρρευσης που περιγράφηκε νωρίτερα, υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης του συγκεκριμένου πλάτους για κάθε κατηγορία ύψους $P(\geq EL|Y)$. Η παρούσα εφαρμογή γίνεται για το επίπεδο λειτουργίας που αντιστοιχεί σε μείωση του ενεργού πλάτους κατά 50%.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική πιθανότητα τουλάχιστον μιας ολικής κατάρρευσης κτηρίων ύψους Y κατά μήκος του κάθε τμήματος οδού (από κόμβο σε κόμβο), διαδικασία της οποίας η περιγραφή δεν θα γίνει στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Τέλος, προσδιορίζεται η πιθανότητα υπέρβασης του επιπέδου λειτουργίας της οδού για κάθε κατηγορία ύψους Y λόγω κατάρρευσης κτηρίων υπό σεισμική ένταση I , καθώς και η συνολική πιθανότητα για όλες τις κατηγορίες ύψους.

Στο σχήμα 8.6 δίνεται ένας χάρτης για το σεισμικό σενάριο $T_m = 475$ έτη από την κεντρική περιοχή της Θεσσαλονίκης, όπου εμφανίζονται οι υψηλότερες πιθανότητες αποκλεισμού. Η συνολική πιθανότητα αποκλεισμού του κάθε τμήματος οδού εξαρτάται από την πυκνότητα και το σύστημα δόμησης, το μήκος του εκάστοτε οδικού τμήματος, την τυπολογία των κτηρίων και την τιμή των σεισμικών φορτίων. Για παράδειγμα, τα υψηλά κτήρια από τα οποία προκύπτουν μεγαλύτερα πλάτη συντριμμίων, εμφανίζουν λόγω της μορφής των καμπύλων τρωτότητας από σχεδόν μηδενικές έως μικρές πιθανότητες για κατάρρευση.



Σχήμα 8.6: Χωρική κατανομή της πιθανότητας υπέρβασης αποκλεισμού οδών κατά 50% του ενεργού πλάτους για το σεισμικό σενάριο με $T_m=475$ χρόνια, Σ. Αργυρούδης, Κ. Πιτιλάκης, Θ. Χατζηγώγος, 2008.

8.3.2.4. Αποτίμηση της σπουδαιότητας των οδών

Η κάθε οδός του συνολικού δικτύου αξιολογείται με βάση τα κριτήρια του πίνακα 8.2 για τις τρεις περιόδους λειτουργίας (κανονική, κρίσης, αποκατάστασης). Συγκεκριμένα, ο δείκτης της λειτουργικής ιεράρχησης διαμορφώνεται ανάλογα με την κατηγορία της οδού: ελεύθερες/ταχείες λεωφόροι, κύριες ή δευτερεύουσες αρτηρίες, πρωτεύουσες ή δευτερεύουσες συλλεκτήριες, και τοπικές οδοί. Ο δείκτης της κυκλοφοριακής ικανότητας εξαρτάται από το ενεργό πλάτος, ενώ ο δείκτης της

πρόσβασης σε κρίσιμες χρήσεις εξαρτάται από το είδος σύνδεσης (άμεση ή έμμεση πρόσβαση), αλλά και την σπουδαιότητα και τον ρόλο των αντίστοιχων υπηρεσιών και χρήσεων ανά περίοδο (νοσοκομεία, κτήρια και εγκαταστάσεις πυρόσβεσης, πολιτικής προστασίας/συντονισμού, τεχνικών υπηρεσιών, πρόνοιας, τερματικών σταθμών, ανοιχτών χώρων συγκέντρωσης κοινού). Ο δείκτης χρήσης σε κατάσταση επείγουσας ανάγκης βαθμονομείται ως προς την μεγάλη ή μικρότερη σπουδαιότητα κατά τις κυκλοφοριακές ρυθμίσεις σε περίπτωση σεισμού. Τέλος, οι πολεοδομικοί δείκτες περιγράφονται από την ανάλυση της αστικής σπουδαιότητας των παρόδιων οικοδομικών τετραγώνων, με βάση τις πυκνότητες κατοίκων και κεντρικών λειτουργιών και την οικιστική πυκνότητα (Α. Αναστασιάδης, Σ. Αργυρούδης, 2007). Η βαθμονόμηση των δεικτών γίνεται χρησιμοποιώντας διαφορετικά επίπεδα που αντιπροσωπεύονται με τιμές από 0 έως 1 (π.χ. 0,0, 0,5, 0,75, 1,0) με βάση την διαφοροποίηση της σχετικής αξίας των εκτιθέμενων σε σεισμικό κίνδυνο στοιχείων. Η τιμή [1,0] εκφράζει πάντοτε την μεγαλύτερη σχετική αξία, ενώ η τιμή [0,0] την μικρότερη. Η άθροιση των τιμών των επιμέρους δεικτών δίνει την ολική αξία του κάθε τμήματος οδού, η οποία χρησιμοποιείται για την ιεράρχηση σε κατηγορίες σπουδαιότητας (πρωταρχική, σημαντική, δευτερεύουσα). Στο σχήμα 8.7 δίνεται ένας χάρτης με την κατηγοριοποίηση των οδών στην κεντρική περιοχή Θεσσαλονίκης για την περίοδο κρίσης, ύστερα από την βαθμονόμηση με τους παραπάνω δείκτες.

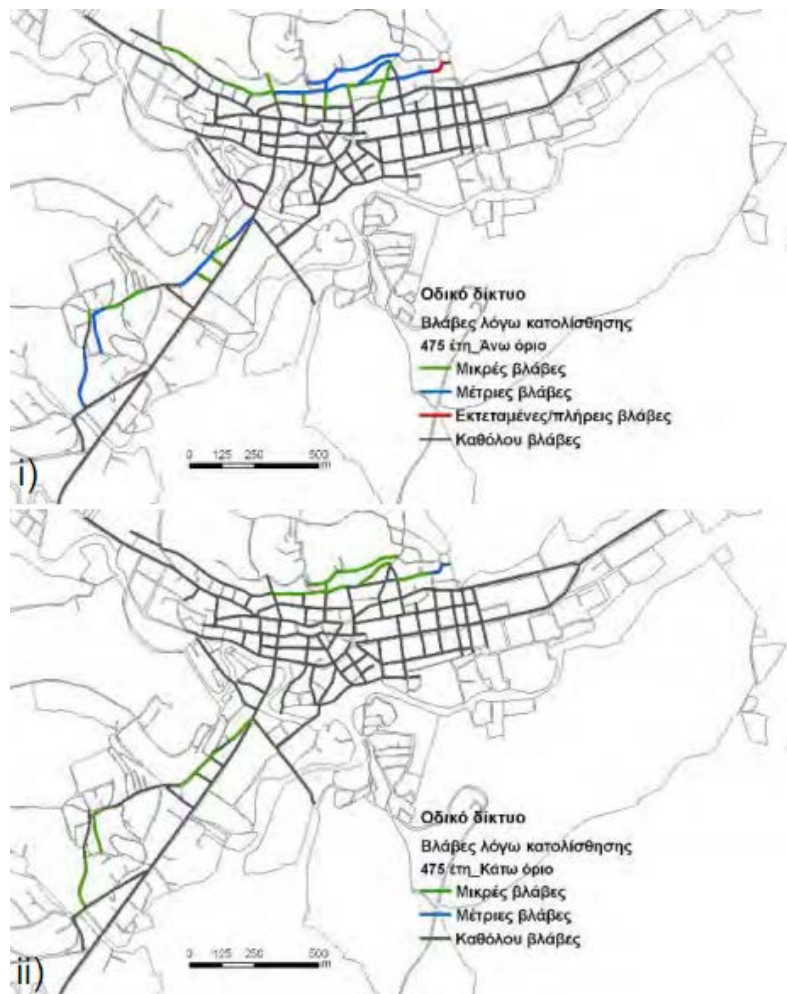


Σχήμα 8.7: Ιεράρχηση της σπουδαιότητας των οδών στην κεντρική περιοχή Θεσσαλονίκης κατά την περίοδο κρίσης, Σ. Αργυρούδης, Κ. Πιτιλάκης, Θ. Χατζηγάγος, 2008.

8.3.3. Οδικό δίκτυο της πόλης των Γρεβενών

Το 2010, εξετάστηκε από τους Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου και Κ. Πιπλλάκη η τρωτότητα των δικτύων κοινής ωφελείας στην πόλη των Γρεβενών. Όσον αφορά το οδικό δίκτυο, εξετάστηκε το κύριο οδικό της πόλης. Αρχικά, έγινε μια προκαταρκτική ταξινόμηση της σπουδαιότητας των οδών με βάση τη λειτουργικότητα, συχνότητα χρήσης, εμπορικότητα και δυνατότητα διαφυγής. Τα σεισμικά σενάρια που ελήφθησαν για την πόλη των Γρεβενών στη συγκεκριμένη μελέτη, έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Για την αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας του οδικού δικτύου, χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες που προτείνονται από το HAZUS (NIBS, 2004) συναρτήσεων των τιμών των μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων λόγω κατολίσθησης. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας τους, έγινε με βάση στοιχεία βλαβών σε δρόμους λόγω εδαφικής αστοχίας κατά την διάρκεια σεισμών του ελλαδικού χώρου. Στο Σχήμα 8.8 απεικονίζονται οι αναμενόμενες βλάβες για το σενάριο των 475 ετών (σε συνολικό μήκος 19,7 χλμ., 6,7- 8,8% θα υποστεί μικρές βλάβες, 0,3 - 8,8% μέτριες και 0 - 0,3% εκτεταμένες / καθολικές). Τα αποτελέσματα της τρωτότητας σχετίζονται με την χωρική κατανομή των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης για το κάθε σενάριο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων στοιχείων. Το μέσο κόστος αποκατάστασης (με βάση ένα προσεγγιστικό κόστος αντικατάστασης 4 εκατ. ευρώ/1000μέτρα σύμφωνα με το HAZUS), υπολογίζεται περίπου σε 2,1 εκατ. Ευρώ για τα 2,5 χλμ. οδών που αναμένεται κατά μέσο όρο να υποστούν βλάβη για $T_m=475$ έτη και 4,4 εκατ. ευρώ για τα 3,1 χλμ. οδών που αναμένεται κατά μέσο όρο να υποστούν βλάβη για $T_m=1000$ έτη.

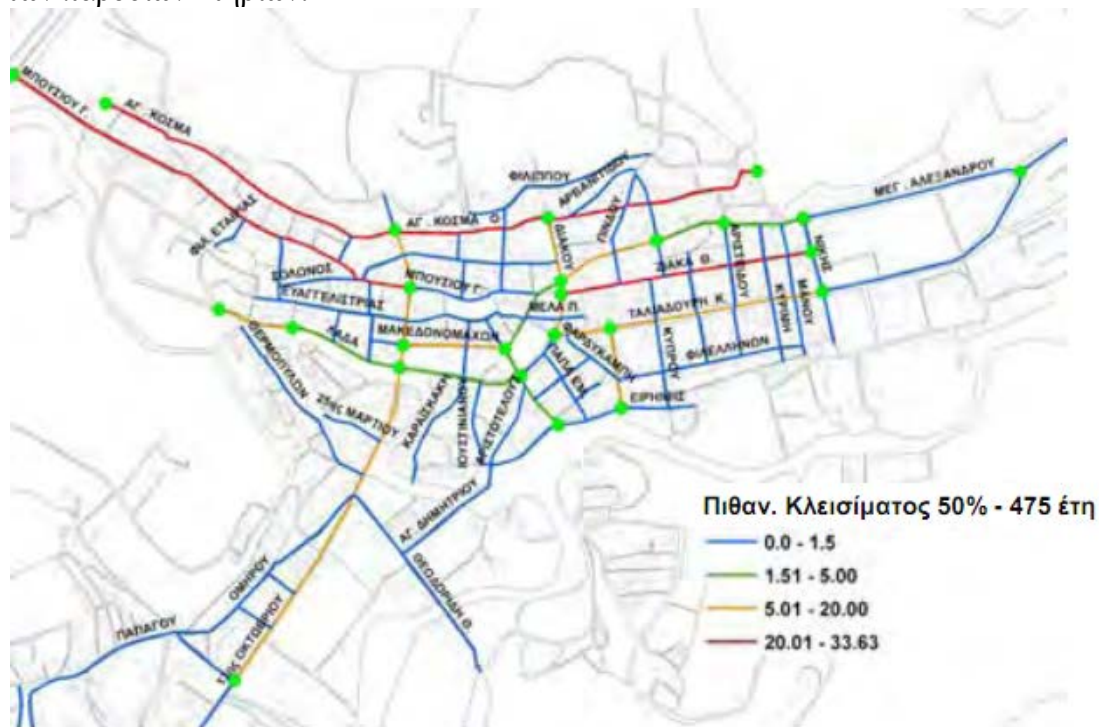


Σχήμα 8.8: Αποτίμηση της τρωτότητας του οδικού δικτύου των Γρεβενών λόγω κατολίσεσης για το άνω (i) και κάτω (ii) όριο των μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων ($T_m=475$ έτη), Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε η αποτίμηση του κινδύνου αποκλεισμού των κύριων οδών της πόλης λόγω της πιθανής κατάρρευσης των παρακείμενων κτηρίων. Η αποτίμηση της λειτουργικότητάς τους μετά από ένα σεισμικό γεγονός έγινε με χρήση μιας απλοποιημένης σχέσης μεταξύ του ύψους των κτηρίων (αριθμός ορόφων) και του πλάτους των χαλασμάτων. Η χωρική κατανομή των κτηρίων που θα υποστούν κατάρρευση ή πολύ σοβαρές βλάβες εξαρτάται από την τυπολογία τους και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Μια κατανομή Gauss περιγράφει την μεταβολή του πλάτους των χαλασμάτων, που είναι συνάρτηση της γωνίας κατάρρευσης (ϕ) και της μείωσης του όγκου του κτηρίου (k_v). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται προκειμένου να εκτιμηθεί η πιθανότητα υπέρβασης συγκεκριμένων επιπέδων λειτουργικότητας των οδών. Η πιθανότητα κατάρρευσης των κτηρίων εκτιμήθηκε με χρήση κατάλληλων καμπυλών τρωτότητας που αναπτύχθηκαν από το Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας του Α.Π.Θ. στα πλαίσια του προγράμματος για τους τύπους κτηρίων της πόλης των Γρεβενών (με βάση την εμπειρία προηγούμενων σεισμών του ελληνικού χώρου, γίνεται η υπόθεση ότι 10-20% των κτηρίων έχουν τέτοια μορφή και όγκο ερειπίων που οδηγούν σε κλείσιμο των οδών).

Στο σχήμα 8.9 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των πιθανοτήτων των αναμενόμενων αποκλεισμών των οδών (50% του πλάτους της οδού) στην πόλη των

Γρεβενών για $T_m=475$ έτη. Παρατηρείται ότι ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό των οδών παρουσιάζει υψηλή πιθανότητα αποκλεισμού των εκτιμηθέντων καταρρεύσεων των παρόδιων κτηρίων.



Σχήμα 8.9: Χωρική κατανομή των πιθανοτήτων των αναμενόμενων κλεισιμάτων των οδών (50% του πλάτους της οδού) στην πόλη των Γρεβενών ($T_m=475$ έτη), Κ. Κακδέρη, Σ. Αργυρούδης, Σ. Φωτοπούλου, Κ. Πιτιλάκης, 2010.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε διερεύνηση γύρω από το θέμα της σεισμικής τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας. Έγινε επισκόπηση πολλών μεθόδων αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς, κυρίως στις Η.Π.Α., αλλά και στην Ελλάδα, κυρίως στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Εξετάσθηκε λεπτομερώς η απόκριση των συνιστωσών των δικτύων τόσο με αναλυτικές λύσεις σε ορισμένες περιπτώσεις, όσο και με προσεγγιστικές λύσεις σε άλλες περιπτώσεις. Υπογραμμίστηκαν τα στοιχεία που απαιτούν προσοχή κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των δικτύων.

Μελέτες για όλα τα παραπάνω θέματα άρχισαν να πραγματοποιούνται σχεδόν την τελευταία δεκαετία και βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Για να κριθεί η αξιοπιστία των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί, θα πρέπει να επαληθευτούν είτε πειραματικά, είτε με σύγκρισή με κάποια δεδομένη αστοχία. Οι αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στις μεθόδους αυτές είναι πολλές και γίνονται πολλές παραδοχές των οποίων η ισχύς αμφισβητείται.

Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, οι μελέτες βρίσκονται σε πολύ αρχικό στάδιο, εκτός από την πόλη της Θεσσαλονίκης ή άλλων μελετών που πραγματοποιήθηκαν σε πόλεις της Ελλάδας (Γρεβενά, Λευκάδα) με πρωτοβουλία του Α.Π.Θ. και του Κ. Πιτιλάκη και των συνεργατών του, που είναι και οι πρωτοπόροι στα θέματα αυτά στην Ελλάδα. Η έλλειψη δεδομένων από προηγούμενες αστοχίες, η απουσία χρηματοδότησης ή πληροφοριών για τα ακριβή στοιχεία των δικτύων για τέτοιου είδους μελέτες, αποτελεί τροχοπέδη στην εξέλιξη των αναλύσεων τρωτότητας και στην προσπάθεια εφαρμογής των διεθνών πρακτικών στην Ελλάδα. Αν ληφθεί υπόψη και η σεισμικότητα που χαρακτηρίζει την Ελλάδα, η αναγκαιότητα για την καθιέρωση αξιόπιστης πρακτικής για την αποτίμηση της τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας έναντι σεισμού είναι κεφαλαιώδους σημασίας.

Με βάση όλα τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφελείας επιδέχεται μεγάλη πρόοδο στην Ελλάδα. Προϋπόθεση για συμβεί η πρόοδος αυτή είναι να υπάρξουν πρωτοβουλίες από δημόσιους φορείς και συνεργασία από τους διαχειριστές των δικτύων κοινής ωφελείας στην Ελλάδα.

Βιβλιογραφία

- American Lifelines Alliance, (2004), guideline for assessing the performance of oil and natural gas pipeline systems in natural hazards and human events, April 30, 2004.
- American Lifelines Alliance, (2004), guideline for assessing the performance of oil and natural gas pipeline systems in natural hazards and human events, part 2 – commentary, April 30, 2004.
- American Lifelines Alliance, (2002), Development of guidelines to define natural hazards performance objectives for water systems, volume 1, September 2002.
- American Lifelines Alliance, (2001), guidelines for the design of buried steel pipe, July 2001.
- American Lifelines Alliance, (2001), Seismic fragility formulations for water systems, part 1 – guidelines, April 2001.
- Αλεξούδη Μ., Ρήγα Ε., Πιτιλάκης Κ., (2008), Διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων ύδρευσης, η περίπτωση του δήμου Θεσσαλονίκης στη Θεσσαλονίκη, 3^ο πανελλήνιο συνέδριο αντισεισμικής μηχανικής και τεχνικής σεισμολογίας, Αθήνα 5 – 7 Νοεμβρίου 2008.
- Αλεξούδη Μ., Κακδέρη Κ., Πιτιλάκης Κ., (2006), Ο ρόλος των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην αποτίμηση της τρωτότητας των δικτύων ύδρευσης, διερεύνηση στη Λευκάδα, 5^ο πανελλήνιο συνέδριο γεωτεχνικής και γεωπεριβαλλοντικής μηχανικής, Τ.Ε.Ε., Ξάνθη 31 Μαΐου - 2 Ιουνίου 2006.
- Αργυρούδης Σ., Πιτιλάκης Κ., Χατζηγώγος Θ., (2008), Αποτίμηση σεισμικής διακινδύνευσης οδικού δικτύου Θεσσαλονίκης, 3^ο πανελλήνιο συνέδριο αντισεισμικής μηχανικής και τεχνικής σεισμολογίας, Αθήνα 5 – 7 Νοεμβρίου 2008.
- Αργυρούδης Σ., Πιτιλάκης Κ., Κάππος Α., Σέξτος Α., (2006), Μελέτη σεισμικής τρωτότητας γεφυρών από σκυροδέμα, εφαρμογή στο πολεοδομικό συγκρότημα Θεσσαλονίκης, 15^ο συνέδριο σκυροδέματος, Τ.Ε.Ε., Ε.Τ.ΕΚ., Αλεξανδρούπολη, 25 – 27 Οκτωβρίου, 2006.
- Αργυρούδης Σ., Πεΐτση Ε., Πεΐτση Α., Πιτιλάκης Κ., (2006), Ο ρόλος των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος, εφαρμογή στις γέφυρες του πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, 5^ο πανελλήνιο συνέδριο γεωτεχνικής & γεωπεριβαλλοντικής μηχανικής, Τ.Ε.Ε, ελληνική επιστημονική εταιρεία εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, Ξάνθη, 31 Μαΐου - 2 Ιουνίου 2006.
- Αυγουστίδου Ο., Η τρωτότητα του αστικού οδικού δικτύου έναντι φυσικών και τεχνολογικών κινδύνων, Αθήνα, Φεβρουάριος 2009.
- Βουγιούκας Ε., Τρέζος Κ., (2005), Τρωτότητα και Διακινδύνευση δικτύων κοινής ωφέλειας, Έκθεση προόδου στο πλαίσιο του Εθνικού Προγράμματος Αντισεισμικής Ενίσχυσης Υφισταμένων Κτηρίων (Ε.Π.Α.Ν.Τ.Υ.Κ/Τ.Ε.Ε.)-Φάση Β', 2005.
- Βουγιούκας Ε., (2003), Τρωτότητα και διακινδύνευση δικτύων κοινής ωφέλειας, Αθήνα, 2003.

- Βουγιούκας Ε., Ψυχάρης Ι., (2001), Πειραματική διερεύνηση της ανελαστικής συμπεριφοράς υπόγειων αγωγών για μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις, 2^ο πανελλήνιο συνέδριο αντισεισμικής μηχανικής και τεχνικής σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη 28-30 Νοεμβρίου 2001, том. Α, σελ. 297-306.
- Γιαννάκου Α., Νομικός Π., Αναστασόπουλος Ι., Γιούτα – Μήτρα Π., Σοφιανός Α., Γκαζέτας Γ., Δυναμική απόκριση σηράγγων – διερεύνηση ιστορικού περιστατικού σεισμικής αστοχίας, 5^ο πανελλήνιο συνέδριο γεωτεχνικής και γεωπεριβαλλοντικής μηχανικής, Τ.Ε.Ε., Ξάνθη 31 Μαΐου - 2 Ιουνίου 2006.
- Κακδέρη Κ., Αργυρούδης Σ., Φωτοπούλου Σ., Πιτιλάκης Κ., (2010), Σεισμικά σενάρια και τρωτότητα δικτύων κοινής ωφελείας και υποδομών στην πόλη των Γρεβενών, 6^ο πανελλήνιο συνέδριο γεωτεχνικής και γεωπεριβαλλοντικής μηχανικής, Τ.Ε.Ε., Βόλος 29 Σεπτεμβρίου – 1 Οκτωβρίου 2010.
- Κακδέρη Κ., Αλεξούδη Μ., Πιτιλάκης Κ., (2008), Ανάλυση σεισμικής διακινδύνευσης αλληλεπιδρώντων δικτύων κοινής ωφελείας, 3^ο πανελλήνιο συνέδριο αντισεισμικής μηχανικής και τεχνικής σεισμολογίας, Αθήνα 5 – 7 Νοεμβρίου 2008.
- Κορομηλάς Β., Διερεύνηση αλληλεπίδρασης υφιστάμενης σταθεροποιημένης κατολίσθησης με υπό διάνοιξη δίδυμες σήραγγες, Αθήνα, 2009.
- Ματσούκας Π., Φλεντζούρης Β., (2007), Αντισεισμικός σχεδιασμός υπόγειων σταθμών μετρό, εφαρμογή στον σταθμό της Βενιζέλου του μετρό Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2007.
- Ο.Α.Σ.Π., Η γνώση είναι προστασία, Αθήνα 2009.
- Πιτιλάκης Κ., (2008), Σεισμική τρωτότητα και διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων κοινής ωφελείας και υποδομών, 3^ο πανελλήνιο συνέδριο αντισεισμικής μηχανικής και τεχνικής σεισμολογίας, Αθήνα 5 – 7 Νοεμβρίου 2008.
- Πιτιλάκης Κ., Αναστασιάδης Α., Αργυρούδης Σ., Κακδέρη Κ., Αλεξούδη Μ., (2008), Αποτίμηση τρωτότητας και διαχείριση σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων κοινής ωφελείας, υποδομών και κρίσιμων υπηρεσιών, εφαρμογή στη μητροπολιτική Θεσσαλονίκη, 3^ο πανελλήνιο συνέδριο αντισεισμικής μηχανικής και τεχνικής σεισμολογίας, Αθήνα 5 – 7 Νοεμβρίου 2008.
- Πιτιλάκης Κ., Κίρτας Ε., Ρήγα Ε., Ματσούκας Π., Φλεντζούρης Β., (2008), Αντισεισμικός σχεδιασμός υπόγειων έργων μεγάλων διαστάσεων, 3^ο πανελλήνιο συνέδριο αντισεισμικής μηχανικής και τεχνικής σεισμολογίας, Αθήνα 5 – 7 Νοεμβρίου 2008.
- Πιτιλάκης Κ., Τσινίδης Γ., Χαλάτης Α., Κίρτας Ε., (2010), Εκτίμηση σεισμικών διατμητικών τάσεων στην περίμετρο υπόγειων κατασκευών μικρού βάθους και μεγάλου μήκους, 6^ο πανελλήνιο συνέδριο γεωτεχνικής και γεωπεριβαλλοντικής μηχανικής, Τ.Ε.Ε., Βόλος 29 Σεπτεμβρίου – 1 Οκτωβρίου 2010.
- Σακκάς Ι., Αγγέλης Ε., Μπακογιάννης Ι., Καζίλης Ν., Ρόζενμπερκ Α., Σοφιανός Α., Ηλίας Μ., Αντωνίου Γ., Ο.Μ.Ο.Ε. – Τεύχος οδικών σηράγγων, Αθήνα, Ιούλιος 2002.
- Φωτοπούλου Σ., (2007), Αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας του δικτύου αποχέτευσης της πόλης των Γρεβενών, Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2007.
- <http://www.aerioattikis.gr/>
- <http://www.ametro.gr/page/>

- www.consrv.ca.gov/cgs/geologic_hazards/earthquakes/Pages/SanFrancisco_1906.aspx
- <http://www.desfa.gr/>
- <http://www.diktyoseismos.gr/about-earthquakes/earthquakes-consequences.php>
- <http://www.greecejapan.com/>
- <http://www.kasmeri.gr/tag/etiketes/fotografia-seismos-iaponia>
- <http://littleshell.earthsourcemedia.org/category/uncategorized/>
- http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/EKDHLVSEIS/PROSEXEIS_EKDHLWSEIS/EPIPTWSEIS_DIARROHS_FYSIKOU_AERIOU/Tab1/arbanitidhs_2.pdf
- <http://www.sansimera.gr/articles/248>
- <http://www.vibrationdata.com/earthquakes/lomaprieta.htm>
- http://023.img98.net/out.php/i192136_ioniaodos1.jpg