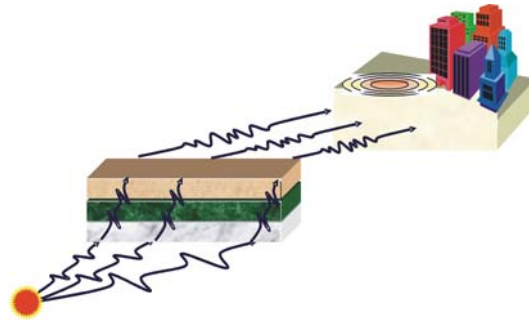




Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος  
Τομέας Γεωφυσικής - Γεωθερμίας

**Δρ Νικόλαος Βούλγαρης**  
Επίκουρος Καθηγητής Σεισμολογίας

# ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ - ΜΙΚΡΟΖΩΝΙΚΗΣ



ΑΘΗΝΑ 2006



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ  
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΤΑΜΕΙΟ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ



Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ  
Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Εκπαίδευσης και Αρχικής  
Επαγγελματικής Κατάρτισης

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ	2
1.	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ	3
2.	ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	3
3.	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ – ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΜΗ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ	4
4.	ΜΕΤΡΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	5
4.1.	<i>Μέγιστη Αναμενόμενη Ένταση</i>	5
5.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	6
6.	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	7
7.	ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ	10
8.	ΗΜΙ-ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	12
8.1.	<i>Τύποι σεισμικών πηγών</i>	14
8.2.	<i>Εξέλιξη των ημι-στατιστικών μεθοδολογιών</i>	15
9.	ΙΣΧΥΡΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ - ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΟΙ	18
9.1.	<i>Παράμετροι πλάτους της εδαφικής κίνησης</i>	19
9.2.	<i>Φασματικές παράμετροι της εδαφικής κίνησης</i>	21
9.3.	<i>Φάσμα Απόκρισης</i>	23
9.4.	<i>Διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης</i>	24
9.5.	<i>Άλλες παράμετροι της ισχυρής εδαφικής κίνησης</i>	25
10.	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	27
11.	ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	27
11.1.	<i>Συλλογή γεωτεχνικών στοιχείων</i>	28
12.	ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	31
12.1.	<i>Ιαπωνική Μέθοδος</i>	32
12.2.	<i>Ρωσική μέθοδος</i>	33
12.3.	<i>Αναλογική μέθοδος</i>	34
12.4.	<i>Μέθοδος Seed</i>	34
12.5.	<i>Μέθοδος τυπικού φασματικού λόγου (SSR) – Μέθοδος Nakamura</i>	35
13.	ΜΙΚΡΟΖΩΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	37
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	39

## **ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ**

Οι σημειώσεις αυτές αποτελούν μία συνοπτική απόδοση τμήματος των ενοτήτων που διδάχτηκαν στα πλαίσια των παραδόσεων του μαθήματος επιλογής Τεχνική Σεισμολογία - Μικροζωνική, για τους φοιτητές του Ζ' Εξαμήνου. Οι σημειώσεις αυτές αποτελούν μια αρχική προσπάθεια του συγγραφέα για τη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου εγχειριδίου για την εκπαίδευση των φοιτητών του Τμήματος Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος.

## 1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

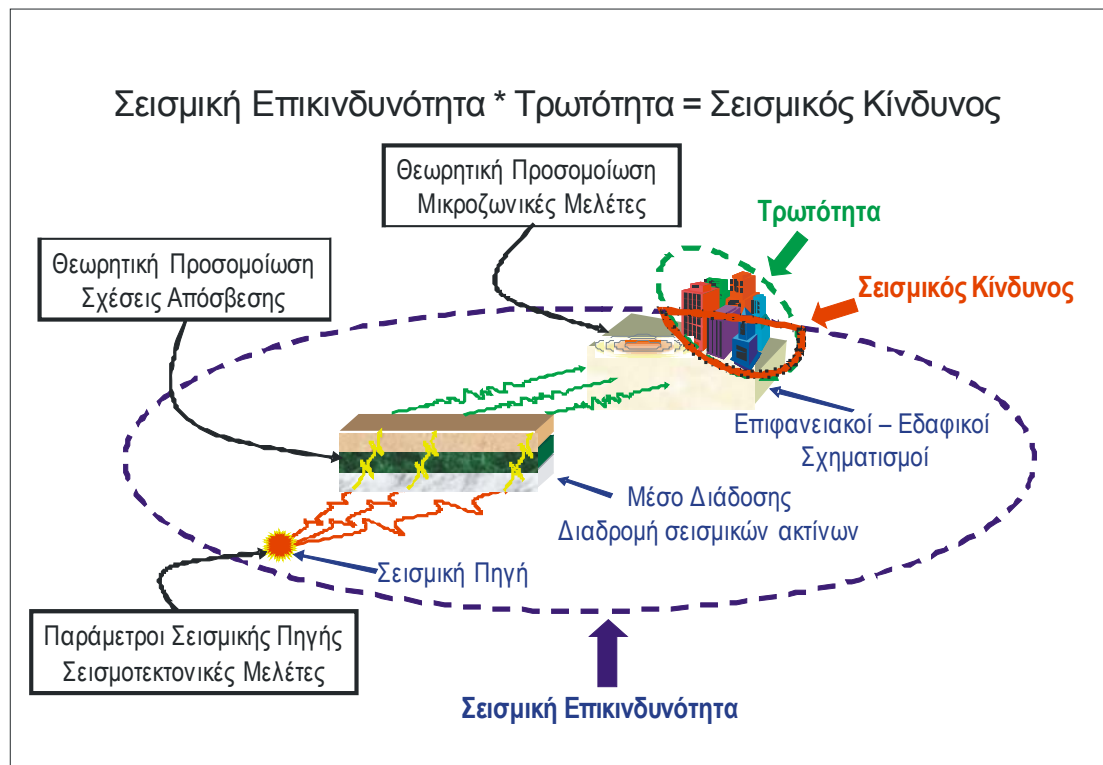
Η Τεχνική Σεισμολογία αποτελεί κλάδο της Εφαρμοσμένης Σεισμολογίας και έχει σαν στόχο την αξιοποίηση και το συνδυασμό των διαθέσιμων σεισμολογικών δεδομένων και μεθοδολογιών προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του Σεισμικού Κινδύνου.

## 2. ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Ο όρος **Σεισμικός Κίνδυνος** (Seismic Risk) χρησιμοποιείται προκειμένου να περιγραφεί ο βαθμός (έκταση και κρισιμότητα) των βλαβών που αναμένεται να υποστεί μία κατασκευή (ή ευρύτερη περιοχή - οικιστικό σύνολο) εξαιτίας ενός επερχόμενου σεισμού. Υπό την ευρύτερη έννοια ο όρος αυτός είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να περιγραφούν οι αναμενόμενες υλικές και οικονομικές συνέπειες ενός σεισμού, καθώς και οι τραυματισμοί και οι απώλειες σε ανθρώπινες ζωές.

Ως **Σεισμική Επικινδυνότητα** (Seismic Hazard) σε μία θέση ορίζουμε την μέγιστη αναμενόμενη τιμή μιας σεισμικής παραμέτρου για δεδομένη περίοδο επανάληψης ή για συγκεκριμένη πιθανότητα μη υπέρβασης και συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η **Τρωτότητα** (Vulnerability) αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα-πάρμετρο κάθε κατασκευής και εκφράζει την αναμενόμενη απόκριση της σε ενδεχόμενη σεισμική κίνηση.



Σχήμα 1. Διάγραμμα συσχέτισης βασικών εννοιών της τεχνικής σεισμολογίας

Όπως προκύπτει από τους προηγούμενους ορισμούς ο Σεισμικός Κίνδυνος είναι δυνατόν να εκφραστεί ως η συνέλιξη (\*) της Σεισμικής Επικινδυνότητας και της Τρωτότητας. Σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή η τελική εκτίμηση του Σεισμικού Κινδύνου προκύπτει ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των αποτελεσμάτων εκτίμησης της Σεισμικής Επικινδυνότητας σε μία συγκεκριμένη θέση και των αποτελεσμάτων του υπολογισμού της Τρωτότητας μίας κατασκευής που βρίσκεται στη συγκεκριμένη θέση. Στη συγκεκριμένη απλουστευμένη θεώρηση για την περιγραφή του και τον καθορισμό του σεισμικού κινδύνου η έννοια της τρωτότητας περιλαμβάνει τόσο τον τεχνικό όσο και τον οικονομικό παράγοντα του στοιχείου στο οποίο αναφέρεται η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Κατά συνέπεια οι δύο αυτοί παράγοντες είναι δυνατόν να διαχωριστούν, οπότε ο όρος τρωτότητα θα αναφέρεται αποκλειστικά στα τεχνικά στοιχεία ενώ η προηγούμενη σχέση του σχήματος 1 μετατρέπεται σε:

Σεισμικός Κίνδυνος=Σεισμική Επικινδυνότητα\*Τρωτότητα\*Διακινδυνευόμενη Αξία

προκειμένου να συμπεριλάβει τα οικονομικά χαρακτηριστικά υπό το γενικό όρο **διακινδυνευόμενη αξία**. Η γενική αυτή σχέση είναι δυνατόν να εφαρμοστεί για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου μίας κατασκευής ή και γενικότερα, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση ενός ευρύτερου οικιστικού συνόλου στα πλαίσια μίας μικροζωνικής μελέτης.

Είναι φανερό ότι, ενώ η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας αποτελεί αντικείμενο της σεισμολογίας, τόσο η εκτίμηση της τρωτότητας μίας κατασκευής όσο και των οικονομικών στοιχείων που σχετίζονται με την εκτίμηση της διακινδυνευόμενης αξίας αποτελούν ερευνητικό αντικείμενο άλλων επιστημονικών κλάδων όπως οι μηχανικοί και οι οικονομολόγοι. Επιπλέον, η μείωση των δύο αυτών παραγόντων αποτελεί και την προφανή διέξοδο για την ελαχιστοποίηση του σεισμικού κινδύνου, δεδομένου ότι η σεισμική επικινδυνότητα καθορίζεται αποκλειστικά από φυσικούς παράγοντες και δεν είναι δυνατόν να μεταβληθεί. Η κατά το δυνατόν ακριβέστερη όμως εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στα πλαίσια ενός συγκεκριμένου προβλήματος αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τον καθορισμό μεθόδων μείωσης των υπολοίπων δύο παραγόντων.

Σχηματικά η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας υπό τη μορφή της αναμενόμενης σεισμικής κίνησης σε μία συγκεκριμένη θέση είναι δυνατόν να παρασταθεί σαν το αποτέλεσμα ενός «Σεισμολογικού Συστήματος» (σχήμα 1) το οποίο αποτελείται από τρία μέρη: τη σεισμική πηγή, το μέσο διάδοσης και τους επιφανειακούς εδαφικούς σχηματισμούς. Κατά συνέπεια, ο υπολογισμός της Σεισμικής Επικινδυνότητας βασίζεται στην φυσική και μαθηματική έκφραση των τριών αυτών τμημάτων του «Σεισμολογικού Συστήματος», που αποτελούν βασικά αντικείμενα έρευνας τόσο της Πειραματικής όσο και της Θεωρητικής Σεισμολογίας.

### **3. ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ – ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΜΗ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ**

Είναι φανερό ότι τόσο η θεωρητική ανάλυση όσο και η μαθηματική έκφραση πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσιάζει σημαντικές αδυναμίες

προσέγγισης της φυσικής πραγματικότητας και κατά συνέπεια η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητες οι οποίες και επιβάλλουν την πιθανολογική προσέγγιση. Η προσέγγιση αυτή εκφράζεται άμεσα στον προηγούμενο ορισμό, είτε με την έννοια της **πιθανότητας μη υπέρβασης** (P) σε T χρόνια, είτε με την έννοια της **περιόδου επανάληψης** (ΠΕ). Οι δύο αυτές έννοιες συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$\ln(P) = -\frac{T}{ΠΕ} \quad \text{ή εναλλακτικά} \quad ΠΕ = -\frac{T}{\ln(P)}$$

Έτσι, για παράδειγμα για πιθανότητα μη υπέρβασης P=90% ή 0.9 για τα επόμενα 50 χρόνια θα έχουμε:

$$ΠΕ = -\frac{50}{\ln(0.90)} \Leftrightarrow ΠΕ = -\frac{50}{-0.1054} \quad ΠΕ=475\text{χρόνια}$$

#### 4. ΜΕΤΡΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

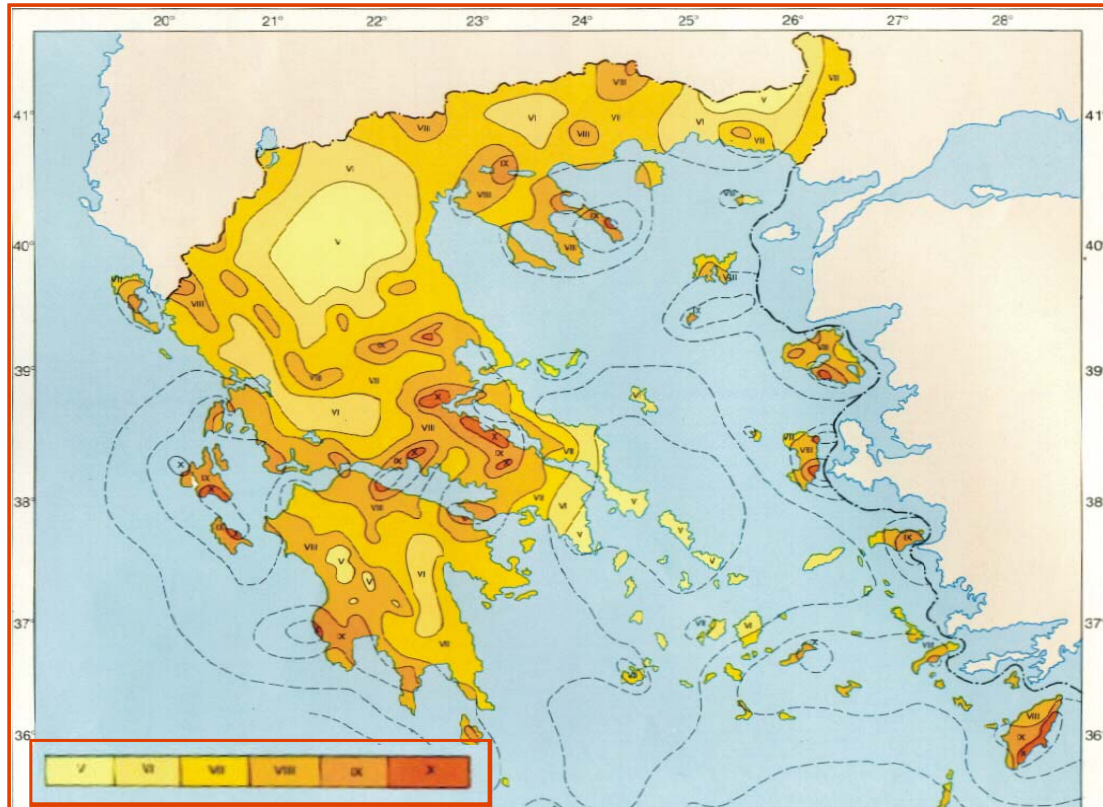
Σύμφωνα με τον ορισμό της, η σεισμική επικινδυνότητα εκφράζεται με βάση την μέγιστη αναμενόμενη τιμή μιας σεισμικής παραμέτρου, η οποία και αποτελεί και το μέτρο της σεισμικής επικινδυνότητας. Ανάλογα με τη μεθοδολογία υπολογισμού και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται μέτρο της Σεισμικής Επικινδυνότητας συνήθως αποτελούν:

- Μέγιστη Αναμενόμενη Ένταση
- Μέγιστο Αναμενόμενο Μέγεθος
- Μέγιστες Αναμενόμενες Τιμές Εδαφικών Παραμέτρων (A,V,D)

ενώ το Συχνοτικό Περιεχόμενο (Μέγιστες και Επικρατούσες τιμές) της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης είναι δυνατόν να αποτελέσει επίσης μέτρο της σεισμικής επικινδυνότητας.

##### 4.1. Μέγιστη Αναμενόμενη Ένταση

Η μέγιστη αναμενόμενη ένταση αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση στο πρόβλημα εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας. Παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της άμεσης ενσωμάτωσης και ομογενοποίησης ιστορικών και ενόργανων δεδομένων και της άμεσης αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της σεισμικής κίνησης, αλλά και τα μειονεκτήματα της εξάρτησης από την ποιότητα των κατασκευών και την υποκειμενικότητα των παρατηρητών που καθορίζουν την ένταση του σεισμού (σχήμα 2).



Σχήμα 2. Μέγιστη παρατηρηθείσα σεισμική ένταση στον ελληνικό χώρο. Γενικευμένη Απεικόνιση της Σεισμικής Επικινδυνότητας.

## 5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Πλήθος μεθοδολογιών έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Ανάλογα με την υπολογιστική μέθοδο στην οποία βασίζονται είναι δυνατόν να διακριθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Τις **Στατιστικές Μεθοδολογίες** οι οποίες βασίζονται αποκλειστικά στην εφαρμογή στατιστικών τεχνικών για την επεξεργασία και ανάλυση σεισμολογικών δεδομένων (καταλόγων). Τα μέτρα Σεισμικής Επικινδυνότητας που υπολογίζονται συνήθως με τη βοήθεια των τεχνικών αυτών είναι η μέγιστη αναμενόμενη σεισμική ένταση, το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος και υπό προϋποθέσεις οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές εδαφικών παραμέτρων.
2. Τις **Ημι-στατιστικές Μεθοδολογίες** οι οποίες βασίζονται στην εφαρμογή στατιστικών τεχνικών για την εκτίμηση της συνεισφοράς σεισμικών πηγών που προκύπτουν από την επεξεργασία και ανάλυση σεισμολογικών δεδομένων σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα τεκτονικά και γεωλογικά στοιχεία. Τα μέτρα σεισμικής επικινδυνότητας που υπολογίζονται συνήθως με τη βοήθεια των τεχνικών αυτών είναι οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές εδαφικών

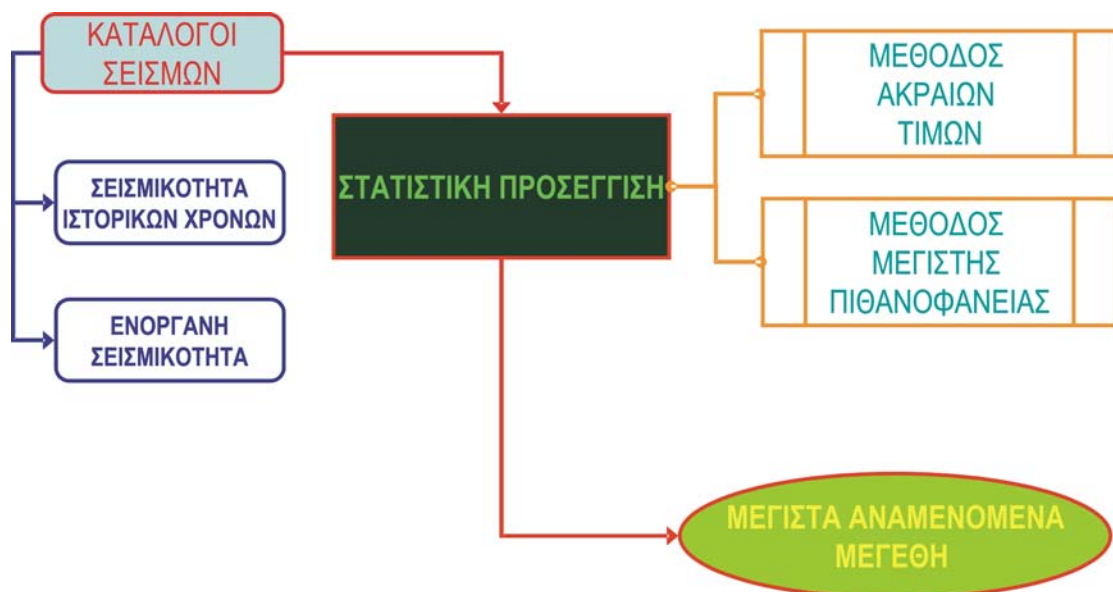
παραμέτρων, καθώς και οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές φασματικών παραμέτρων.

3. Τις **Αιτιοκρατικές Μεθοδολογίες** στα πλαίσια των οποίων επιχειρείται η αναλυτική μαθηματική επίλυση του προβλήματος λαμβάνοντας υπόψη τα τρία τμήματα του «Σεισμολογικού Συστήματος» σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωλογικά, τεκτονικά και σεισμολογικά στοιχεία. Τα μέτρα σεισμικής επικινδυνότητας που υπολογίζονται συνήθως με τη βοήθεια των τεχνικών αυτών είναι οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές εδαφικών Παραμέτρων, καθώς και οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές φασματικών παραμέτρων.

## 6. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Δύο κυρίως μεθοδολογίες (σχήμα 3) έχουν προταθεί στα πλαίσια της αμιγούς στατιστικής προσέγγισης της σεισμικής επικινδυνότητας:

- Η Μέθοδος των Ακραίων Τιμών (Μακρόπουλος και Burton 1983)
- Η Μέθοδος της Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Kijko και Sellevoll 1989)

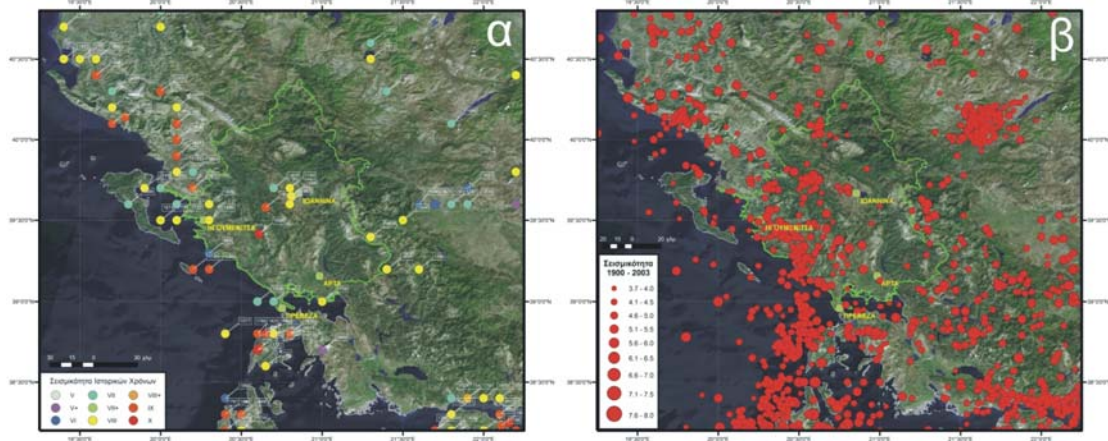


Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής στατιστικών μεθοδολογιών εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας για τον υπολογισμό του μέγιστου αναμενόμενου σεισμικού μεγέθους.

Τα δεδομένα εισόδου και για τις δύο μεθοδολογίες αποτελούν οι υπάρχοντες σεισμολογικοί κατάλογοι, όπως για παράδειγμα ο κατάλογος σεισμικότητας των ιστορικών χρόνων (Παπαζάχος κ.α., 2003), ή ο κατάλογος ενόργανης σεισμικότητας (Μακρόπουλος κ.α., 1987) (σχήμα 4). Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ο καθορισμός του σεισμικού μεγέθους πληρότητας για τις χρονικές περιόδους που καλύπτουν οι κατάλογοι. Θα



πρέπει δηλαδή να είναι γνωστό για κάθε χρονική περίοδο που καλύπτει ο κατάλογος, το σεισμικό μέγεθος πάνω από το οποίο θεωρείται ότι έχουν καταγραφεί όλοι οι σεισμοί στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος. Ενδεικτικό παράδειγμα για τον κατάλογο της ενόργανης σεισμικότητας παρουσιάζεται στον πίνακα I.



Σχήμα 4. Ενδεικτική απεικόνιση, υπό τη μορφή χαρτών, καταλόγων σεισμών των ιστορικών χρόνων (α) και της ενόργανης περιόδου (β) για την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου. Οι κατάλογοι αυτοί αποτελούν τα πρωτογενή δεδομένα για τις στατιστικές μεθοδολογίες υπολογισμού του μέγιστου αναμενόμενου σεισμικού μεγέθους.

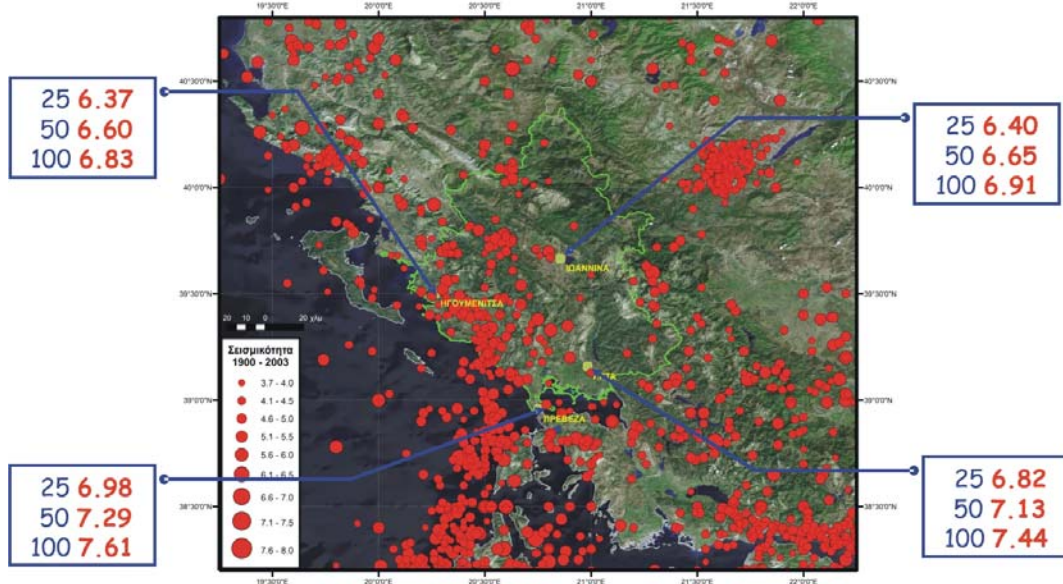
### Πίνακας I

Περίοδοι πληρότητας καταλόγου σεισμών

Μέγεθος	Περίοδος
$M \geq 4.0$	1975 – 1995
$M \geq 4.5$	1964 – 1995
$M \geq 5.0$	1950 – 1995
$M \geq 5.5$	1920 – 1995
$M \geq 6.0$	1911 – 1995
$M \geq 6.5$	1900 – 1995

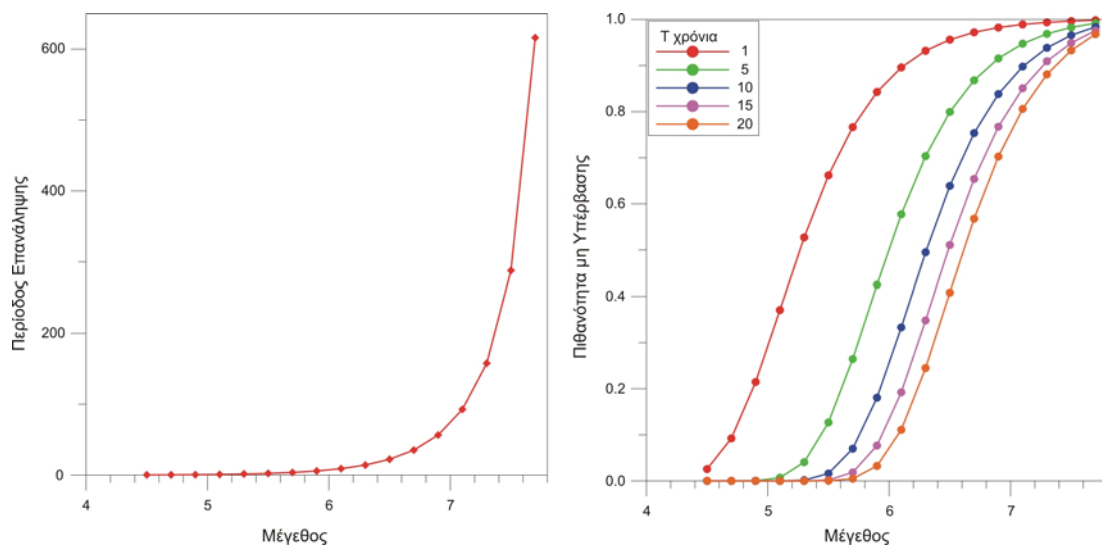
Τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας υπολογισμού αποτελούν οι τιμές των μέγιστων αναμενόμενων σεισμικών μεγεθών για συγκεκριμένη πιθανότητα μη υπέρβασης σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ή εναλλακτικά για συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης. Συνήθως τα αποτελέσματα αυτά παρόλο που αναφέρονται σε μία συγκεκριμένη θέση (σχήμα 5) αφορούν εντούτοις τη πιθανότητα να εμφανιστεί το αναμενόμενο μέγεθος σε μία ευρύτερη περιοχή γύρω από τη θέση ενδιαφέροντος. Το εύρος της

περιοχής αυτής εξαρτάται από το αντίστοιχο γεωγραφικό εύρος που έχει επιλεγεί από τον κατάλογο των σεισμών κατά την εφαρμογή της στατιστικής μεθοδολογίας. Συνήθεις επιλογές αποτελούν ακτίνες 50 ή 100 χιλιομέτρων γύρω από τη θέση ενδιαφέροντος.



Σχήμα 5. Ενδεικτικά αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου των ακραίων τιμών για τέσσερις πόλεις στην ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου. Ο υπολογισμός του μέγιστου αναμενόμενου μεγέθους αναφέρεται σε πιθανότητα μη υπέρβασης 90% και σε χρονικές περιόδους 25, 50 και 100 χρόνια.

Εναλλακτικά τα αποτελέσματα αυτά είναι δυνατόν να απεικονιστούν με τη μορφή γραφικών παραστάσεων που συνδέουν τη περίοδο επανάλιψης ή την πιθανότητα μη υπέρβασης για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, με το αναμενόμενο σεισμικό μέγεθος (σχήμα 6).



Σχήμα 6. Γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων εφαρμογής των στατιστικών μεθοδολογιών εκτίμησης της σεισμικής

επικινδυνότητας.

Βασικό πλεονέκτημα της στατιστικής μεθοδολογίας αποτελεί η επιλογή των μεγίστων τιμών (μεγεθών) για κάθε χρονικό διάστημα (ακραίες τιμές) κατά την διαδικασία υπολογισμού. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η ακρίβεια της μεθόδου δεδομένου ότι η επιλογή του μεγίστου εξασφαλίζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Πρόβλημα για την εφαρμογή των δύο μεθοδολογιών αποτελεί το σχετικά μικρό χρονικό διάστημα που καλύπτει ή περίοδος της ενόργανης σεισμολογίας και δυσκολίες που συνεπάγεται η ενσωμάτωση των ελλিপών ιστορικών δεδομένων στη διαδικασία υπολογισμού. Υπογραμμίζεται επίσης ότι σύμφωνα με τους περιορισμούς της μεθόδου η διαδικασία διάρρηξης δεν λαμβάνεται υπόψη.

## 7. ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

Η έκφραση της Σεισμικής Επικινδυνότητας υπό τη μορφή του μέγιστου αναμενόμενου σεισμικού μεγέθους στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος και για συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης, παρουσιάζει ενδιαφέρον από σεισμολογική άποψη, καθώς και για τον καθορισμό των παραμέτρων σεισμών σχεδιασμού. Η χρησιμότητα όμως της προσέγγισης αυτής για την υποστήριξη του Αντισεισμικού Σχεδιασμού όπου απαιτείται ο καθορισμός των μεγίστων αναμενόμενων τιμών των εδαφικών παραμέτρων (επιτάχυνση, ταχύτητα και μετάθεση) για τη θέση παρατήρησης, είναι περιορισμένη. Προκειμένου να υπολογιστούν οι τιμές αυτές είναι απαραίτητο να αναλυθεί και να εκφραστεί η επίδραση του μέσου διάδοσης κατά τη διαδρομή από τη εστία του σεισμού μέχρι τη θέση παρατήρησης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των **σχέσεων απόσβεσης**.

Οι σχέσεις αυτές αποτελούν την μαθηματική έκφραση του τρόπου απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας σε συνάρτηση με την απόσταση και έχουν συνήθως τη μορφή:

$$\log A = a + bM + cR$$

όπου M το μέγεθος του σεισμού R η υποκεντρική ή επικεντρική απόσταση a, b, c αριθμητικοί συντελεστές και A η εδαφική επιτάχυνση. Είναι δυνατόν η σχέση αυτή να εφαρμοστεί και για την περίπτωση των άλλων εδαφικών παραμέτρων, δηλαδή την εδαφική ταχύτητα V και μετάθεση D.

Στην πράξη για το υπολογισμό των σχέσεων απόσβεσης πραγματοποιείται η μαθηματική προσέγγιση των μεγίστων τιμών των εδαφικών παραμέτρων, που έχουν καταγραφεί σε ειδικά όργανα τους επιταχυνσιογράφους, για σεισμούς διαφόρων μεγεθών και σε διαφορετικές επικεντρικές αποστάσεις από το όργανο καταγραφής. Δεδομένου ότι ο αριθμός των διαθέσιμων καταγραφών είναι σχετικά μικρός οι σχέσεις αυτές παραμένουν αρκετά προσεγγιστικές. Παρόλα αυτά καθώς βελτιώνονται οι δυνατότητες με τη βελτίωση των ψηφιακών καταγραφών αναμένεται να αυξηθεί και η αξιοπιστία των σχέσεων απόσβεσης.

Είναι φανερό ότι η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη θέση εγκατάστασης του οργάνου στις καταγραφές είναι σημαντική. Επειδή όμως κατά την εγκατάσταση λαμβάνεται συνήθως πρόνοια ώστε αυτή να γίνεται στο στερεό βραχώδες υπόβαθρο, γι' αυτό και οι τιμές που υπολογίζονται

από τις σχέσεις αυτές θεωρείται ότι αναφέρονται στο σκληρό πέτρωμα ή **σεισμικό υπόβαθρο**.

Ειδικότερα, οι σχέσεις που έχουν προταθεί για τον Ελληνικό χώρο είναι:

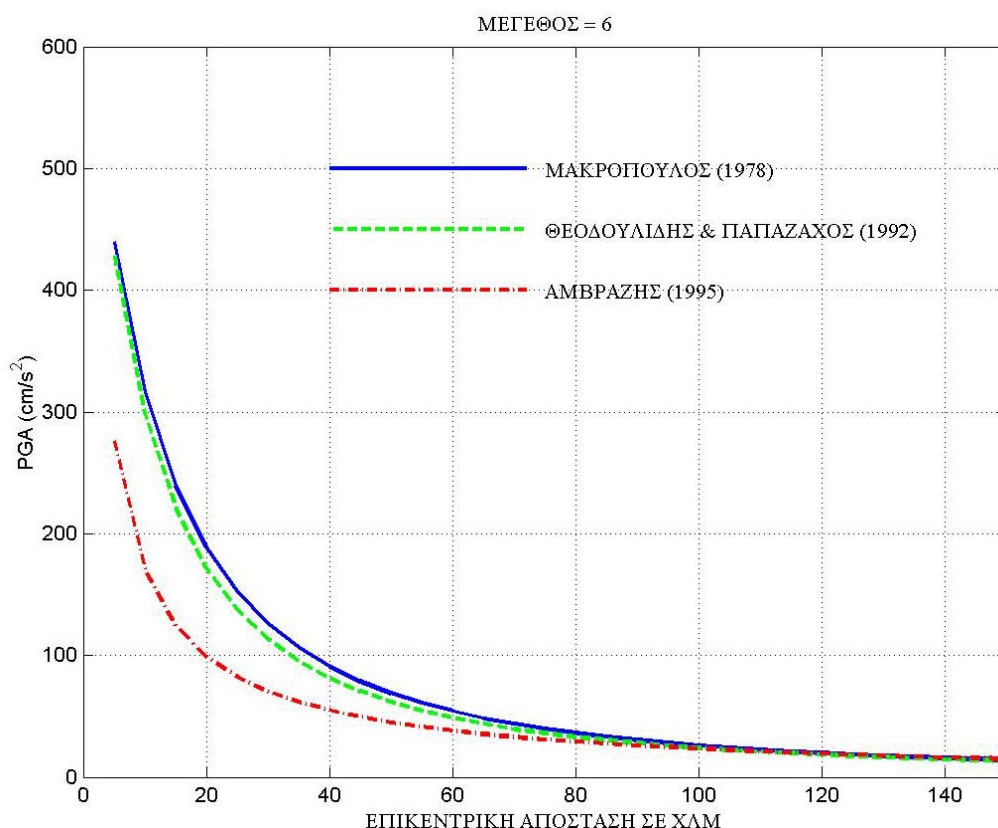
$$A = 2164 \exp(0.8M_s / (R + 20))^{1.8} \text{ Μακρόπουλος (1985)}$$

$$\log A = 3.88 + 1.12M_s - 1.65 \ln(R + 15) + 0.41S \text{ Θεοδουλίδης \& Παπαζάχος (1992)}$$

$$\log V = -0.79 + 1.41M_s - 1.62 \ln(R + 10) - 0.22S$$

$$\log D = -5.92 + 2.08M_s - 1.85 \ln(R + 5) - 0.97S$$

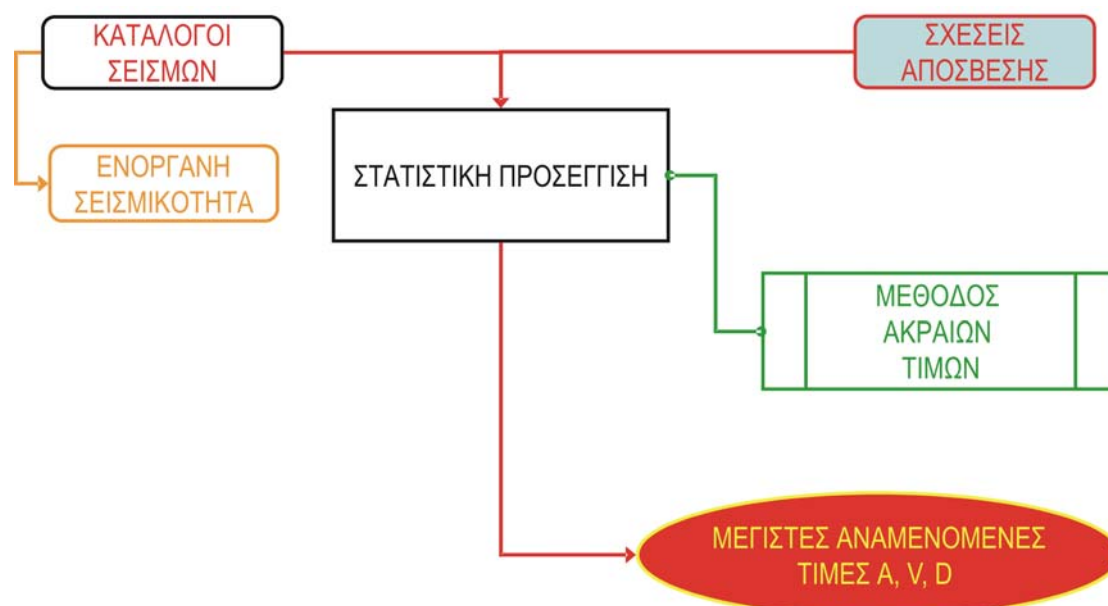
Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται γραφικά η μορφή της σχέσης απόσβεσης για μέγεθος σεισμού 6.0 και διαφορετικές υποκεντρικές αποστάσεις.



Σχήμα 7. Γραφικές παραστάσεις σχέσεων απόσβεσης για μέγεθος 6.0 και διαφορετικές υποκεντρικές αποστάσεις.

Ο καθορισμός των σχέσεων απόσβεσης επιτρέπει την περιγραφή της επίδρασης του μέσου διάδοσης κατά τη μεταφορά της σεισμικής κίνησης από την σεισμική εστία στη θέση παρατήρησης. Συνεπώς, το διάγραμμα που περιγράφει τις βασικές αρχές της στατιστικής μεθοδολογίας εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας, είναι δυνατόν να διαμορφωθεί ώστε οι σχέσεις απόσβεσης να αποτελέσουν τμήμα των δεδομένων (σχήμα 8) και τα αποτελέσματα να εκφραστούν υπό τη μορφή μέγιστων αναμενόμενων τιμών των εδαφικών παραμέτρων στη θέση ενδιαφέροντος για

συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης. Οι τιμές αυτές στη συνέχεια είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό.



Σχήμα 8. Τροποποιημένο διάγραμμα ροής στατιστικών μεθοδολογιών εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας για τον υπολογισμό μέγιστων αναμενόμενων τιμών των εδαφικών παραμέτρων.

## 8. ΗΜΙ-ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, βασικό μειονέκτημα της στατιστικής μεθοδολογίας αποτελεί το γεγονός ότι η διαδικασία διάρρηξης δεν λαμβάνεται υπόψη ενώ οι υπολογισμοί βασίζονται αποκλειστικά στα σεισμολογικά δεδομένα και επηρεάζεται σημαντικά από την ακρίβεια και την πληρότητα τους. Μια προσπάθεια για πιο ρεαλιστική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας λαμβάνοντας υπόψη τόσο σεισμολογικά, όσο και γεωλογικά – τεκτονικά δεδομένα, αποτελεί η **Ημι-στατιστική Μεθοδολογία**. Βασικό χαρακτηριστικό της, αποτελεί ο καθορισμός της γεωμετρίας και του δυναμικού των σεισμικών πηγών στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, η συνεισφορά των οποίων λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας για μία συγκεκριμένη θέση.

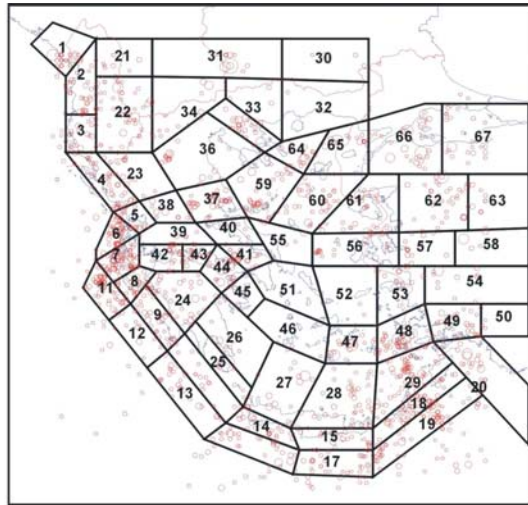
Όπως φαίνεται στο σχήμα 9 που περιγράφει τη βασική ροή της ημι-στατιστικής μεθοδολογίας, το πρώτο βήμα είναι καθορισμός της γεωμετρίας των σεισμικών πηγών, που βασίζεται στην συνδυασμένη αξιολόγηση γεωλογικών τεκτονικών και σεισμολογικών δεδομένων.

Ακολουθεί ο καθορισμός του μοντέλου επανάληψης των σεισμών, δηλαδή η έκφραση του δυναμικού της κάθε σεισμικής πηγής. Συνήθως για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η γνωστή σχέση Gutenberg – Richter:

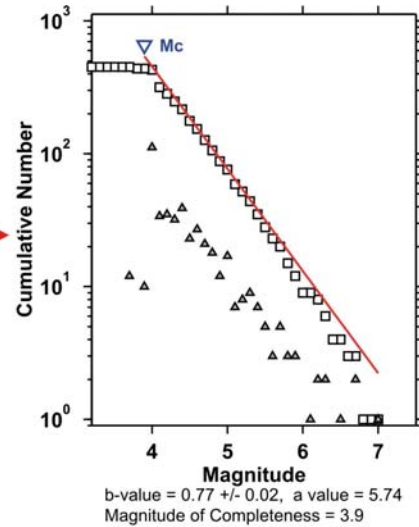
$$\log N(M) = a - bM$$



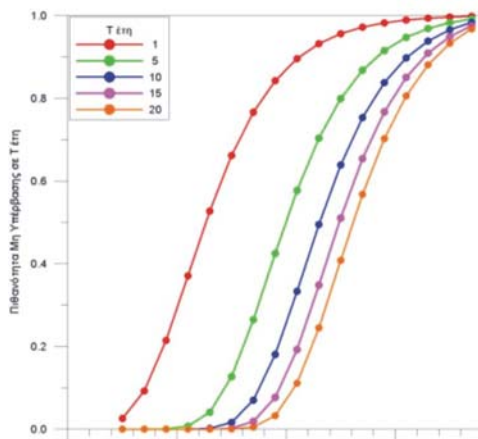
όπου N είναι ο αριθμός των σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο ίσο του M και a και b σταθερές που χρησιμοποιούνται για να τον καθορισμό του δυναμικού της σεισμικής πηγής.



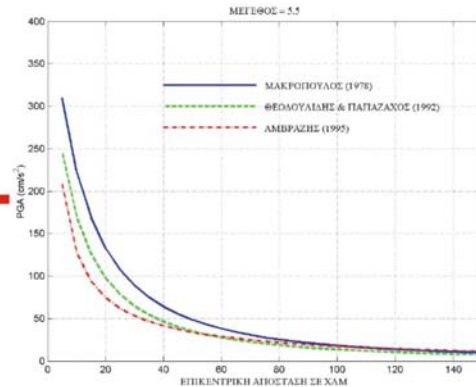
ΣΤΑΔΙΟ 1  
Μοντέλο Σεισμικών Πηγών



ΣΤΑΔΙΟ 2  
Μοντέλο Επανάληψης Σεισμών



ΣΤΑΔΙΟ 4  
Μέγιστη Εδαφική Παράμετρος



ΣΤΑΔΙΟ 3  
Σχέσεις Απόσβεσης

Σχήμα 9. Κύρια στάδια εφαρμογής της ημι-στατιστικής μεθοδολογίας εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας.

Οι σχέσεις απόσβεσης επιτρέπουν και πάλι τον υπολογισμό της επίδρασης του μέσου διάδοσης από την κάθε σεισμική πηγή μέχρι τη θέση ενδιαφέροντος με τη βοήθεια του θεωρήματος της ολικής πιθανότητας σύμφωνα με το οποίο:

$$P[A] = \iint P[A / m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr$$

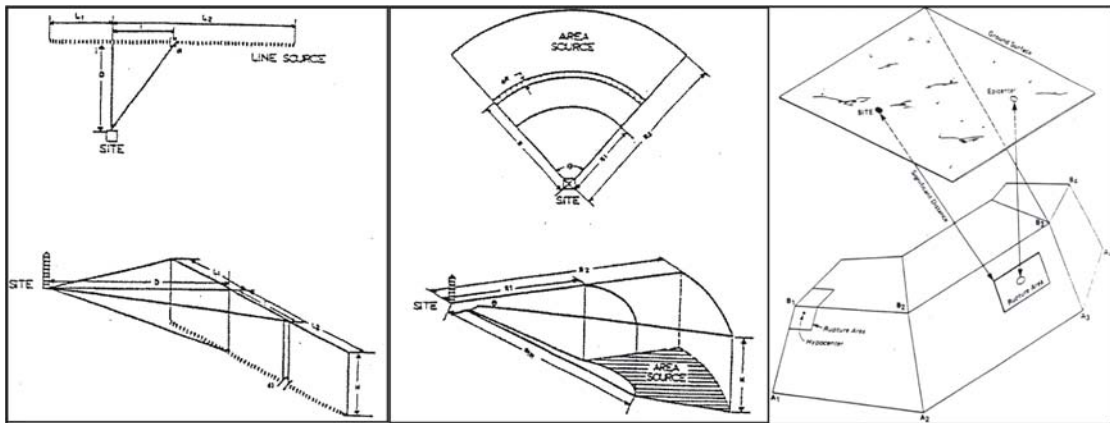
όπου:

$P[A]$  είναι η αδέσμευτη πιθανότητα να εμφανιστεί στην εξεταζόμενη περιοχή σεισμική επιτάχυνση  $A$ , δεδομένης της πιθανότητας σεισμού, μεγέθους  $m$ , σε απόσταση  $r$ ,

$f_R(r)$  και  $f_M(m)$  είναι οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της απόστασης και του σεισμικού μεγέθους, αντίστοιχα.

### 8.1. Τύποι σεισμικών πηγών

Ο καθορισμός της γεωμετρίας των σεισμικών πηγών αποτελεί το χαρακτηριστικό στοιχείο της ημι-στατιστικής μεθοδολογίας εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας. Η διαδικασία αυτή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, βασίζεται στη συνδυασμένη αξιολόγηση των διαθέσιμων γεωλογικών τεκτονικών και σεισμολογικών στοιχείων.



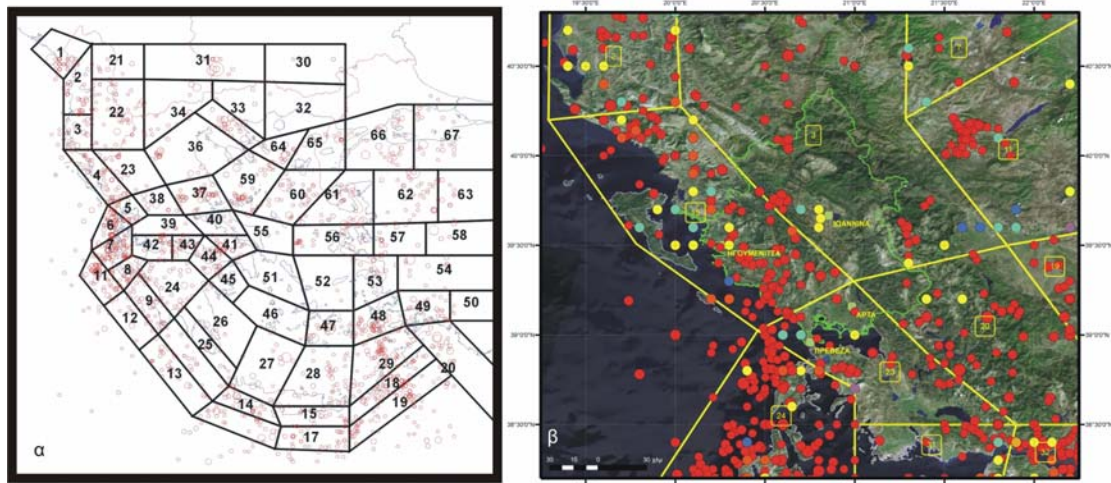
Σχήμα 10. Κύριοι τύποι σεισμικών πηγών.

Το σχήμα των σεισμικών πηγών (σχήμα 10) είναι δυνατόν να ποικίλει και συνήθως διακρίνουμε:

- **Σημειακές** Ο τύπος αυτός της σεισμικής πηγής χρησιμοποιείται όταν παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση epicenters, σε απόσταση, συνήθως, της τάξης των 100 km από την εξεταζόμενη περιοχή.
- **Γραμμικές** Στην περίπτωση γραμμικής σεισμικής πηγής, δηλαδή ενός ρήγματος, θεωρούμε ότι τα epicenters βρίσκονται κατά μήκος γνωστής διεύθυνσης και υπάρχει μεγάλη συσχέτιση με ρήγμα γνωστού προσανατολισμού, θέσης και μήκους.
- **Επιφανειακές** (Κυκλικές, Ορθογώνια Παραλληλόγραμμα, Τραπεζία κλπ) Στην περίπτωση που τα epicenters των σεισμών δεν παρουσιάζουν καλή συσχέτιση με γνωστό ρήγμα, και η χωρική τους κατανομή είναι μάλλον τυχαία, τότε χρησιμοποιούμε το επιφανειακό μοντέλο. Συνήθως, εφαρμόζεται σε περιοχές όπου τα ρήγματα είναι διαφορετικών προσανατολισμών, δεν εμφανίζουν μια κύρια διεύθυνση, και γενικά, η περιοχή είναι έντονα ρηγματωμένη.

- **Πολυεπίπεδες** (Κεκλιμένες) Επιφανειακές πηγές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και αποτελούνται από ένα σύνολο κεκλιμένων επιπέδων μεταβλητού βάθους, ανάλογα με τα εστιακά βάθη των σεισμών στην εξεταζόμενη περιοχή.

Σήμερα, ο πλέον χρησιμοποιούμενος τύπος σεισμικών πηγών είναι ο επιφανειακός. Ιδιαίτερα σε μεγάλες περιοχές όπως ο ευρύτερος ελληνικός χώρος (σχήμα 11α), καθώς και σε μικρότερες όπως η ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου (σχήμα 11β).



Σχήμα 11. Μοντέλο σεισμικών πηγών του ευρύτερου ελληνικού χώρου (α) και της ευρύτερης περιοχής Ηπείρου (β).

Μετά τον καθορισμό της γεωμετρίας των σεισμικών πηγών που θα χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας είναι απαραίτητο να καθοριστεί το σεισμικό δυναμικό κάθε πηγής. Για το σκοπό αυτό εξετάζεται και αξιολογείται ξεχωριστά η σεισμική δραστηριότητα που σχετίζεται με κάθε μία από αυτές προκειμένου να καθοριστεί το μέγιστο μέγεθος σεισμού που είναι δυνατόν να εμφανιστεί σε σχέση με τη σεισμική αυτή πηγή καθώς και ο ρυθμός έκλυσης της σεισμικής ενέργειας στα όριά της. Αυτό επιτυγχάνεται με το καθορισμό του αναμενόμενου αριθμού των σεισμών συγκεκριμένου μεγέθους σε ετήσια βάση, μετά από την ανάλυση των σεισμολογικών δεδομένων. Στο σχήμα 12 παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα γραφικών παραστάσεων για την εκτίμηση του σεισμικού δυναμικού σε επιλεγμένες πηγές.

## 8.2. Εξέλιξη των ημι-στατιστικών μεθοδολογιών

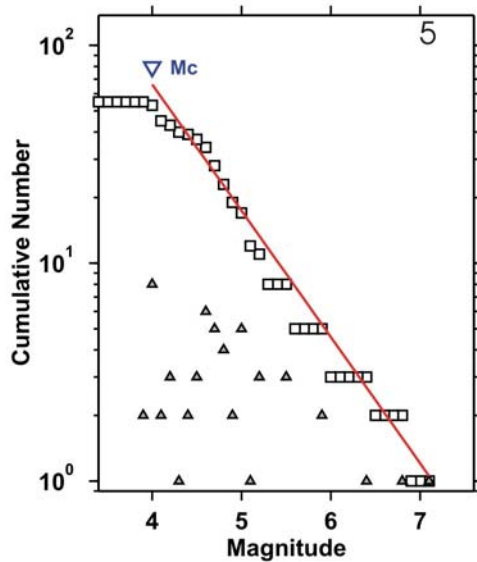
Η παραδοχή ότι οι υπολογισμοί της σεισμικής επικινδυνότητας δεν θα πρέπει αποκλειστικά και μόνο να βασίζονται στα σεισμολογικά δεδομένα έτυχε ευρύτερης αποδοχής κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Αποτέλεσμα ήταν η ανάπτυξη ενός σημαντικού αριθμού ημι-στατιστικών μεθοδολογιών το γενικό διάγραμμα ροής των οποίων παρουσιάζεται στο σχήμα 13.

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφόρων μεθοδολογιών πηγάζουν κυρίως από:

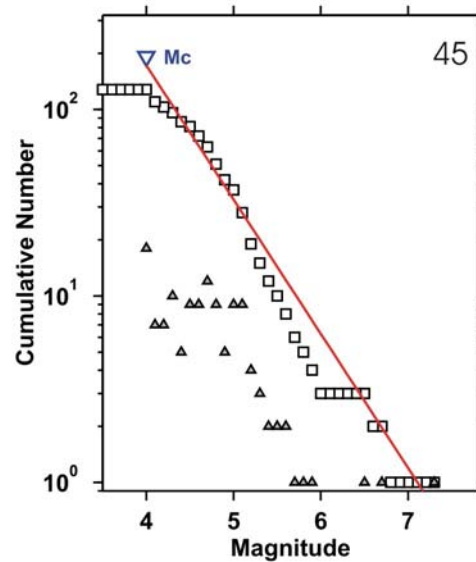
- Τις δυνατότητες που παρέχουν για τον καθορισμό της γεωμετρίας των σεισμικών πηγών



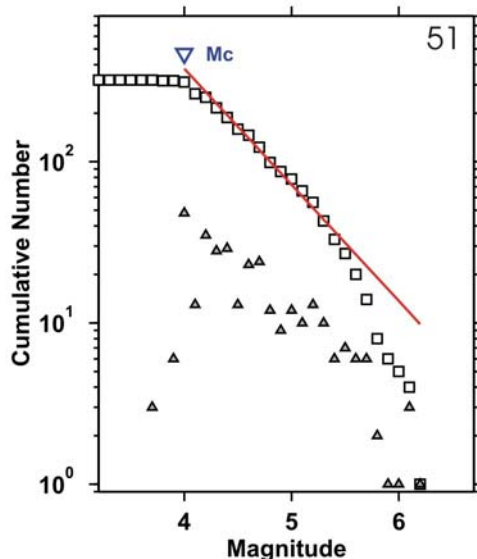
- Το στατιστικό μοντέλο επανάληψης των σεισμών και τον τρόπο έκφρασης του δυναμικού των σεισμικών πηγών
- Την ενσωμάτωση των αβεβαιοτήτων στην έκφραση των τελικών αποτελεσμάτων
- Την αλγοριθμική έκφραση των μαθηματικών υπολογισμών



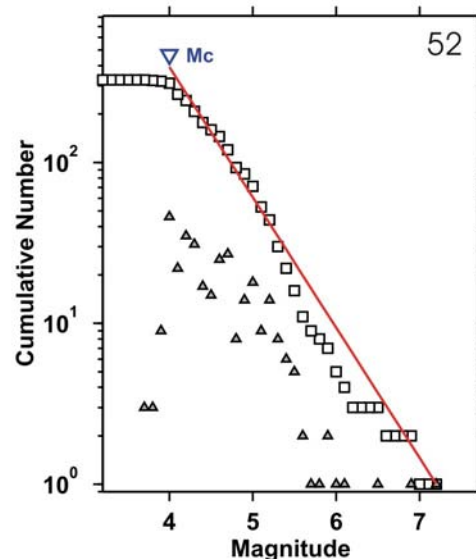
Weighted Least Squares Solution  
 $b\text{-value} = 0.58 \pm 0.06$ ,  $a\text{ value} = 4.14$   
 Magnitude of Completeness = 4



Weighted Least Squares Solution  
 $b\text{-value} = 0.72 \pm 0.07$ ,  $a\text{ value} = 5.12$   
 Magnitude of Completeness = 4

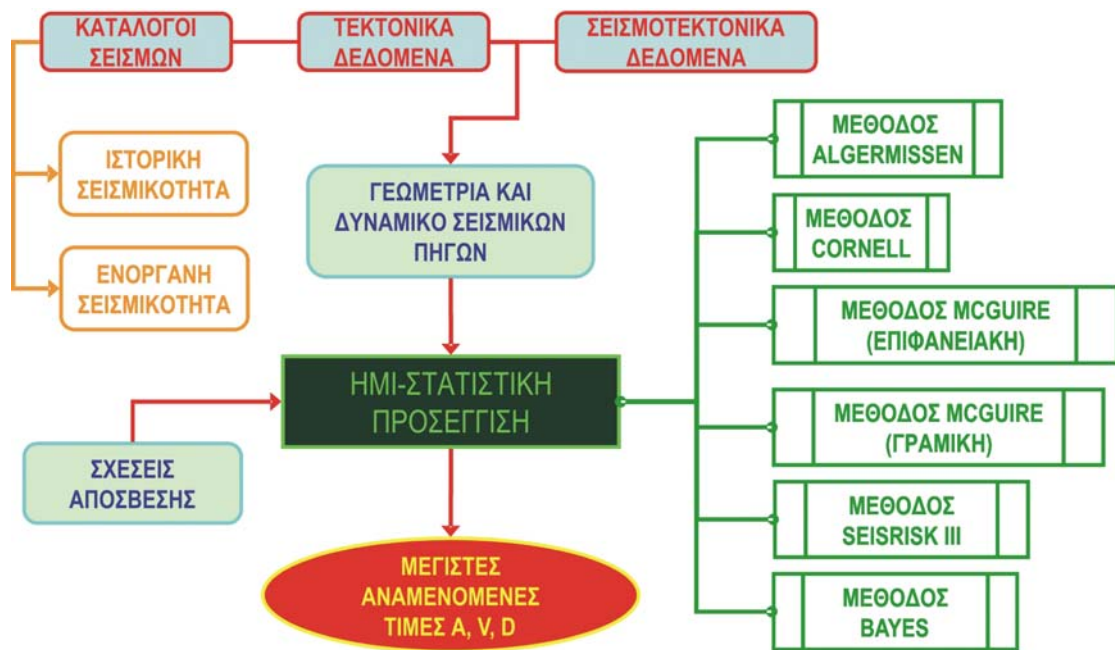


Weighted Least Squares Solution  
 $b\text{-value} = 0.72 \pm 0.06$ ,  $a\text{ value} = 5.46$   
 Magnitude of Completeness = 4



Weighted Least Squares Solution  
 $b\text{-value} = 0.81 \pm 0.06$ ,  $a\text{ value} = 5.83$   
 Magnitude of Completeness = 4

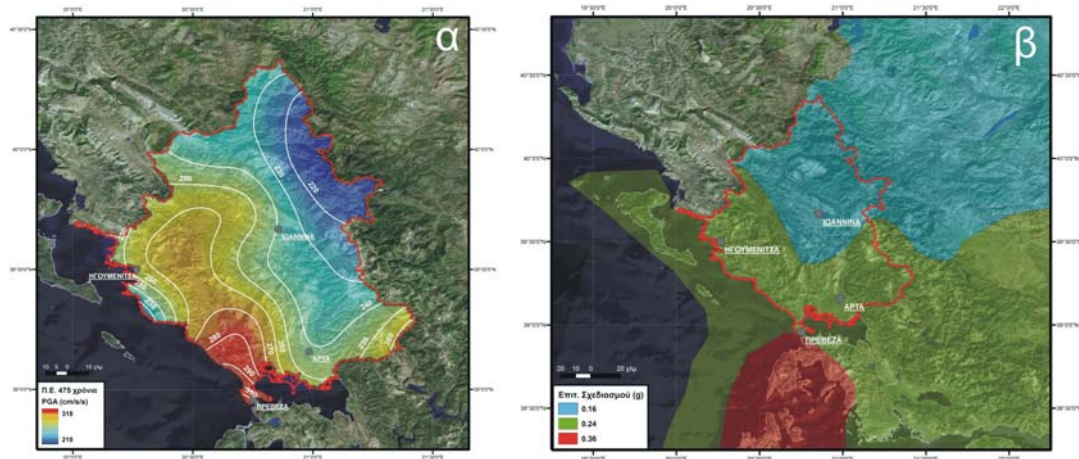
Σχήμα 12. Ενδεικτικά παραδείγματα γραφικών παραστάσεων για την εκτίμηση του δυναμικού σεισμικών πηγών.



Σχήμα 13. Συνοπτικό διάγραμμα ροής ημι-στατιστικών μεθοδολογιών.

Οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές των εδαφικών παραμέτρων σε μία συγκεκριμένη θέση ή σε μία ευρύτερη περιοχή, για συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης ή για συγκεκριμένη πιθανότητα μη υπέρβασης σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αποτελεί και το τελικό αποτέλεσμα όλων των επιμέρους εφαρμογών της ημι-στατιστικής μεθοδολογίας.

Στο σχήμα 14α απεικονίζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της ημι-στατιστικής μεθοδολογίας, και ειδικότερα της μεθόδου SEISRISK III, για την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου. Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται υπό τη μορφή χάρτη μέγιστης αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης με 90% πιθανότητα μη υπέρβασης στα επόμενα 50 χρόνια.



Σχήμα 14. Ενδεικτικά αποτελέσματα εφαρμογής της ημι-στατικής μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της τιμής της μέγιστης αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης (α) και αντίστοιχες τιμές επιτάχυνσης σχεδιασμού του αντισεισμικού κανονισμού (β) για την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου.

Αξιολόγηση αντίστοιχων αποτελεσμάτων για την ευρύτερη περιοχή του ελληνικού χώρου απετέλεσε τη βάση για τη διαμόρφωση των ζωνών επιτάχυνσης σχεδιασμού του αντισεισμικού κανονισμού. Τμήμα του για την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου παρατίθεται στο σχήμα 14β για λόγους σύγκρισης.

## 9. ΙΣΧΥΡΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ - ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΟΙ

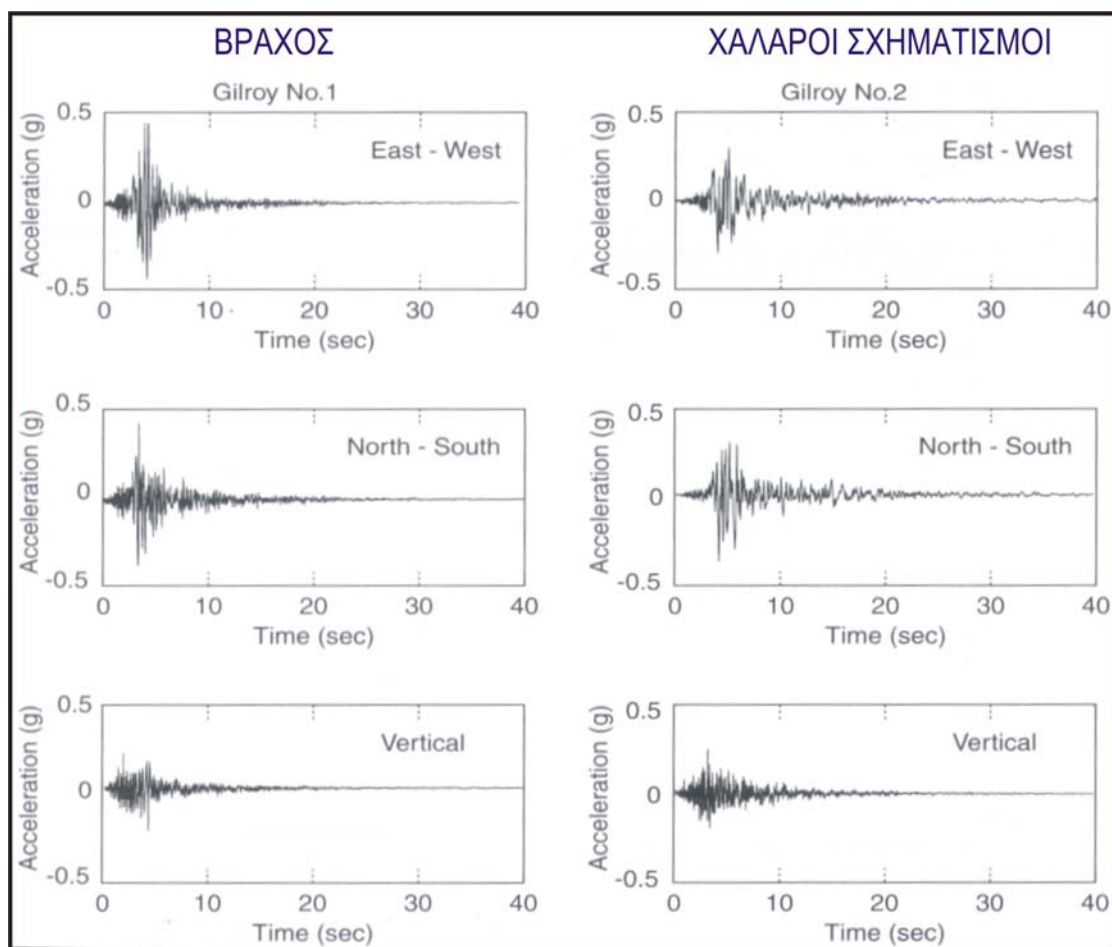
Όπως αναφέρθηκε, ο αποτελεσματικός Αντισεισμικός Σχεδιασμός προϋποθέτει την περιγραφή αναμενόμενων αποτελεσμάτων ενός σεισμού στην θέση ενδιαφέροντος δηλαδή την **αντικειμενική** και **ποσοτική** περιγραφή της ισχυρής εδαφικής κίνησης στη θέση αυτή. Θεωρητικά για την περιγραφή αυτή απαιτούνται 3 συνιστώσες **μεταφοράς** και 3 περιστροφής. Με την αποδοχή ότι η σοβαρότητα των βλαβών που οφείλονται στην περιστροφή είναι αμελητέα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι 3 συνιστώσες μεταφοράς αρκούν για να περιγραφεί η ισχυρή εδαφική κίνηση κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Ο στόχος αυτός είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη χρήση ενός αισθητήρα τριών συνιστωσών και ενός καταγραφικού. Οι επιταχυνσιογράφοι αντιπροσωπεύουν τον καλύτερο συνδυασμό αισθητήρα – καταγραφικού δεδομένου ότι καταγράφοντας την χρονική εξέλιξη της επιτάχυνσης κατά της διάρκεια ενός σεισμού προσφέρουν τη δυνατότητα δευτερογενούς υπολογισμού των αντίστοιχων χρονικών εξελίξεων της ταχύτητας και της μετάθεσης με τη βοήθεια της μαθηματικής ολοκλήρωσης.

Η διαθεσιμότητα ενός ικανού αριθμού επιταχυνσιογραφημάτων (χρονοσειρών επιτάχυνσης) από αντιπροσωπευτικούς σεισμούς με ευρύ φάσμα μεγεθών και από διαφορετικές εστιακές αποστάσεις για μία συγκεκριμένη θέση, θα αποτελούσε την ιδανική περίπτωση για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στη θέση αυτή και θα οδηγούσε στον αποτελεσματικότερο αντισεισμικό σχεδιασμό με τα μικρότερα ποσοστά αβεβαιοτήτων. Ο σχετικά μικρός όμως όγκος των διαθέσιμων παγκοσμίως όγκος δεδομένων, που έχει συγκεντρωθεί στο μικρό διάστημα των ενόργανων παρατηρήσεων με επιταχυνσιογράφους, καθιστά αδύνατη την ιδανική αυτή προσέγγιση και επιβάλλει την ανάπτυξη αναλυτικών μεθοδολογιών υπολογισμού συνθετικών χρονοσειρών που αναπόφευκτα συνοδεύονται από σχετικά υψηλά ποσοστά αβεβαιοτήτων τα οποία αναγκαστικά εκφράζονται και πάλι σε πιθανολογική βάση.

Οι πληροφορίες που συλλέγονται από την ανάλυση των επιταχυνσιογραφημάτων επιτρέπουν και των υπολογισμό των σχέσεων απόσβεσης που χρησιμοποιούνται κατά την εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας, καθώς και διερεύνηση άλλων επιδράσεων στην ενίσχυση ή απομείωση των ισχυρών εδαφικών κινήσεων, όπως για παράδειγμα οι τοπικές εδαφικές συνθήκες και ο χαρακτήρας των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του σχήματος 15 όπου παρουσιάζονται οι καταγραφές από ένα σεισμό σε δύο θέσεις με ίδια επικεντρική απόσταση αλλά διαφορετικούς επιφανειακούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι διαφορές εντοπίζονται τόσο στα μεγαλύτερα μέγιστα πλάτη που

παρατηρούνται στην περίπτωση του βραχώδους υποβάθρου όσο και στο διαφορετικό περιεχόμενο συχνοτήτων μεταξύ των δύο θέσεων.



Σχήμα 15. Χαρακτηριστικές καταγραφές επιταχυνσιογράφων τριών συνιστωσών σε δύο θέσεις που βρίσκονται σε ίσες επικεντρικές αποστάσεις αλλά σε διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς.

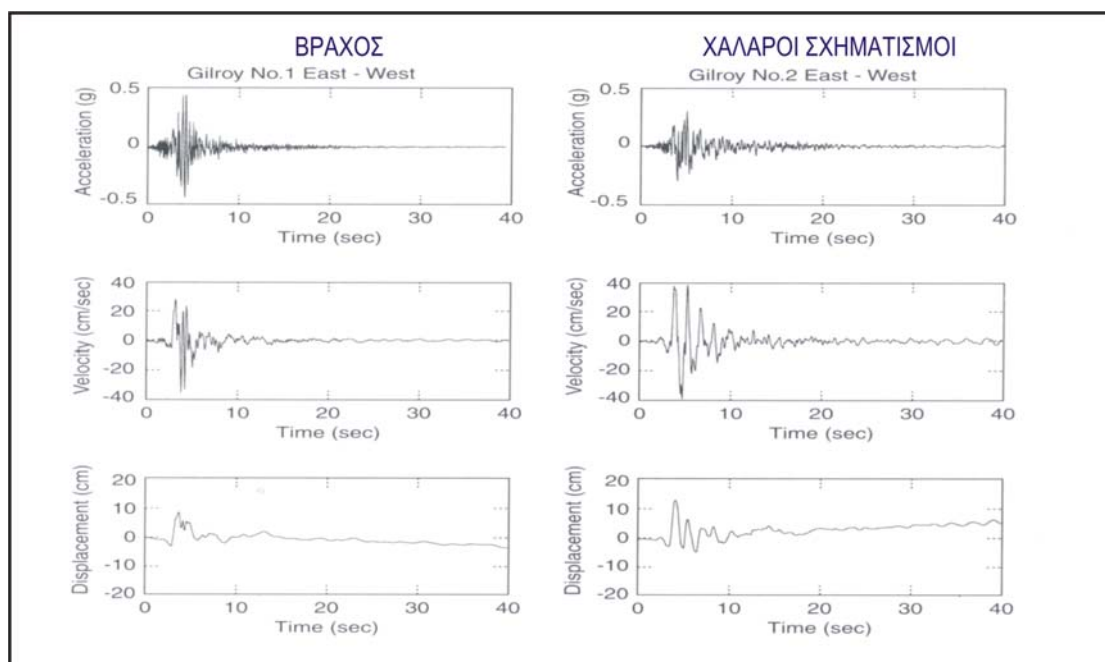
Προκειμένου να επιτευχθεί η αντικειμενική αξιολόγηση των καταγραφών των επιταχυνσιογράφων είναι απαραίτητη τόσο ποιοτική όσο και η ποσοτική περιγραφή των χαρακτηριστικών της ισχυρής εδαφικής κίνησης σε κάθε θέση. Η περιγραφή αυτή είναι δυνατόν να γίνει με κυρίως 3 κατηγορίες παραμέτρων, που αφορούν:

- Το πλάτος
- Το συχνοτικό περιεχόμενο
- Τη διάρκεια

### 9.1. Παράμετροι πλάτους της εδαφικής κίνησης

Η πρώτη κατηγορία παραμέτρων που χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της ισχυρής εδαφικής κίνησης εκείνες που σχετίζονται με τις μετρήσεις του πλάτους στις τρεις συνιστώσες κίνησης. Οι μετρήσεις αυτές δεν πρέπει να περιορίζονται μόνο στις τιμές που αντιστοιχούν στην εδαφική επιτάχυνση, αλλά θα πρέπει να εξετάζεται η ταχύτητα και η μετάθεση. Η αναγκαιότητα

αυτή γίνεται φανερή αν εξετάσουμε της καταγραφές σε σκληρό βράχο και χαλαρούς σχηματισμό που παρουσιάζονται στο σχήμα 16.



Σχήμα 16. Χαρακτηριστικές χρονοσειρές επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετάθεσης σε δύο θέσεις που βρίσκονται σε ίσες επικεντρικές αποστάσεις αλλά σε διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς.

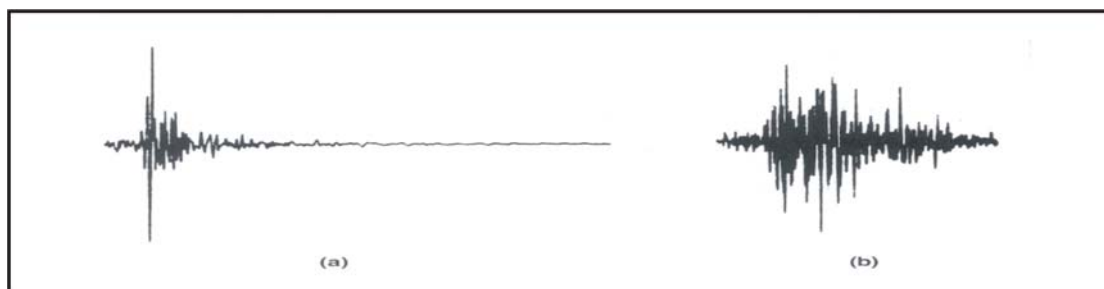
Για τον υπολογισμό των χρονικών εξελίξεων της ταχύτητας και της μετάθεσης από την αρχική καταγραφή της επιτάχυνσης πραγματοποιείται διαδοχική ολοκλήρωση ενώ απαιτείται και εφαρμογή κατάλληλων φίλτρων συχνοτήτων προκειμένου να αποφευχθούν σφάλματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού.

Εξετάζοντας τις χρονικές εξελίξεις της επιτάχυνσης στις δύο θέσεις παρατηρούμε ότι όπως αναφέρθηκε προηγουμένα, η μέγιστες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης παρατηρούνται στις καταγραφές που προέρχονται από το όργανο που έχει εγκατασταθεί σε σκληρό βράχο. Η εικόνα αυτή αντιστρέφεται εξετάζοντας τις αντίστοιχες χρονικές εξελίξεις ταχύτητας και μετάθεσης, όπου οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στις καταγραφές που προέρχονται από τους χαλαρούς επιφανειακούς σχηματισμούς. Το παράδειγμα αυτό υποδεικνύει ότι η εξέταση αποκλειστικά και μόνο των χρονικών εξελίξεων της επιτάχυνσης δεν αρκεί για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Η προηγούμενη προσέγγιση βασίστηκε αποκλειστικά και μόνο στην αξιολόγηση των μέγιστων τιμών των εδαφικών παραμέτρων στις δύο θέσεις. Στην πράξη όμως έχει αποδειχθεί ότι η στιγμιαία μέγιστη τιμή των εδαφικών παραμέτρων δεν είναι πάντοτε ανάλογη των βλαβών που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Αντίθετα, ο αριθμός των κύκλων που διαρκεί η ισχυρή φάση της εδαφικής κίνησης φαίνεται ότι συσχετίζεται καλύτερα με την σοβαρότητα των βλαβών, υποδεικνύοντας τον καθοριστικό χαρακτήρα της συσσωρευτικής παραμόρφωσης. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του σχήματος 17 για τις δύο καταγραφές a και b, όπου η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης εμφανίζεται για ένα μόνο κύκλο στην περίπτωση a ενώ για τη περίπτωση b οι μέγιστες



τιμές παρατηρούνται σε μεγαλύτερο τμήμα της χρονοσειράς. Για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια της **Επικρατούσας Μέγιστης Επιτάχυνσης** η οποία βασίζεται στον υπολογισμό της μέσης τιμής της μέγιστης επιτάχυνσης για 3 ή 5 συνεχόμενους κύκλους. Εναλλακτικά έχει προταθεί η παράμετρος που ονομάζεται **Ενεργός Επιτάχυνση Σχεδιασμού** η οποία εκφράζεται ως η μέση τιμή των μεγίστων επιταχύνσεων για συχνότητες μικρότερες των 8 - 9 Hz, δηλαδή τις συχνότητες αυτές που είναι χαρακτηριστικές των περισσότερων κατασκευών.



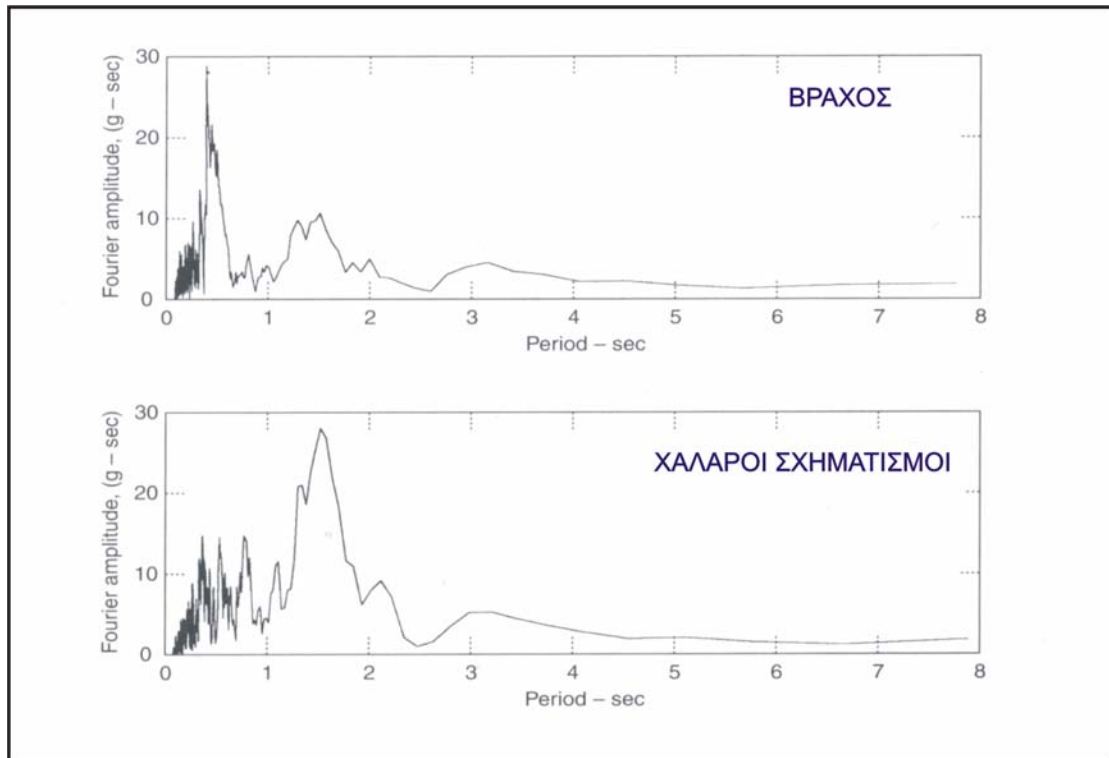
Σχήμα 17. Χρονοσειρές που παρουσιάζουν αντίστοιχη μέγιστη αλλά διαφορετική επικρατούσα μέγιστη επιτάχυνση.

## 9.2. Φασματικές παράμετροι της εδαφικής κίνησης

Προηγούμενα αναφέρθηκαν οι βασικές παράμετροι πλάτους που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των καταγραφών των επιταχυνσιογράφων από τις χρονοσειρές της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης. Όμως, το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης έχει μεγαλύτερη σημασία για τον αντισεισμικό σχεδιασμό δεδομένου ότι η ιδιοπερίοδος μίας κατασκευής αποτελεί ίσως το βασικότερο χαρακτηριστικό της για το σχεδιασμό αυτό. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η μεταφορά των καταγραφών των επιταχυνσιογράφων από τον χώρο του χρόνου στο συχνοτικό χώρο, μετατροπή που επιτυγχάνεται συνήθως με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Fourier. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εξέταση της κατανομής της σεισμικής ενέργειας στο σύνολο του φάσματος της σεισμικής κίνησης, η διάκριση των συχνοτήτων που σχετίζονται με την έκλυση του μεγαλύτερου τμήματος της σεισμικής ενέργειας, καθώς και η διάκριση των επιδράσεων των τοπικών συνθηκών στην έκλυση της. Η διαφοροποίηση λόγω των τοπικών εδαφικών συνθηκών είναι ιδιαίτερα εμφανής στο παράδειγμα του σχήματος 18 όπου παρουσιάζονται τα φάσματα Fourier για τις καταγραφές σε βράχο και χαλαρούς σχηματισμούς. Η σύγκριση των δύο φασμάτων αποκαλύπτει την σχετική μετατόπιση της περιόδου έκλυσης της σεισμικής ενέργειας μεταξύ των δύο θέσεων καθώς και την κατανομή σε ευρύτερη περιοχή του φάσματος για την περίπτωση των χαλαρών σχηματισμών.

Οι συνηθέστεροι τύποι φασμάτων που χρησιμοποιούνται είναι:

- Φάσματα Fourier
- Δυναμικά Φάσματα
- Φάσματα Απόκρισης



Σχήμα 18. Σύγκριση φασμάτων Fourier από καταγραφές σε βράχο και χαλαρούς σχηματισμούς σε αντίστοιχες επικεντρικές αποστάσεις.

Μια σειρά φασματικών παραμέτρων έχουν προταθεί προκειμένου να κωδικοποιηθεί η πληροφορία που περιέχεται στους διάφορους τύπους φασμάτων. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στο σχήμα 19 διακρίνουμε:

Την **Επικρατούσα Περίοδο** η οποία αποτελεί μια χρήσιμη παράμετρο έκφρασης του συχνοτικού περιεχομένου μιας δόνησης και ορίζεται ως η περίοδος αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φάσματος Fourier. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των τοπικών μεγίστων ενός φάσματος συνήθως η Επικρατούσα Περίοδος υπολογίζεται μετά την ομαλοποίηση του φάσματος. Όμως, όπως προκύπτει από το σχήμα 19α η χρήση της παραμέτρου αυτής είναι δυνατόν να δημιουργήσει προβλήματα δεδομένου ότι δύο χρονοσειρές με εντελώς διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά είναι δυνατόν να παρουσιάζουν την ίδια επικρατούσα περίοδο.

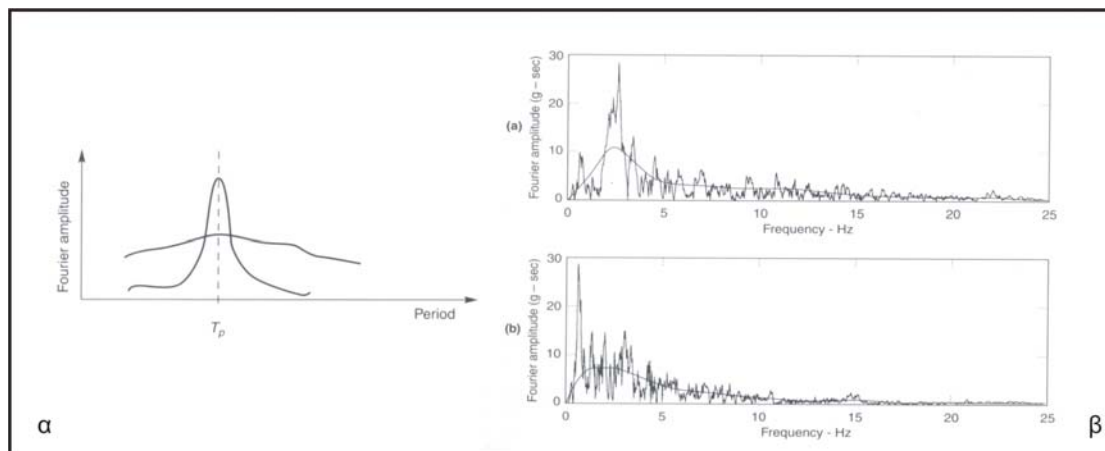
Το **Φασματικό Εύρος** που επιτρέπει την διερεύνηση της διασποράς της σεισμικής ενέργειας κατά μήκος του φάσματος μίας χρονοσειράς. Συνήθως ορίζεται ως το τμήμα εκείνο του ομαλοποιημένου φάσματος για το οποίο το πλάτος υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή, για παράδειγμα το μισό της μέγιστης τιμής.

Τη **Κεντρική Συχνότητα** που ορίζεται ως η συχνότητα που συγκεντρώνεται η ενέργεια του δυναμικού φάσματος.

Τη **Μορφή του Φάσματος** που εκφράζει της διασπορά του φάσματος γύρω από τη κεντρική συχνότητα. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 με τις υψηλότερες τιμές να αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα φασματικά εύρη.

Το λόγο  **$v_{max}/a_{max}$**  ο οποίος σχετίζεται με το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης δεδομένου ότι τα φασματικά μέγιστα επιτάχυνσης και

ταχύτητας παρατηρούνται σε διαφορετικές συχνότητες. Επιπλέον η παράμετρος  $2\pi(\nu_{\max}/a_{\max})$  ορίζεται ως χαρακτηριστική περίοδος του εδάφους στη θέση παρατήρησης.



Σχήμα 19. Απεικόνιση φασματικών παραμέτρων. Επικρατούσα περίοδος – φασματικό εύρος (α) κεντρική συχνότητα - μορφή φάσματος (β).

### 9.3. Φάσμα Απόκρισης

Η αξιολόγηση των επιταχυνσιογραφημάτων με τη βοήθεια τη σειράς των παραμέτρων πλάτους και συχνοτικού περιεχομένου που παρουσιάστηκαν προηγούμενα αποτελεί σημαντικό βήμα για την **αντικειμενική** και **ποσοτική** περιγραφή της ισχυρής εδαφικής κίνησης σε μία θέση, δεδομένου ότι εξασφαλίζει την καταγραφή και περιγραφή της συμβολής και των τριών τμημάτων του «Σεισμολογικού Συστήματος» (πηγή, μέσο διάδοσης και επιφανειακοί σχηματισμοί).

Στην πράξη, για τον αντισεισμικό σχεδιασμό μιας κατασκευής δεν είναι πάντα απαραίτητη η γνώση της πλήρους χρονικής εξέλιξης. Ο σχεδιασμός είναι δυνατόν να βασιστεί στη μέγιστη τιμή της απόκρισης μιας κατασκευής σε μία συγκεκριμένη εδαφική κίνηση. Η απόκριση της κατασκευής εξαρτάται από:

- Τη μάζα
- Την ακαμψία
- Τα χαρακτηριστικά απόσβεσης της κατασκευής
- Τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης

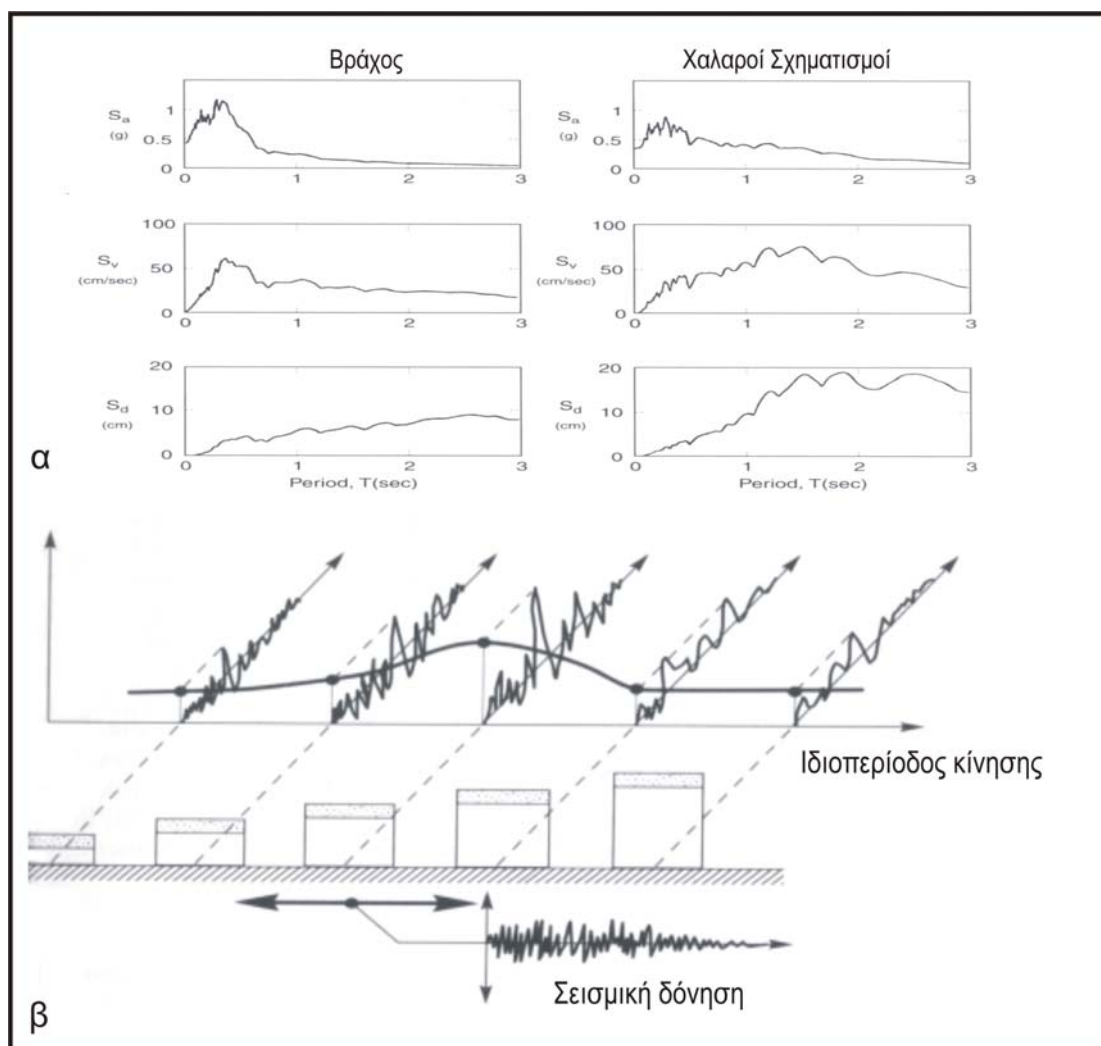
Το κατάλληλο μέσο για τη διερεύνηση και την απεικόνιση του συνδυασμού της ισχυρής εδαφικής κίνησης και της αναμενόμενης απόκρισης μιας κατασκευής αποτελούν τα **φάσματα απόκρισης** (σχήμα 20α).

Εξ' ορισμού τα φάσματα απόκρισης περιγράφουν τη μέγιστη απόκριση ενός συστήματος με 1 βαθμό ελευθερίας (μονοβάθμιος ταλαντωτής), σε μία συγκεκριμένη κίνηση συναρτήσει της ιδιοπεριόδου (ή ιδιοσυχνότητας) και της απόσβεσης που χαρακτηρίζει το σύστημα (σχήμα 20β).

Στη πράξη τα φάσματα απόκρισης προσφέρουν τη δυνατότητα εκτίμησης των τελικών χαρακτηριστικών της ισχυρής κίνησης λαμβάνοντας υπόψη



και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μίας κατασκευής όπως η ιδιοπερίοδος ή η απόσβεση του.



Σχήμα 20. Φάσματα απόκρισης σε δύο διαφορετικές θέσεις (α). Σχηματική αναπαράσταση του ορισμού του φάσματος απόκρισης (β).

Αυτό επιτυγχάνεται με τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης της επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετάθεσης. Αντίστοιχα οι μέγιστες τιμές αναφέρονται ως φασματική επιτάχυνση ( $S_a$ ) ταχύτητα ( $S_v$ ) και μετάθεση ( $S_d$ ). Σημειώνεται ότι, λόγω της σχέσης μεταξύ επιτάχυνσης ταχύτητας και μετατόπισης ισχύει  $S_v = \omega_0 S_d$  και  $S_a = \omega_0 S_v$ .

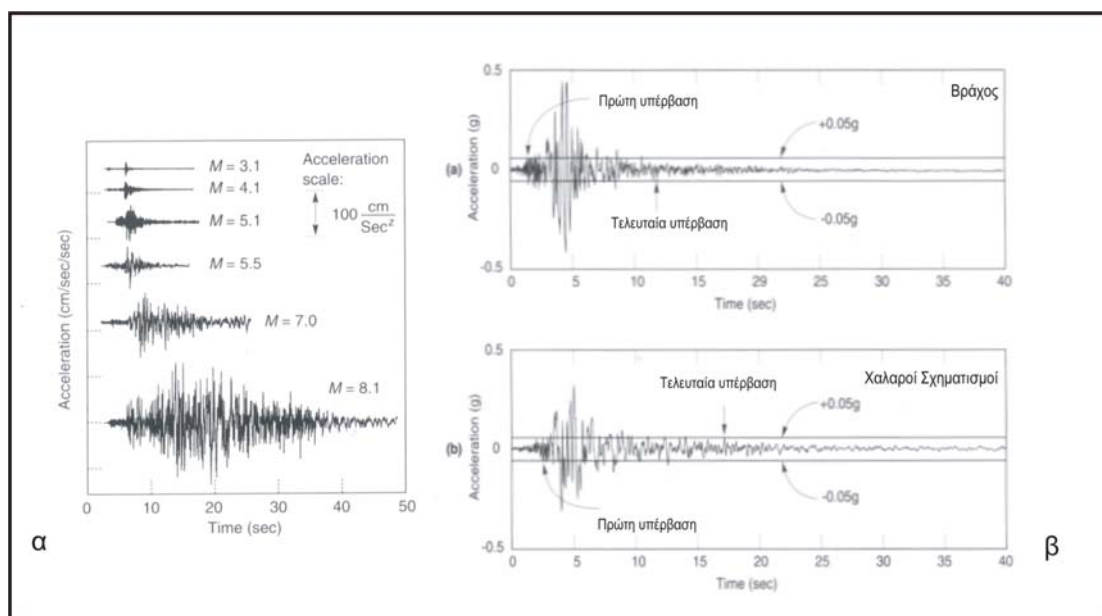
Η παρατήρηση του σχήματος 20α αναδεικνύει τις σημαντικές διαφορές που παρατηρούνται στα φάσματα απόκρισης που προέκυψαν από της καταγραφές σε δύο διαφορετικούς τύπους εδαφικών σχηματισμών. Η διαπίστωση αυτή ενισχύει το σημαντικό ρόλο των φασμάτων απόκρισης για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών.

#### 9.4. Διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης

Η διάρκεια της εδαφικής κίνησης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την έκταση και τη σοβαρότητα των βλαβών που θα παρατηρηθούν κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Έχει διαπιστωθεί ότι πολλές φυσικές διεργασίες που

σχετίζονται με τις σεισμικές καταστροφές, όπως η απώλεια στήριξης, η μείωση της αντοχής ή η ρευστοποίηση εξαρτώνται άμεσα από των αριθμό των κύκλων, ή αντιστροφών της διεύθυνση κίνησης που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Έτσι είναι δυνατόν ένας σεισμός με σχετικά μεγαλύτερες μέγιστες τιμές να προκαλέσει μικρότερες βλάβες από έναν με μικρότερες μέγιστες τιμές αλλά μεγαλύτερη διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

Η διάρκεια αυτή εξαρτάται κυρίως από το χρόνο που απαιτείται για την εκτόνωση της παραμόρφωσης στην εστία δηλαδή το μήκος ρήγματος (μέγεθος) (σχήμα 21α) αλλά και από τον τρόπο διάδοσης της διάρρηξης (μονόπλευρη ή αμφίπλευρη). Βασικό πρόβλημα στην αξιολόγηση της επίδρασης της διάρκειας αποτελεί ο μη αυστηρά καθορισμένος τρόπος ορισμού της. Έτσι, είναι δυνατόν να οριστεί ως ο χρόνος που διαρκεί η υπέρβαση μιας συγκεκριμένης τιμής κατωφλίου (σχήμα 21β). Εναλλακτικά είναι δυνατόν να οριστεί με φασματικά χαρακτηριστικά όπως το τμήμα του φάσματος που περιλαμβάνει το 5% έως το 95% του ενεργειακού περιεχομένου, ή το τμήμα μέχρι τη γωνιακή περίοδο.



**Σχήμα 21.** Εξάρτηση της διάρκειας ισχυρής εδαφικής κίνησης από τη διαδικασία διάρρηξης και το μέγεθος του σεισμού (α). Τρόπος καθορισμού της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης με τον καθορισμό τιμής κατωφλίου (β).

Στο σχήμα 21β εκφράζεται και πάλι μέσω της διαφοροποίησης της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής η σημαντική επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στις καταγραφές.

### 9.5. Άλλες παράμετροι της ισχυρής εδαφικής κίνησης

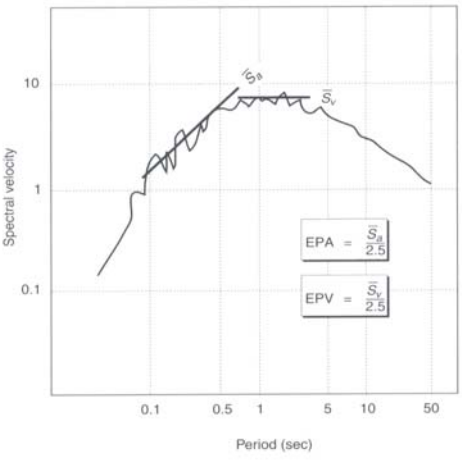
Στα προηγούμενα αναλύθηκαν οι παράμετροι που σχετίζονται με το πλάτος, το φασματικό περιεχόμενο ή τη διάρκεια της εδαφικής κίνησης. Παράλληλα σημειώθηκαν και ορισμένες δυσκολίες που είναι δυνατόν να προκύψουν από την αδυναμία ορισμένων από αυτές τις παραμέτρους να εκφράσουν μονοσήμαντα τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης ενώ

έγινε φανερό ότι τόσο το πλάτος όσο και η συχνότητα της κίνησης είναι καθοριστικές για τον βαθμό των σεισμικών βλαβών. Οι παραπάνω παρατηρήσεις στοιχειοθετούν την αναγκαιότητα καθορισμού παραμέτρων της εδαφικής κίνησης που να εξασφαλίζουν συνδυασμό τόσο του πλάτους όσο και του συχνοτικού περιεχομένου ή της διάρκειας της εδαφικής κίνησης. Ορισμένες από τις παραμέτρους αυτές που παρουσιάζονται στον Πίνακα II είναι:

Η **Μέση Τετραγωνική Επιτάχυνση ( $a_{RMS}$ )** που περιγράφει την επίδραση του πλάτους και του συχνοτικού περιεχομένου με την διάρκεια  $T_d$  και τη μέση ένταση (επιτάχυνση)  $\lambda_0$ . Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό αλλά επηρεάζεται από τη μέθοδο καθορισμού της διάρκειας.

Η **Ένταση Arias ( $I_a$ )** ορίζεται με όλο το επιταχυνσιογράφημα και έτσι δεν εξαρτάται από τον τρόπο καθορισμού της διάρκειας.

Πίνακας II

$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt} = \sqrt{\lambda_0}$	Μέση Τετραγωνική Επιτάχυνση ( $a_{RMS}$ )
$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt$	Ένταση Arias ( $I_a$ )
$I_c = a_{rms}^{1.5} T_d^{0.5}$	Χαρακτηριστική Ένταση ( $I_c$ )
$CAV = \int_0^{T_d}  a(t)  dt$	Αθροιστική Απόλυτη Ταχύτητα (CAV)
$SI(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi, T) dT$ $ASI = \int_{0.1}^{0.5} S_a(\xi = 0.05, T) dT$	Ένταση Φάσματος Απόκρισης Ταχύτητας (SI) ή Επιτάχυνσης (ASI)
	Ενεργός Μέγιστη Επιτάχυνση (EPA) Ενεργός Μέγιστη Ταχύτητα (EPV)

Η **Χαρακτηριστική Ένταση ( $I_c$ )** και η **Αθροιστική Απόλυτη Ταχύτητα (CAV)** σχετίζονται γραμμικά με ορισμένους τύπους δομικών αστοχιών λόγω μέγιστης παραμόρφωσης.

Η **Ένταση Φάσματος Απόκρισης Ταχύτητας (SI) ή Επιτάχυνσης (ASI)** οι οποίες καθορίζονται με βάση τα φάσματα απόκρισης για συγκεκριμένη απόσβεση  $\xi$  όπως ορίζεται στη συνέχεια.

Η **Ενεργός Μέγιστη Επιτάχυνση (EPA)** και **Ενεργός Μέγιστη Ταχύτητα (EPV)** ορίζονται με βάση την κανονικοποίηση των αντιστοίχων φασμάτων απόκρισης σε συγκεκριμένες περιόδους (0.1-0.5 και 1 sec αντίστοιχα). Χρησιμοποιείται ως παράμετρος στους Αντισεισμικούς Κανονισμούς.

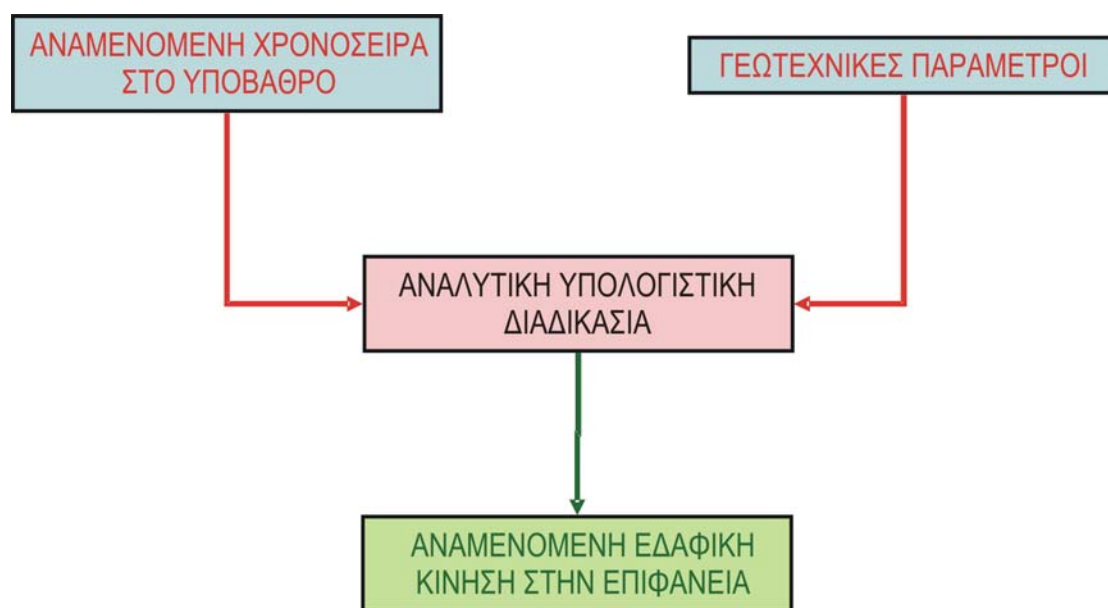
## 10. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Είναι φανερό ότι τα επιταχυνσιογραφήματα και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης αποτελούν την ιδανική και ασφαλέστερη προσέγγιση για τον αντισεισμικό σχεδιασμό μία κατασκευής. Όμως, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, η εφαρμογή στη πράξη προϋποθέτει ότι για κάθε κατασκευή θα ήταν διαθέσιμο το επιταχυνσιογράφημα του πλέον καταστρεπτικού σεισμού για τη συγκεκριμένη θέση, προϋπόθεση που δεν είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί παρά μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις. Αναγκαστικά λοιπόν η πιθανολογική προσέγγιση αποτελεί την μόνη λύση. Εξετάζοντας και πάλι το «Σεισμολογικό Σύστημα» είναι φανερό ότι η στατιστική ή η ημι-στατιστική προσέγγιση της Σεισμικής Επικινδυνότητας εξασφαλίζουν τον υπολογισμό των εδαφικών παραμέτρων της μέγιστης αναμενόμενης σεισμικής κίνησης στο σεισμικό υπόβαθρο. Οι ανάγκες του αντισεισμικού σχεδιασμού απαιτούν τη μεταφορά της κίνησης από το σεισμικό υπόβαθρο στην επιφάνεια και στη θέση θεμελίωσης της κατασκευής. Αυτό προϋποθέτει την «επίλυση» του τελευταίου τμήματος του «Σεισμολογικού Συστήματος» που αφορά την εκτίμηση της επίδρασης των επιφανειακών σχηματισμών. Για το σκοπό είναι διαθέσιμες δύο κατηγορίες μεθοδολογιών ανάλυσης της **Εδαφικής Απόκρισης** οι Γεωτεχνικές και οι Σεισμολογικές Μεθοδολογίες.

## 11. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Οι **Γεωτεχνικές** μεθοδολογίες (σχήμα 22) εξετάζουν τη δυναμική απόκριση των εδαφών σε ενδεχόμενη σεισμική κίνηση βασιζόμενες σε μία διαδικασία δύο σταδίων. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη συλλογή γεωτεχνικών δεδομένων προκειμένου διερευνηθεί η συνοχή και η αντοχή καθώς και άλλες φυσικές ιδιότητες των εδαφών όπως η ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και η πυκνότητα τους. Η συλλογή δεδομένων επιτυγχάνεται μέσω δοκιμών πεδίου και εργαστηρίου. Οι δοκιμές και οι μετρήσεις υπαίθρου επιτρέπουν την παρατήρηση κάτω από πραγματικές συνθήκες και για σημαντικές διαστάσεις. Οι εργαστηριακές δοκιμές επιτρέπουν την ελεγχόμενη μεταβολή των συνθηκών (τάση, παραμόρφωση, πορική πίεση) και κατά συνέπεια την καλύτερη προσομοίωση πιθανών αλλαγών.

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει γραμμική ή μη γραμμική αναλυτική υπολογιστική διαδικασία σε 1, 2 ή και 3 διαστάσεις ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά εδάφους – κατασκευής. Με τους υπολογισμούς αυτούς επιχειρείται η μεταφορά μίας πρότυπης χρονοσειράς από το σεισμικό υπόβαθρο, σύμφωνα με τα δεδομένα της σεισμικής επικινδυνότητας, στην επιφάνεια προκειμένου να εξομοιωθεί η μέγιστη αναμενόμενη σεισμική κίνηση στη θέση ενδιαφέροντος. Η επιλογή της γραμμικής ή μη γραμμικής προσέγγισης εξαρτάται από την πρόθεση αξιολόγησης προηγούμενων σεισμικών φορτίσεων των εδαφικών σχηματισμών. Στην περίπτωση που τα διαθέσιμα στοιχεία επιτρέπουν την συνδυασμένη αξιολόγηση διαδοχικών κύκλων σεισμικής φόρτισης τότε η μη γραμμική ανάλυση είναι δυνατόν να εφαρμοστεί.



Σχήμα 22. Γενικευμένο διάγραμμα ροής της γεωτεχνικών μεθοδολογιών μεταφοράς της σεισμικής κίνησης από το υπόβαθρο στην επιφάνεια.

### 11.1. Συλλογή γεωτεχνικών στοιχείων

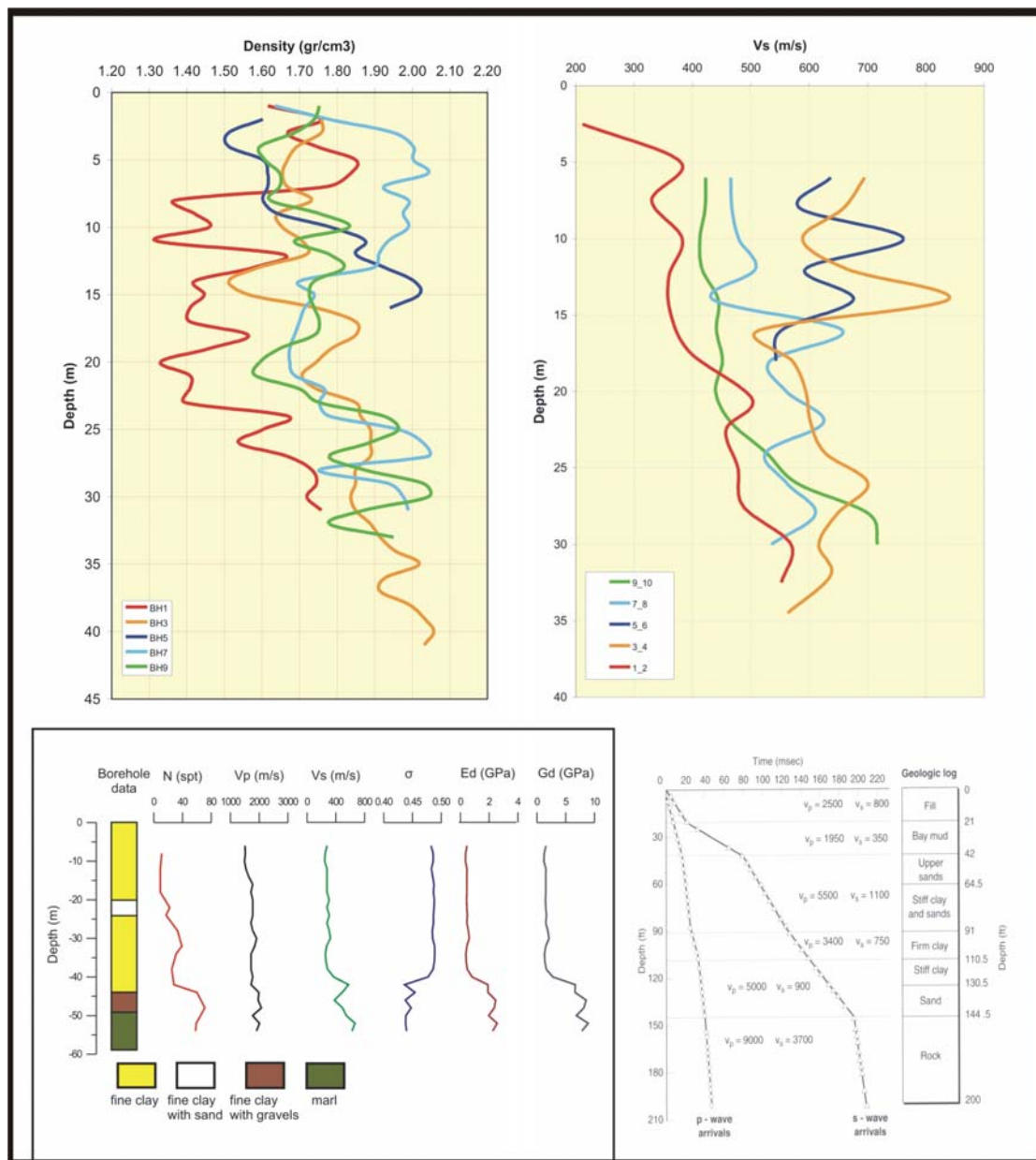
Σύμφωνα με τα προηγούμενα απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της γεωτεχνικής μεθοδολογίας εκτίμησης της εδαφικής απόκρισης αποτελεί ο καθορισμός των γεωτεχνικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών (σχήμα 23). Οι βασικότερες από αυτές είναι η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων και η πυκνότητα των σχηματισμών αυτών. Έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός γεωτεχνικών ή γεωφυσικών δοκιμών για τη συλλογή των απαραίτητων αυτών στοιχείων. Ορισμένες δοκιμές πεδίου βασίζονται στη προσομοίωση σεισμικής διέγερσης και στη μέτρηση παραμέτρων που σχετίζονται με καθεστώς χαμηλής παραμόρφωσης, όπως οι ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Ενδεικτικά διακρίνουμε:

- Σεισμική Ανάκλαση και Διάθλαση
- Φασματική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων
- Διαγραφίες σε γεωτρήσεις
- Crosshole, Downhole, Uphole,

- Σεισμική τομογραφία
- Σεισμικός Κώνος σε συνδυασμό με CPT

Άλλες δοκιμές πεδίου βασίζονται στη μέτρηση παραμέτρων που σχετίζονται με καθεστώς υψηλής παραμόρφωσης, για παράδειγμα:

- Δοκιμή SPT Μετρά τον αριθμό N των κρούσεων που απαιτείται για διείσδυση 30 cm.
- Κωνικό πενετρόμετρο

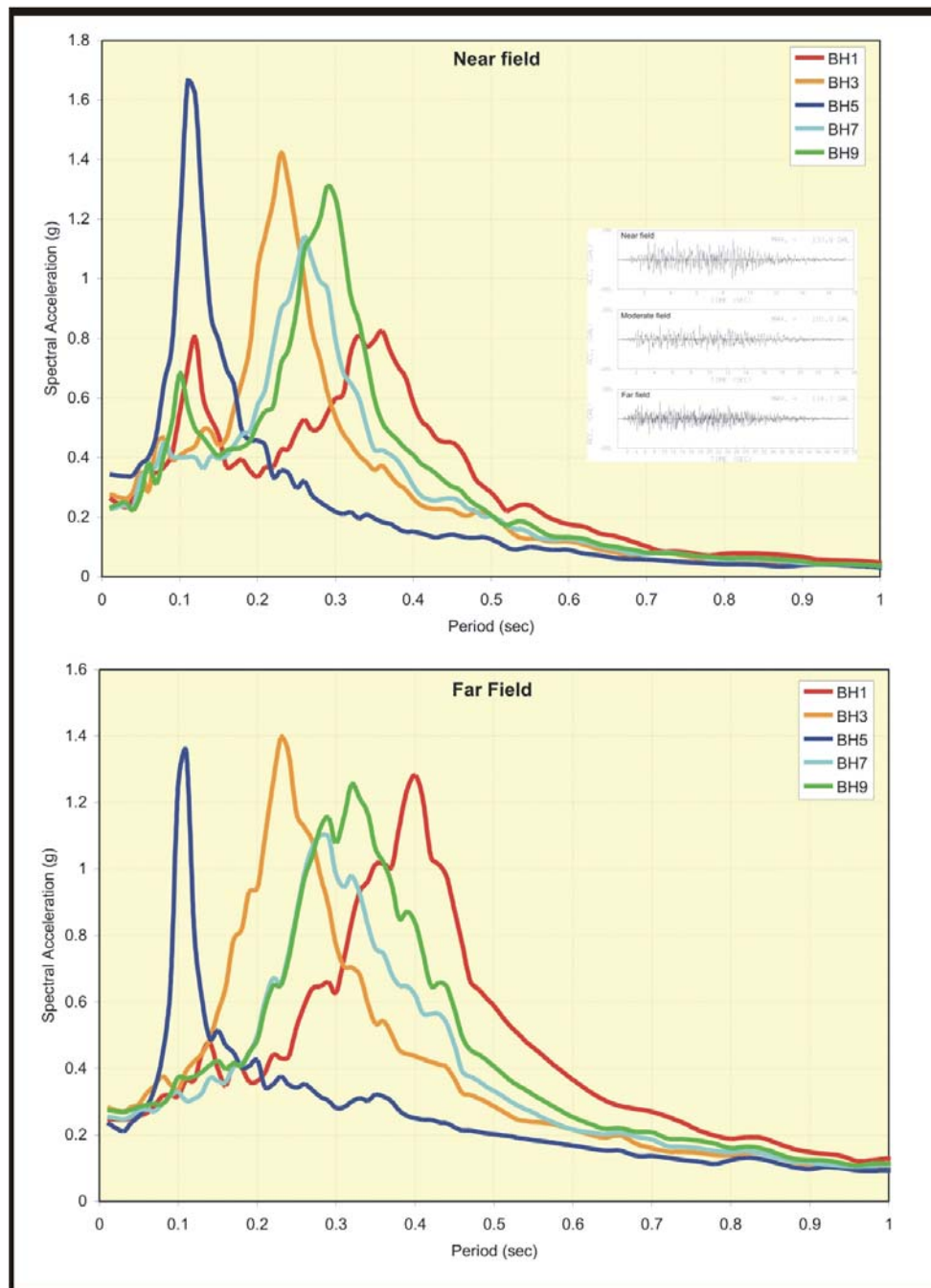


Σχήμα 23. Απεικόνιση αποτελεσμάτων δοκιμών για τον προσδιορισμό εδαφοτεχνικών παραμέτρων.

Οι πέντε πρώτες από τις δοκιμές αυτές αποτελούν ουσιαστικά αντικείμενο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, ενώ οι υπόλοιπες εντάσσονται στο ερευνητικό πεδίο της εδαφομηχανικής. Ταυτόχρονα θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο οι δύο πρώτες κατηγορίες δοκιμών έχουν επιφανειακό χαρακτήρα ενώ οι υπόλοιπες προϋποθέτουν τη διάνοιξη γεωτρήσεων. Η απαραίτητη



αυτή προϋπόθεση εξασφαλίζει παράλληλα τη δυνατότητα πλήρους αποτύπωσης και περιγραφής της στήλης των εδαφικών σχηματισμών έως το υπόβαθρο καθώς και τη δειγματοληψία από τους διάφορους σχηματισμούς για τον υπολογισμό της πυκνότητάς τους και την διενέργεια επιπλέον δοκιμών στο εργαστήριο. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι ο σημειακός χαρακτήρας μίας γεώτρησης ενώ προσφέρει σημαντικές πληροφορίες στη διάσταση του βάθους, εντούτοις δεν προσφέρει εξασφάλιση από της πλευρικές μεταβολές των επιφανειακών σχηματισμών, ενώ συνήθως ο αριθμός των γεωτρήσεων περιορίζεται σημαντικά λόγω του υψηλού κόστους.



Σχήμα 24. Ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογής της γεωτεχνικής μεθοδολογίας.

Στο σχήμα 24 παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα της εφαρμογής της γεωτεχνικής μεθοδολογίας για πέντε διαφορετικές θέσεις οι γεωτεχνικές παράμετροι των οποίων απεικονίζονται προηγούμενα στο σχήμα 23. Κατά την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα που απεικονίζονται στο ένθετο του σχήματος 24 και ειδικότερα εξετάστηκαν οι περιπτώσεις του κοντινού (Near field) και του μακρινού (Far field) σεισμού.

Από το σχήμα 24 είναι προφανής η σημαντική διαφοροποίηση στην κατανομή της φασματικής επιτάχυνσης που παρατηρείται από θέση σε θέση και για τις δύο περιπτώσεις. Ιδιαίτερα εμφανής είναι η σχετική διαφοροποίηση του φάσματος στη θέση BH5 η οποία όπως φαίνεται και στο σχήμα 23 εμφανίζει σημαντικά μικρότερο βάθος υποβάθρου σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις. Η επίδραση του σχετικά μικρού πάχους εδαφικών σχηματισμών στη θέση αυτή αντικατοπτρίζεται στη μορφή του φάσματος και τη συγκέντρωση της σεισμικής ενέργειας σε μικρότερο σχετικά εύρος περιόδων. Στη θέση BH1 εμφανίζεται η αντίθετη εικόνα όπου η αρνητική επίδραση των χαλαρών εδαφικών σχηματισμών γίνεται εμφανής στη μορφή του φάσματος που καταλαμβάνει μεγαλύτερο εύρος περιόδων και η κεντρική περίοδος είναι σαφώς μετατοπισμένη προς υψηλότερες περιόδους σε σχέση με την BH5.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί και η διαφοροποίηση που παρατηρείται σε συνάρτηση με τη διαφοροποίηση του συχνοτικού περιεχομένου της κυματομορφής στο υπόβαθρο. Από την πλουσιότερη συχνοτικά σε σχετικά μικρή απόσταση ως προς την πτωχότερη σε μακρινή εστιακή απόσταση παρατηρούμε αντίστοιχες μεταβολές στη μορφή του φάσματος και αντίστοιχη μετατόπιση της κεντρικής συχνότητας προς μεγαλύτερες περιόδους λόγω μεγαλύτερης απορρόφησης.

## **12. ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ**

Όπως αναφέρθηκε βασικό χαρακτηριστικό των γεωτεχνικών μεθοδολογιών αποτελεί η αναγκαιότητα εκτεταμένων δοκιμών και η διάνοιξη γεωτρήσεων που ανεβάζουν σημαντικά το κόστος της έρευνας. Εναλλακτική προσέγγιση σχετικά μικρότερου κόστους αποτελούν οι **Σεισμολογικές** μεθοδολογίες εκτίμησης της εδαφικής απόκρισης. Βασικό χαρακτηριστικό τους αποτελεί το γεγονός ότι αυτές δεν περιλαμβάνουν το στάδιο της αναλυτικής υπολογιστικής διαδικασίας για τη μεταφορά μίας πρότυπης κίνησης από το σεισμικό υπόβαθρο στη επιφάνεια. Συνήθως οι μεθοδολογίες βασίζονται στην συλλογή δεδομένων από δοκιμές πεδίου και στη συνέχεια την επεξεργασία και ερμηνεία τους στο εργαστήριο. Οι πιο γνωστές μεθοδολογίες είναι:

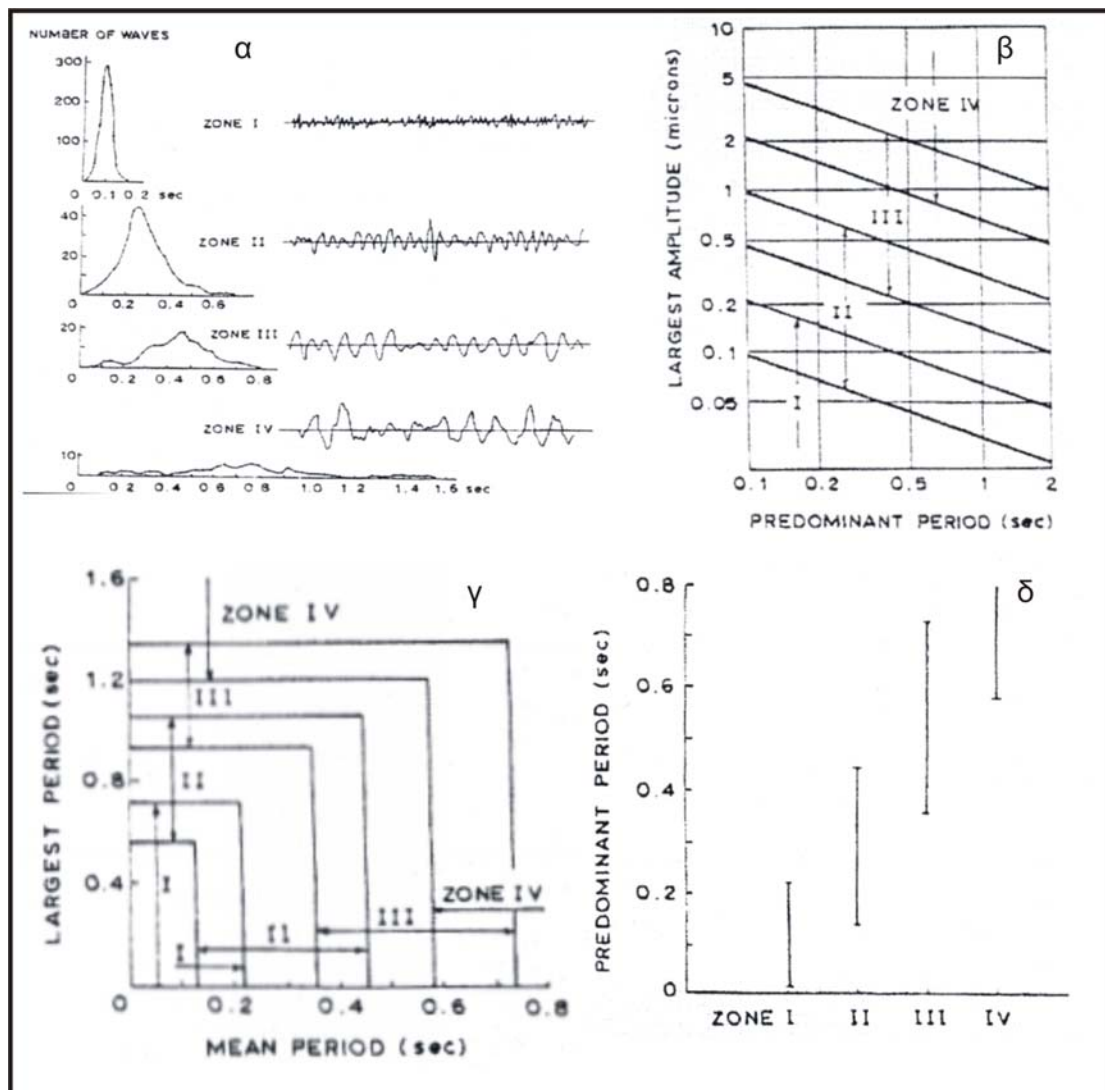
- Ιαπωνική Μέθοδος (Kanai, 1955)
- Ρωσική Μέθοδος ή Μέθοδος της Σεισμικής Ακαμψίας ή Σεισμικής Αντίστασης (1960)
- Η Αναλογική Μέθοδος (Sherif – Bostrom, 1971)
- Μέθοδος Seed (1971)
- Μέθοδος του Τυπικού Φασματικού Λόγου SSR (1978)



- Μέθοδος Nakamura (1989)

### 12.1. Ιαπωνική Μέθοδος

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον Kanai το 1955. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή κατά τις εργασίες πεδίου πραγματοποιούνται καταγραφές μικροθορύβου σε διάφορες θέσεις της περιοχής έρευνας. Οι μικροδονήσεις που καταγράφονται είναι συνήθως συνεχής θόρυβος με πλάτος μερικά μικρά ( $\mu$ ), που προέρχεται είτε από φυσικές διαταράξεις όπως ο άνεμος, τα θαλάσσια κύματα και η ροή υπογείων ή επιφανειακών υδάτων, είτε τεχνητές διαταράξεις όπως η κυκλοφορία ή ο βιομηχανικός θόρυβος (σχήμα 25).



Σχήμα 25. Παράδειγμα εφαρμογής της Ιαπωνικής μεθόδου. Καταγραφές μικροθορύβου (α) Μέγιστο πλάτος (β) Μέση και μέγιστη περίοδος (γ) Δεσπόμενη περίοδος (δ).

Στη συνέχεια τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί αναλύονται και υπολογίζονται οι εξής βασικές παράμετροι:

- Η Δεσπόμενη Περίοδος

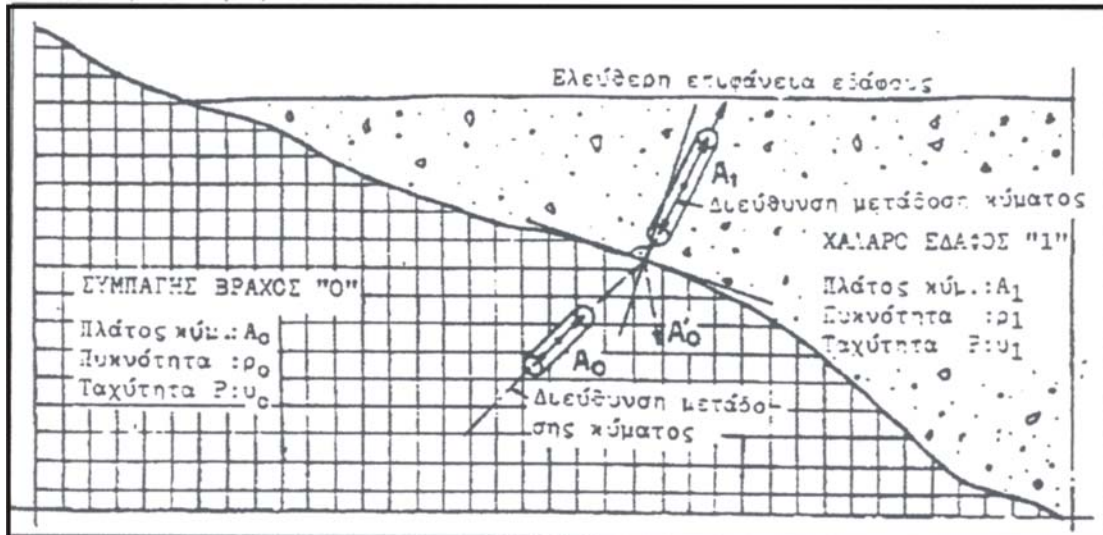
- Η Μέση Περίοδος
- Η Μέγιστη Περίοδος
- Το Μεγαλύτερο Πλάτος

Κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας διαγράμματα και συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων αυτών (σχήμα 25), επιτυγχάνεται ο πειραματικός διαχωρισμός των εδαφών σε ζώνες.

Η Ιαπωνική μεθοδολογία βασίζεται σε δύο βασικές παραδοχές η ισχύς των οποίων καθορίζει κατά περίπτωση και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η πρώτη παραδοχή σχετίζεται άμεσα με τη συμπεριφορά των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών σε περίπτωση σεισμού δεδομένου ότι αναμένεται αυτή να είναι παρόμοια με εκείνη που παρατηρείται κατά τη καταγραφή του μικροθορύβου. Η δεύτερη παραδοχή είναι ότι κατά οι καταγραφές του μικροθορύβου δεν επηρεάζονται από τις διάφορες πηγές και κατά συνέπεια η δεσπόζουσα περίοδος ταυτίζεται με την ιδιοπερίοδο του εδάφους.

## 12.2. Ρωσική μέθοδος

Η Ρωσική μεθοδολογία που πρότεινε Medvedev και οι συνεργάτες του το 1960 ακολουθεί μία διαφορετική προσέγγιση. Θεωρώντας ότι στα γρανιτικά πετρώματα δεν παρατηρείται ενίσχυση της σεισμικής κίνησης προσδιορίζει ένα συντελεστή αύξησης της έντασης σε συνάρτηση με τον χαρακτήρα των επιφανειακών σχηματισμών και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα (σχήμα 26 Πίνακας III).



Σχήμα 26. Βασική αρχή της Ρωσικής μεθόδου.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή η αναμενόμενη αύξηση των πλατών από το σεισμικό υπόβαθρο στην επιφάνεια είναι δυνατόν να εκφραστεί ποσοτικά με τη βοήθεια της **Σεισμικής Αντίστασης** δηλαδή του γινομένου της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και της πυκνότητας που χαρακτηρίζει ένα σχηματισμό. Η σχέση:

$$\frac{A_1}{A_0} = \sqrt{\frac{c_0 \rho_0}{c_1 \rho_1}}$$

καθορίζει την ενίσχυση του πλάτους της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Βασική αδυναμία της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι δεν εξετάζει την συχνοτική κατανομή της σεισμικής ενέργειας.

*Πίνακας III*

<b>ΕΔΑΦΟΣ</b>	<b>Αύξηση</b>
Γρανίτης	0
Ασβεστόλιθος - Ψαμμίτης	0-1
Μετρίως συμπαγή εδάφη	1
Χοντρόκοκκα κλαστικά εδάφη	1-2
Αμμώδη εδάφη	1-2
Αργιλικά εδάφη	1-2
Χαλαρό επίχωμα	2-3

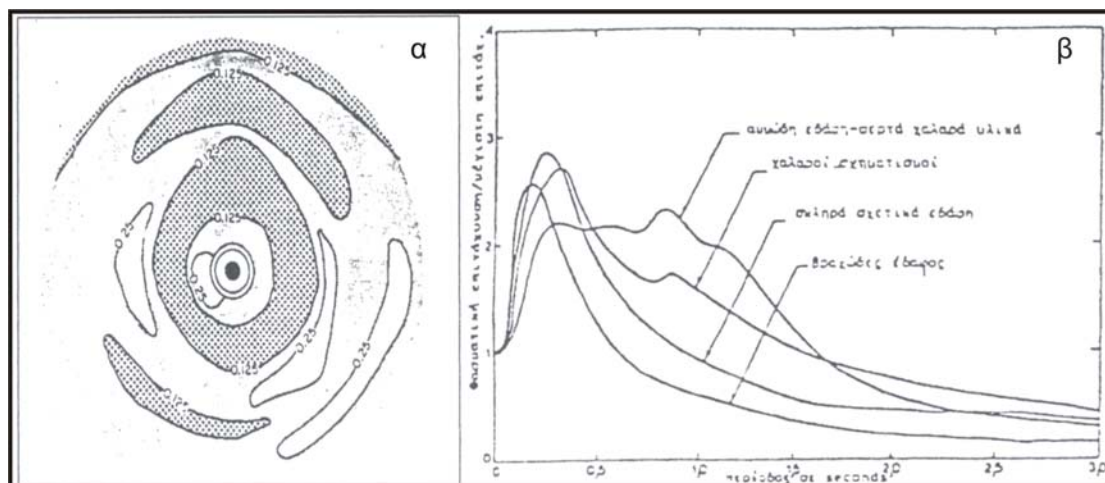
### **12.3. Αναλογική μέθοδος**

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τους Sheriff και Bostrom το 1971. Βασίζεται στο υπολογισμό του λόγου των πλατών που παρατηρούνται σε μία κεντρική θέση όπου έχει τοποθετηθεί ένας διεγέρτης (πηγή) και έναν αριθμό περιφερειακών θέσεων (σχήμα 27α). Οι υπολογισμοί γίνονται στο χώρο των συχνοτήτων και προσδιορίζεται ο λόγος των φασματικών τιμών μεταξύ ενός σταθμού βάσης και των σταθμών πεδίου. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι ο μικροθόρυβος που παράγεται από τον διεγέρτη είναι δυνατόν να ελεγχθεί, αλλά θα πρέπει να αποφεύγονται παρασιτικά σήματα που είναι δυνατόν να αλλοιώσουν τα αποτελέσματα. Αντίθετα, μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η πολυπλοκότητα της διάταξης (καλώδια κλπ) καθώς και ο κατά βάση συγκριτικός χαρακτήρας της μεθόδου ο οποίος δεν επιτρέπει άμεσες εκτιμήσεις για την πιθανή συμπεριφορά των εδαφών σε περίπτωση σεισμού.

### **12.4. Μέθοδος Seed**

Το 1971 ο Seed και οι συνεργάτες του, μετά από ανάλυση 104 επιταχυνσιογραφημάτων, υπολόγισαν τα μέσα φάσματα για τέσσερις τύπους εδαφών (σχήμα 27β). Η σύγκριση των 4 αυτών γενικευμένων φασμάτων αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές στην απόκριση των αντίστοιχων κατηγοριών εδαφικών σχηματισμών. Οι διαφορές αυτές είναι ιδιαίτερα εμφανείς για περιόδους μεγαλύτερες από 0.4 sec. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί την ύπαρξη γεωτεχνικών - γεωφυσικών δεδομένων και την αποδοχή ότι τα γεωλογικά στρώματα εκτείνονται οριζόντια σε αρκετή απόσταση από τη θέση υπολογισμού ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές. Στη συνέχεια, με αφετηρία πρότυπα επιταχυνσιογραφήματα επιχειρείται η μεταφορά του σεισμικού κραδασμού από το υπόβαθρο στην επιφάνεια. Εναλλακτικά, σαν μια πρώτη προσέγγιση, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τα κανονικοποιημένα φάσματα του σχήματος 27β ώστε

σε συνδυασμό με την τιμή της Ενεργού Φασματικής Επιτάχυνσης που προκύπτει από τη διαδικασία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας να εκτιμηθούν τα **Φάσματα Σχεδιασμού** για μία θέση.



Σχήμα 27. Αναλογική μέθοδος (α) Μέθοδος Seed (β).

### 12.5. Μέθοδος τυπικού φασματικού λόγου (SSR) – Μέθοδος Nakamura

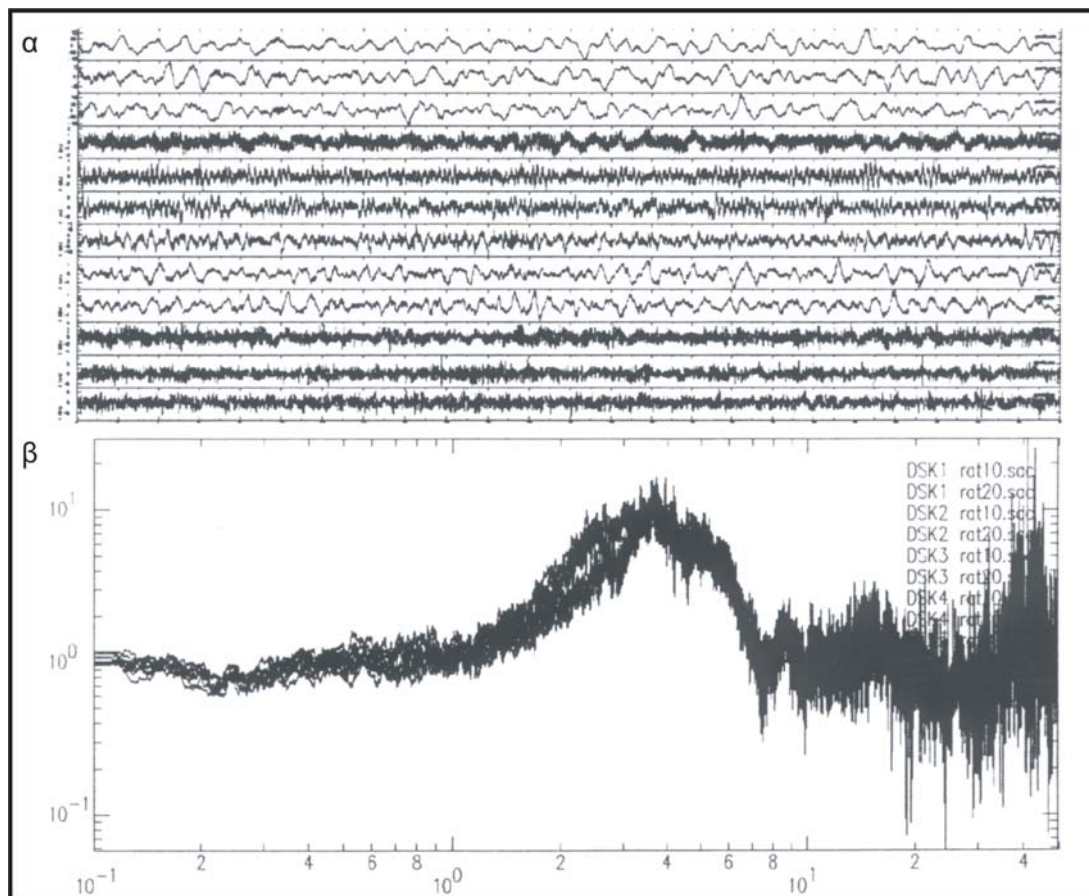
Πρόκειται για δύο συναφείς εμπειρικές πειραματικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται συχνά για την εκτίμηση της ενίσχυσης ή απομείωσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης λόγω της επίδρασης των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών. Οι δύο μεθοδολογίες παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες τόσο κατά τη διαδικασία συλλογής όσο και κατά το στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων. Για την εφαρμογή και των δύο μεθοδολογιών απαιτείται η συλλογή δεδομένων (μικροθορύβου) με τη βοήθεια σειсмоγράφων ή επιταχυνσιογράφων ψηφιακής καταγραφής τριών συνιστωσών.

Ειδικότερα για την περίπτωση της μεθόδου του Τυπικού Φασματικού Λόγου (Standard Spectral Ratio) ένα όργανο τοποθετείται και καταγράφει συνεχώς τον εδαφικό θόρυβο σε μία θέση η οποία έχει επιλεγεί ως σταθμός αναφοράς. Συνήθως η θέση αυτή επιλέγεται σε περιοχές όπου έχουμε την επιφανειακή εμφάνιση του βραχώδους υποβάθρου ή τους σκληρότερους σχηματισμούς στη περιοχή έρευνας. Στη συνέχεια με ένα δεύτερο όργανο πραγματοποιούνται καταγραφές για σημαντικό χρονικό διάστημα σε διαδοχικές θέσεις και πάνω σε διαφορετικούς επιφανειακούς σχηματισμούς.

Δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ των δύο σταθμών δεν πρέπει να υπερβαίνει ορισμένη τιμή ανάλογα με το συχνотικό εύρος ενδιαφέροντος, είναι πιθανόν να απαιτηθεί μετακίνηση και του σταθμού αναφοράς. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να επιδιώκεται ή γεωλογική ομοιογένεια των θέσεων των σταθμών αναφοράς ή να πραγματοποιούνται συγκριτικές μετρήσεις μεταξύ δύο διαδοχικών θέσεων αναφοράς. Επιπλέον, η ύπαρξη καταγραφών από σεισμούς στις ίδιες θέσεις είναι δυνατόν να επιτρέψει τον έλεγχο της γραμικότητας της εδαφικής απόκρισης.

Στην περίπτωση της μεθόδου Nakamura δεν απαιτείται η ύπαρξη σταθμού αναφοράς. Αυτό έχει σαν συνέπεια την μείωση του κόστους εκτέλεσης των

εργασιών υπαίθρου ή την εφαρμογή και των δύο μεθοδολογιών χωρίς πρόσθετη οικονομική επιβάρυνση.



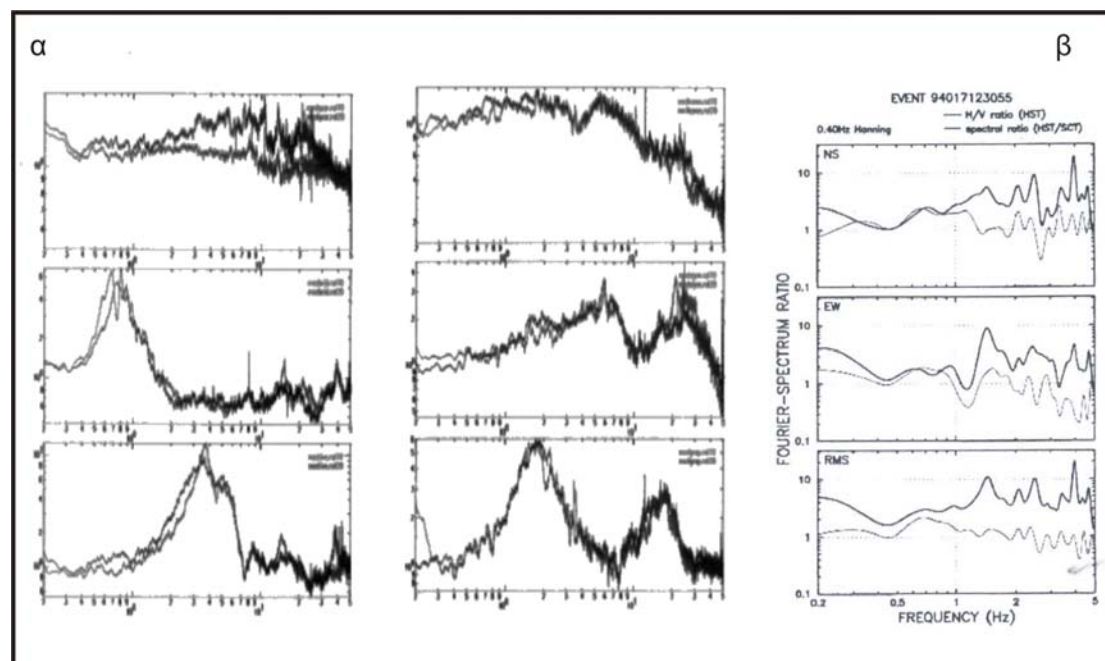
Σχήμα 28. Συλλογή δεδομένων μικροθορύβου (α) και επεξεργασία (β) για τις μεθόδους του τυπικού φασματικού λόγου και Nakamura.

Μετά τη συλλογή των δεδομένων (σχήμα 28α) για την εφαρμογή και των δύο μεθοδολογιών απαιτείται η επεξεργασία των δεδομένων με τη βοήθεια Η/Υ. Αρχικά επιλέγονται κατάλληλα διαστήματα καταγραφής δεδομένων στα οποία δεν παρατηρείται επίδραση από πηγές υψηλού επιπέδου θορύβου. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αθροιστική εξομάλυνση των μετρήσεων για κάθε θέση και υπολογίζονται τα αντίστοιχα φάσματα (σχήμα 28β).

Τέλος για μεν την εφαρμογή της μεθόδου του Τυπικού Φασματικού Λόγου υπολογίζονται για κάθε θέση καταγραφής ο λόγος του φάσματος της συγκεκριμένης θέσης προς το φάσμα της θέσης αναφοράς, ενώ για την περίπτωση της μεθόδου Nakamura για κάθε θέση υπολογίζονται οι λόγοι των οριζοντίων προς την κατακόρυφη συνιστώσα για κάθε θέση. Εξετάζοντας τους φασματικούς λόγους (Τυπικούς ή Nakamura), σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα γεωλογικά ή εδαφοτεχνικά δεδομένα για κάθε θέση, είναι δυνατόν να εξαγάμουμε ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα για την συμπεριφορά των επιφανειακών σχηματισμών σε μελλοντική σεισμική φόρτιση υπό την προϋπόθεση ότι σεισμική συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών είναι αντίστοιχη της συμπεριφοράς που προκύπτει από την ανάλυση του μικροθορύβου (σχήμα 29). Στο σχήμα 29 είναι εμφανής η



διαφοροποίηση του φασματικού περιεχομένου ανάλογα με τη θέση καταγραφής.



Σχήμα 29. Αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου του τυπικού φασματικού λόγου και Nakamura (α). Σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθοδολογιών (β).

### 13. ΜΙΚΡΟΖΩΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

Μία μικροζωνική μελέτη έχει σαν στόχο τον προσδιορισμό του σεισμικού κινδύνου μιας περιοχής ή ενός οικισμού λαμβάνοντας υπόψη τόσο το σεισμικό καθεστώς όσο και τις τοπικές γεωλογικές και εδαφοτεχνικές συνθήκες. Τελικό αποτέλεσμα μιας μικροζωνικής μελέτης θα πρέπει να είναι η αποτελεσματικότερη και με το μικρότερο δυνατό κόστος αντισεισμική προστασία μιας περιοχής. Περιλαμβάνει ένα σύνολο ερευνητικών εργασιών που συνδυάζει της ειδικότητες του μηχανικού του γεωλόγου του γεωφυσικού του σεισμολόγου κ.α. Μια ολοκληρωμένη και πολυπαραμετρική μικροζωνική θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες της ερευνητικές εργασίες που αναφέρθηκαν προηγούμενα και τα αποτελέσματά της συνοψίζονται σε:

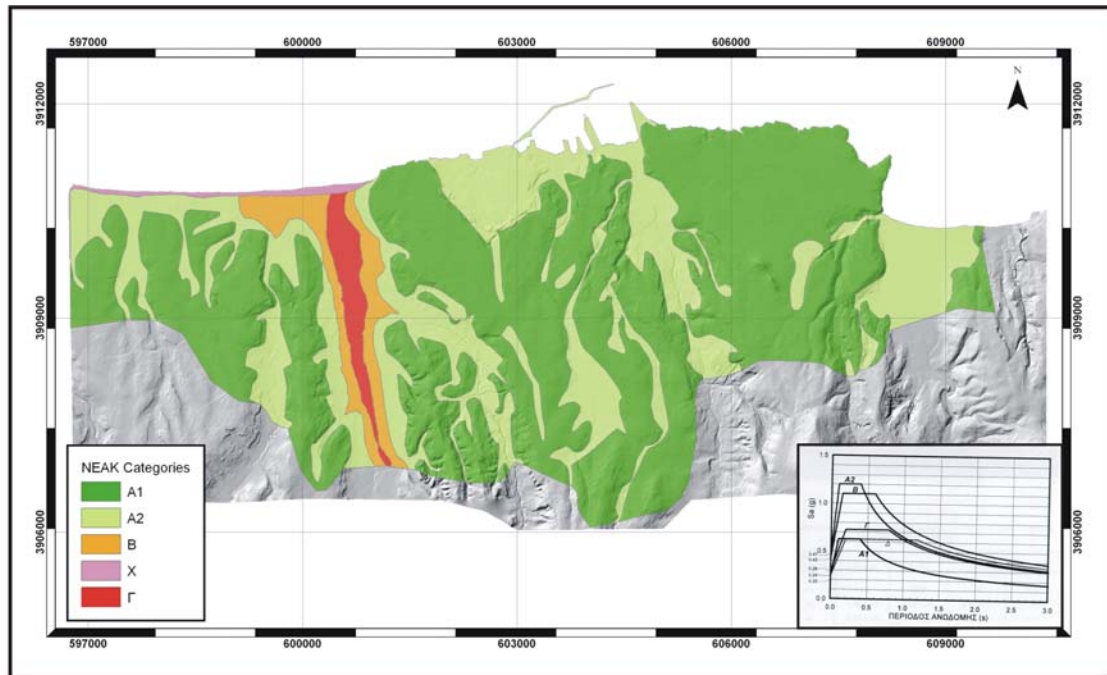
1. Τη μεταβολή της αναμενόμενης σεισμικής έντασης σε σχέση με αυτή του βραχώδους υποβάθρου ή σε σχέση με αυτή που προβλέπεται από τον Αντισεισμικό Κανονισμό.
2. Τις αριθμητικές τιμές των συντελεστών σχεδιασμού των κατασκευών
3. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της αναμενόμενης ισχυρής εδαφικής κίνησης (μέγιστες τιμές εδαφικών παραμέτρων, συχνοτικό περιεχόμενο)
4. Προτάσεις για το είδος των κατασκευών

5. Το ύψος των κτιρίων κατά ζώνες

6. Προτάσεις για χρήσης γης και τη διάταξη των γραμμών ζωής.

Από τα προηγούμενα στοιχεία τα τρία πρώτα θεωρούνται απαραίτητα και ενσωματώνονται συνήθως στον τελικό μικροζωνικό χάρτη της υπό εξέταση περιοχής (σχήμα 30). Στο σχήμα 30 οι ζώνες έχουν χωριστεί σύμφωνα με τις κατηγορίες εδαφών που προβλέπονται από τον ισχύοντα Αντισεισμικό Κανονισμό ενώ περιλαμβάνονται και τα αντίστοιχα φάσματα σχεδιασμού προκειμένου να διευκολυνθεί η εφαρμογή του. Τέλος επισημαίνονται επίσης οι περιοχές που είναι ακατάλληλες για οποιοδήποτε τύπου δόμηση.

Η συνεχής βελτίωση και η αύξηση του αριθμού των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια μίας μικροζωνικής μελέτης συνεπάγεται και αντίστοιχη αύξηση του όγκου δεδομένων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια εκπόνησής τους. Η ραγδαία εξέλιξη των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών κατά την τελευταία δεκαετία προσέφερε την απαραίτητη υποδομή για την διαχείριση των γεωπληροφοριών εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την επεκτασιμότητα σε νέες εφαρμογές.



Σχήμα 30. Μικροζωνικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Ηρακλείου.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Ambraseys, N.N. 1995, The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe, *Earth. Eng. & Str. Dyn.*, 24.
- Benjamin, J.R. and Cornell C.A. 1970. Probability statistics and decision for civil engineers. McGraw-Hill, New York.
- Comninakis, P.E. and Papazachos, B.C. 1986. A catalogue of earthquakes in Greece and the surrounding area for the period 1901 - 1985. *Publ. Geophys. Lab. Univ. Thessaloniki*, 1, 1 - 167.
- Cornell, C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58.
- Cornell, C.A., and E.H. Vanmarcke, 1969. The major influences on seismic risk "4th World Conf. On Earth Engineering", Chile.
- Donovan N., 1973. A statistical Evaluation of Strong Motion Data Including the February 9, 1971 San Fernando Earthquake 5th World Conf. On Earth. Eng. Rome.
- Kanai, K. 1966. Improved empirical formula for characteristics of strong earthquake motions. *Proc. Japan, Earth. Symp.*, 1-4.
- Kijko, A. and Sellevoll, M.A., 1989. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 79, 645-654.
- Makropoulos, K.C., 1978. The statistics of large earthquake magnitude and an evaluation of greek seismicity, Ph.D. thesis, Univ. of Edinburgh.
- Makropoulos, K., Drakopoulos, J. and Latoussakis, J. 1989. A revised earthquake catalogue for Greece since 1900. *Publ. No 2, Geophys. J. Int.*, 98, 391-394.
- McGuire, R.K., 1976. FORTRAN Computer program for seismic risk analysis. U.S.G.S. Open-File Rept., 76-67, 90 pp.
- McGuire, R.K., 1978. FRISK Computer program for seismic hazard analysis, using faults as earthquake sources. U.S.G.S. Open-File Rept., 78-1007, 62 pp.
- Midorikawa, S. and H. Kobayashi, 1980. Iseismal map in near-field with regard to fault rupture and site geological conditions. 7th World Conference on Earthquake Engineering, Instabul, Turkey, Sept., 1980.
- Orphal, D., and Lahoud, J., 1974. Prediction of Peak Ground Motion from Earthquakes *Bull. Seism. Soc. Am.*
- Papadopoulos, G.A. and A. Kijko, 1991. Maximum likelihood estimation of earthquake hazard parameters in the Aegean area from mixed data. *Tectonophysics*, 185, 277-294.
- Papaioannou, Ch. A. and B.C. Papazachos (2000). Time-independent and time-dependent seismic hazard in Greece based on seismogenic sources. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 22-33.



- Papanastassiou, D., G. Drakatos, N. Voulgaris and G. Stavrakakis, 1997. The May 13, 1995, Kozani-Grevena (NW Greece) Earthquake: Source study and its tectonic implications, Geodynamics. In press.
- Papazachos, B.C. and Comninakis, P.E. (1982). A catalogue of historical earthquakes in Greece and surrounding area. Publ. of Geoph. Lab., University of Thessaloniki, No. 5, 24 pp.
- Papazachos, B.C. and Papazachos, C., 1989. Earthquakes in Greece. Editor Ziti, Thessaloniki (in Greek with English abstracts).
- Papazachos, B.C., 1989. The seismic zones in the Aegean and surrounding area. Proc. of European Seism. Soc., XXI Gen. Ass. Aug. 23-27, Sofia, Bulgaria, 82-87.
- Papazachos, B.C., 1989. Seismicity rates and long term earthquake prediction in the Aegean area. Quaterniones Geodaesiae, 3, 171-190.
- Παπαζάχος Β. και Παπαζάχου Κ. 2003 Οι σεισμοί της Ελλάδας (Γ' έκδοση) σελ 286.
- Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H. B. (1972). SHAKE- A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered soils., Report EERC 72-12, Earthquake Eng. Res. Center, Berkley, CA.
- Stavrakakis, G.N., 1990. Seismicity gaps and seismic hazard in Greece and surrounding area. Proc. of 9th European Conference on Earthquake Engineering, Moscow, Sep. 11-16, 1990, Vol. I, 143 - 151.
- Theodoulidis, N. and B. Papazachos, 1990. Strong motion from intermediate subduction earthquakes and its comparison with that of shallow earthquakes in Greece. Proc. of XXII Gen. Ass. ESC, barcelona, Sep. 1990.
- Theodoulidis, N. and B.C. Papazachos, 1992. Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow, earthquakes in Greece: I. Peak ground acceleration, velocity, and displacement. Soil Dynamics and Earthq. Eng., 11, 387-402.