

# Αυτοματοποιημένη Εκπόνηση Μικρο-ζωνικών Μελετών Σεισμικής Επικινδυνότητας με Χρήση G.I.S.

Automated Execution of Seismic Microzonation Studies with the Use of G.I.S.

ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, Α. Γ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Μ.Π.  
ΑΝΤΩΝΙΟΥ, Α. Α. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Μ.Π.  
ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Γ. Δ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.  
ΜΑΡΙΝΟΣ, Π. Γ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Το άρθρο παρουσιάζει μια αυτοματοποιημένη μεθοδολογία για την εκπόνηση μικροζωνικών μελετών σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία στηρίζεται στη συνεργασία μιας βάσης γεωτεχνικών δεδομένων (από γεωτρήσεις και επιτόπου δοκιμές), ενός GIS που χρησιμοποιείται αμιγώς για δημιουργία ψηφιακών χαρτών και ενός κώδικα Η/Υ για τον υπολογισμό ποσοτικών δεικτών σεισμικής απόκρισης του εδάφους. Ο κώδικας επεξεργάζεται στοιχεία από τη βάση γεωτεχνικών δεδομένων, καθώς και τεχνικο-γεωλογικά, σεισμολογικά στοιχεία, και εκτελεί αναλύσεις σεισμικής εδαφικής απόκρισης μέσω πολυ-παραμετρικών σχέσεων που αναπαράγουν τα αποτελέσματα της ισοδύναμα-γραμμικής μεθόδου. Ως τυπική εφαρμογή παρουσιάζεται η μικροζωνική μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας του Δήμου Άνω Λιοσίων.

**ABSTRACT:** This paper presents an automated methodology for performing seismic microzonation studies, which is based on the cooperation of a geotechnical database (with data from boreholes and insitu tests), a GIS that is being used only for digital mapping and a computer code for the calculation of quantitative indices of the seismic ground response. The code processes data from the geotechnical database, along with engineering geological and seismological input and executes seismic ground response analyses via multi-variable relations that duplicate successfully the results of the equivalent linear method. As a typical application, the seismic microzonation study for Ano Liossia Municipality is presented.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ορισμός ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας σε αστικές περιοχές (Μικροζωνική Μελέτη ή Μ.Μ.) είναι το πρώτο αλλά το σημαντικότερο βήμα για το σχεδιασμό της αντισεισμικής προστασίας πολεοδομικών συγκροτημάτων. Στην πράξη, μια τέτοια μελέτη εκτελείται σε τρία (3) βήματα:

**Βήμα 1:** Συλλογή και επεξεργασία σεισμολογικών, τεκτονικών, γεωλογικών γεωτεχνικών, γεωφυσικών και τοπογραφικών στοιχείων, με στόχο την κατάστρωση της εδαφικής τομής της περιοχής μελέτης σε δεδομένο σεισμο-τεκτονικό περιβάλλον.

**Βήμα 2:** Εκτίμηση για κάθε θέση της περιοχής μελέτης όλων των εκφάνσεων της σεισμικής εδαφικής απόκρισης, ήτοι:

- (α) των ελαστικών φασμάτων απόκρισης, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του εδάφους και της τοπογραφίας
- (β) του δυναμικού ρευστοποίησης και των συνοδών φαινομένων (π.χ. πλευρική εξάπλωση, καθιζήσεις),
- (γ) την πιθανότητα αστοχίας πρανούς, και
- (δ) την περίπτωση επιφανειακής διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων εντός της περιοχής μελέτης.

**Βήμα 3:** Δημιουργία (ψηφιακών) χαρτών μεταβολής παραμέτρων σεισμικής έντασης (π.χ. της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης  $a_{max}$ ).

Δεδομένου ότι τα δεδομένα και τα αποτελέσματα μιας M.M. συναρτώνται με τη γεωγραφική τους θέση, η χρήση Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (Geographic Information System, GIS) προβάλλει ως ιδιαίτερα ελκυστική. Σε πρώτη προσέγγιση, το GIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών, δηλαδή στο Βήμα 3 της M.M. Όμως η καρδιά της μελέτης, δηλαδή τα Βήματα 1 και 2 συνήθως εκτελούνται εξωτερικά του GIS.

Προσπάθειες προς πιο αυτοματοποιημένη εκτέλεση M.M. με χρήση GIS έχουν μόλις αρχίσει να εμφανίζονται στη βιβλιογραφία (π.χ. Zonno et al 2003). Όμως, οι προτεινόμενες μεθοδολογίες δεν έχουν ακόμη γενική χρήση. Η μεθοδολογία αυτοματοποιημένης εκτέλεσης M.M. που παρουσιάζεται εδώ είναι απαλλαγμένη σε σημαντικό βαθμό από αυτό τον περιορισμό.

## 2. ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Με στόχο την αυτοματοποίηση, η προτεινόμενη μεθοδολογία επικεντρώνεται απλοποιητικά, επί του παρόντος, στο πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της σεισμικής απόκρισης, δηλαδή τη γεωγραφική διαφοροποίηση των ελαστικών φασμάτων απόκρισης.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας, η οποία χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου:

- Μια γεωτεχνική μελέτη (βάση [i] στο Σχ. 1), με δεδομένα από γεωτρήσεις, επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές,
- Μια τεχνικο-γεωλογική μελέτη (βάση [ii] στο Σχ. 1), με τη γεωλογική διαστρωμάτωση σε όρους υψομέτρων και βαθών, και
- Μια σεισμολογική (ή σεισμο-τεκτονική) μελέτη (βάση [iii] στο Σχ. 1), με τις σεισμικές παραμέτρους σχεδιασμού της περιοχής μελέτης.

Διευκρινίζεται, ότι η αυτοματοποίηση προϋποθέτει την παρουσίαση των ανωτέρω μελετών σε μορφή βάσεων δεδομένων. Στη συνέχεια, η σύνδεση των βάσεων με ένα GIS, δίνει τη δυνατότητα γραφικής επιλογής δεδομένων μόνο εντός της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα, η γραφική αυτή δυνατότητα για τις βάσεις [i] και [ii] οδηγεί στην επιλογή N θέσεων γεωτρήσεων ή/και επιτόπου γεωτεχνικών δοκιμών (π.χ SPT) ή γεωφυσικών μετρήσεων (π.χ Crosshole).

Σύμφωνα με το Σχήμα 1, μετά την επιλογή δεδομένων η μεθοδολογία προχωρεί στον ορισμό της εδαφικής τομής, το οποίο δεν είναι

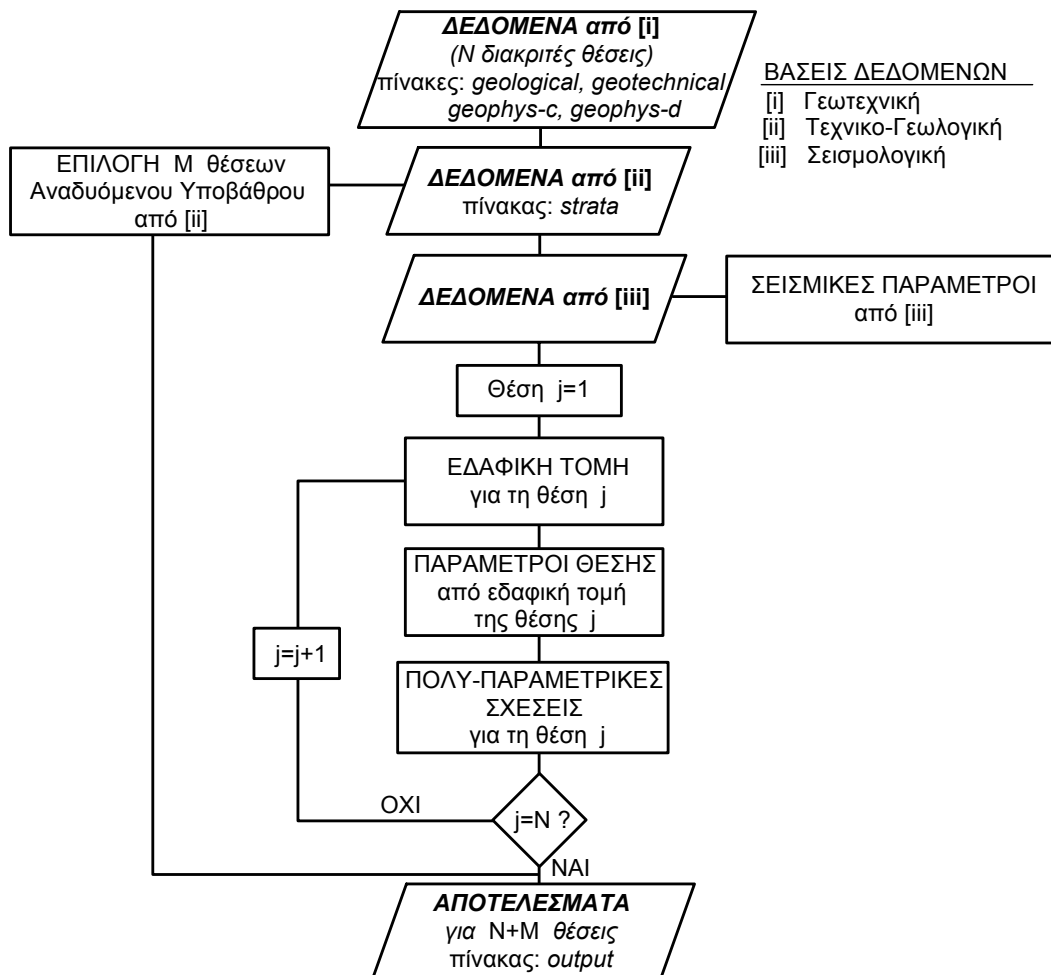
γεωγραφικά συνεχές, αλλά καταστρώνεται ξεχωριστά για κάθε μία από τις N διακριτές θέσεις. Αντίστοιχα, και η σεισμική απόκριση του εδάφους εκτιμάται ξεχωριστά (βλέπε βρόχο  $j = 1$  έως N στο Σχ. 1).

Η εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης του εδάφους γίνεται με βάση τις πολυπαραμετρικές σχέσεις των Bouckovalas & Papadimitriou (2003, 2005). Πέραν της εδαφικής τομής, οι σχέσεις χρειάζονται σεισμικές παραμέτρους (σχεδιασμού) που εισάγονται από τη βάση [iii]. Εδώ, οι σεισμικές παράμετροι θεωρούνται ομοιόμορφες στην περιοχή μελέτης, και για το λόγο αυτό η εισαγωγή δεδομένων από τη βάση [iii] γίνεται πριν την έναρξη των υπολογισμών για τις N θέσεις.

Πέραν των N θέσεων με γνωστά γεωτεχνικά στοιχεία, ακριβείς ψηφιακοί χάρτες μεταβολής της σεισμικής απόκρισης προϋποθέτουν την απεικόνιση και της περιοχής όπου το υπόβαθρο αναδύεται στην επιφάνεια. Έτσι, η αυτοματοποιημένη μεθοδολογία εισάγει επιπλέον M διακριτές θέσεις ανάδυσης του γεωλογικού υποβάθρου. Οι θέσεις αυτές έχουν δεδομένη σεισμική απόκριση, αυτή του σεισμικού υποβάθρου που ορίζεται από τα δεδομένα της βάσης [iii]. Έτσι, η εισαγωγή τους στη μελέτη δεν κάνει χρήση των σχέσεων σεισμικής απόκρισης.

Ολοκληρώνοντας όλες τις ανωτέρω εργασίες, η μεθοδολογία εξάγει τα αποτελέσματα των αναλύσεων στο περιβάλλον GIS στη μορφή ενός πίνακα, ονόματι *output*, με N+M σειρές και ένα μεγάλο αριθμό στηλών που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες των εν λόγω θέσεων, καθώς και σε μια σειρά δεδομένων και αποτελεσμάτων, ήτοι:

- στο πάχος του εδάφους  $H(m)$  πάνω από το σεισμικό υπόβαθρο,
- στη γραμμική (ελαστική) εδαφική ιδιοπερίοδο  $T_{s,o}(s)$ ,
- στη μη-γραμμική εδαφική ιδιοπερίοδο  $T_s(s)$ ,
- στο λόγο εδαφικής «ενίσχυσης» της μέγιστης επιτάχυνσης  $A_a$ , ή στη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση  $a_{max} = A_a a_{max}^b$  (όπου  $a_{max}^b$  είναι η μέγιστη επιτάχυνση στο αναδυόμενο υπόβαθρο),
- στο λόγο εδαφικής «ενίσχυσης» της μέγιστης ταχύτητας  $A_v$ , ή στη μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $v_{max} = A_v v_{max}^b$  (όπου  $v_{max}^b$  είναι η μέγιστη ταχύτητα στο αναδυόμενο υπόβαθρο),
- στη φασματική επιτάχυνση  $S_a$  (για απόσβεση 5%) σε επιλεγμένες ιδιοπεριόδους κατασκευής  $T_{str}$ .



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής κώδικα αυτοματοποιημένης εκπόνησης Μ.Μ. με χρήση GIS.  
Figure 1. Flow chart of code for automated execution of GIS-aided seismic microzonation studies

Η εξαγωγή του πίνακα *output* ολοκληρώνει το Βήμα 2 της Μ.Μ. Στη συνέχεια, στο Βήμα 3, δημιουργούνται ψηφιακοί χάρτες στο περιβάλλον GIS χρησιμοποιώντας τις τεχνικές τριγωνισμού που αυτό προσφέρει. Λεπτομέρειες επί του κώδικα Η/Υ που υλοποιεί το διάγραμμα ροής του Σχήματος 1 δίνονται από τους Paradimitriou et al (2006). Επισημαίνεται ότι η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς η αυτοματοποιημένη μεθοδολογία εκτελείται με εκτελέσιμο αρχείο εξωτερικά προς το περιβάλλον GIS και τις βάσεις [i], [ii] και [iii].

### 3. ΜΟΡΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

Η αυτοματοποιημένη μεθοδολογία χρησιμοποιεί δεδομένα από τρεις (3) βάσεις δεδομένων. Εδώ, η γεωτεχνική βάση δεδομένων [i] ονομάζεται HELGEORDAS (Αντωνίου 2003), έχει σχεσιακή δομή και περιέχει γεωγραφικά, γεωλογικά, γεωτεχνικά και γεωφυσικά δεδομένα. Τα απαραίτητα δεδομένα από τη βάση [i] εξάγονται σε μορφή

πίνακων με κατάλληλα ερωτήματα με χρήση Structured Query Language (SQL). Πιο συγκεκριμένα:

- (α) Τα γεωλογικά δεδομένα εξάγονται στον πίνακα *geological*, όπου περιέχεται η θέση, το πάχος και το βάθος κάθε γεωτεχνικής υπο-στρώσης με περιγραφή κατά AUSCS.
- (β) Τα γεωτεχνικά δεδομένα εξάγονται στον πίνακα *geotechnical*, όπου περιέχεται η θέση, το βάθος, και ο αριθμός κτύπων  $N_{SPT}$  κάθε δοκιμής SPT.
- (γ) Τα γεωφυσικά δεδομένα εξάγονται σε δύο (2) διαφορετικούς πίνακες: *geophys-d* για δεδομένα από δοκιμές που δίνουν σημειακές μετρήσεις των ταχυτήτων διατμητικών κυμάτων  $V_S$  και κυμάτων πίεσης  $V_P$  (π.χ Crosshole) και *geophys-c* για δεδομένα από δοκιμές που δίνουν συνεχείς μετρήσεις των  $V_S$  και  $V_P$  (π.χ Downhole ή SASW).

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία, η τεχνικο-γεωλογική βάση δεδομένων [ii] χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ψηφιακού γεωλογικού χάρτη και τον ορισμό Μ θέσεων αναδυόμενου

υποβάθρου. Επιπλέον, από τη βάση αυτή εξάγεται συμπληρωματικά και η γεωλογική διαστρωμάτωση για τις  $N$  θέσεις στη μορφή του πίνακα *strata*, που είναι αντίστοιχος με τον πίνακα *geological* τον οποίο συμπληρώνει.

Τέλος, η σεισμολογική βάση [iii] χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των σεισμικών παραμέτρων, δηλαδή των παραμέτρων της χρονοϊστορίας επιτάχυνσης στο αναδυόμενο υπόβαθρο, που είναι: α) η μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}^b$ , β) η δεσπόζουσα περίοδος  $T_e$  και γ) ο αριθμός σημαντικών κύκλων  $n$ .

#### 4. ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΤΟΜΗΣ

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων από τις βάσεις [i], [ii] και [iii], ο κώδικας εκτιμά τη μεταβολή της ταχύτητας  $V_s$  μέχρι το βάθος  $H$ , όπου ορίζεται το σεισμικό υπόβαθρο. Σύμφωνα με το Σχ. 1, η ανωτέρω διαδικασία γίνεται ξεχωριστά για κάθε μία από τις  $N$  θέσεις.

Αν μια θέση  $j$  έχει μετρήσεις της  $V_s$  (πίνακες *geophys-c* ή/και *geophys-d*), τότε η εδαφική τομή (σε όρους  $V_s$ ) καταστρώνεται επί τη βάση αυτών. Αν δεν υπάρχουν τέτοιες μετρήσεις, τότε η εδαφική τομή εκτιμάται εμμέσως επί τη βάση της στρωματογραφίας, των κτύπων  $N_{SPT}$  και εμπειρικών σχέσεων  $V_s-N_{SPT}$ . Ο κώδικας δίνει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ καθιερωμένων τέτοιων σχέσεων από τη βιβλιογραφία (π.χ Imai & Tonouchi 1982), αλλά και της εισαγωγής (εκ μέρους του χρήστη) μιας αντίστοιχης σχέσης, πιθανώς τοπικού χαρακτήρα.

Ιδανικά, το σεισμικό υπόβαθρο συμπίπτει με το γεωλογικό υπόβαθρο. Στην πράξη όμως, το πρώτο βρίσκεται σε βάθος  $H$  μικρότερο ή ίσο του δεύτερου, λόγω παρεμβολής μια στρώσης εξαλλοίωσης μεταβλητού πάχους. Έτσι, για τον ορισμό του  $H$ , ο κώδικας χρησιμοποιεί πρωτευόντως την εδαφική τομή (σε όρους  $V_s$ ) και δευτερευόντως τους πίνακες *geological* και *strata*. Συγκεκριμένα, η πρώτη προσέγγιση του  $H$  ορίζεται εκεί όπου η ταχύτητα  $V_s$  γίνεται συστηματικά μεγαλύτερη των 400m/s και εμφανίζεται απότομη μεταβολή στις τιμές της  $V_s$ , δηλ. σε διεπιφάνεια όπου η  $V_s$  της άνω στρώσης είναι μικρότερη από 50% της τιμής της κάτω. Αν δεν υπάρχει τέτοια έντονη μεταβολή στις τιμές  $V_s$ , το βάθος  $H$  ορίζεται εκεί όπου οι τιμές  $V_s$  γίνονται συστηματικά μεγαλύτερες από  $0.8V_b$ , όπου  $V_b$  είναι η τιμή της ταχύτητας  $V_s$  στο υπόβαθρο

Με δεδομένη την εδαφική τομή (σε όρους  $V_s$ ) και το βάθος  $H$ , ο κώδικας προχωρά στην εκτίμηση της ιδιοπεριόδου  $T_{s,o}$  με βάση την απλουστευμένη μέθοδο Rayleigh (Biggs

1965). Η ανωτέρω διαδικασία είναι πιο ακριβής από άλλες ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους εκτίμησης της  $T_{s,o}$  είτε επί τη βάση της μέσης ταχύτητας διατμητικών κυμάτων είτε επί τη βάση του χρόνου διάδοσης των κυμάτων  $S$  εντός της εδαφικής στήλης πάχους  $H$ .

Σύμφωνα με το Σχ. 1, μετά τον ορισμό των  $T_{s,o}$ ,  $H$ ,  $V_{s,o} = 4H/T_{s,o}$  ο κώδικας προχωρεί στην ανάλυση της σεισμικής απόκρισης κάθε μίας από τις  $N$  θέσεις, με χρήση των σχέσεων που παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.

#### 5. ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι πολυ-παραμετρικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται βασίζονται σε στατιστική επεξεργασία δεδομένων και αποτελεσμάτων από πλέον των 700 αριθμητικών αναλύσεων 1Δ μετάδοσης κυμάτων που εκτελέστηκαν με την ισοδύναμα-γραμμική μέθοδο *Shake91* (Idriss and Sun 1992). Οι σχέσεις αυτές έχουν αποδειχθεί ικανές να αναπαράγουν τα αποτελέσματα της ισοδύναμα-γραμμικής μεθόδου. Εδώ οι σχέσεις απλώς παρατίθενται, καθώς λεπτομέρειες επ' αυτών και επί της αξιοπιστίας τους αναφέρονται στους Bouckovalas & Papadimitriou (2003, 2005).

Κατ' αρχήν εκτιμάται η ιδιοπερίοδος  $T_s$ :

$$(T_s/T_{s,o})^2 = 1 + 5330(V_{s,o})^{-1.3} \left( \frac{a_{max}^b}{g} \right)^{1.04} \quad (1)$$

Η ιδιοπερίοδος  $T_s$  στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον ορισμό του λόγου εδαφικής «ενίσχυσης» της μέγιστης επιτάχυνσης  $A_a$ :

$$A_a = \frac{1 + C_{1,a}(T_s/T_e)^2}{\sqrt{[1 - (T_s/T_e)^2]^2 + [C_{2,a}(T_s/T_e)]^2}} \quad (2a)$$

$$C_{1,a} = 1.2 \left( \frac{a_{max}^b}{g} \right)^{-0.17} \frac{n^{0.5}}{1 + n^{0.5}} \quad (2b)$$

$$C_{2,a} = 1.05 + 0.57(T_b/T_s) \quad (2γ)$$

όπου  $T_b$  είναι η ιδιοπερίοδος στήλης του σεισμικού υποβάθρου με το ίδιο πάχος ( $=4H/V_b$ ). Η σχέση για το  $A_v$  είναι παρόμοια:

$$A_v = \frac{1 + C_{1,v}(T_s/1.5T_e)^2}{\sqrt{[1 - (T_s/1.5T_e)^2]^2 + [C_{2,v}(T_s/1.5T_e)]^2}} \quad (3a)$$

$$C_{1,v} = 0.88 \left( \frac{a_{max}^b}{g} \right)^{-0.124} \quad (3\beta)$$

$$C_{2,v} = 1.087 + 0.598(T_b/T_s) \quad (3\gamma)$$

Στη συνέχεια, οι σχέσεις επικεντρώνονται στο ελαστικό φάσμα απόκρισης  $S_a$  για 5% απόσβεση. Συγκεκριμένα, ο λόγος ελαστικής φασματικής «ενίσχυσης»  $A_{Sa}$  ορίζεται ως ο λόγος του σχετικού φάσματος στην επιφάνεια προς αυτό στο αναδυόμενο υπόβαθρο. Η τιμή του  $A_{Sa}$  για ιδιοπερίοδο κατασκευής  $T_{str} = 0$  ισούται με  $A_a$  (βλέπε σχέση 2), συνεπώς το ενδιαφέρον εστιάζεται στον κανονικοποιημένο λόγο  $A_{Sa}^* = A_{Sa} / A_a$  (σχέση 4):

$$A_{Sa}^* = \frac{1 + A_{Sa,r}^* (T_{str}/T_s)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{T_{str}}{T_s}\right)^2\right]^2 + \left[\left(\frac{1 + A_{Sa,r}^*}{A_{Sa,p}^*}\right) \left(\frac{T_{str}}{T_s}\right)\right]^2}}$$

όπου  $A_{Sa,p}^*$  και  $A_{Sa,r}^*$  είναι η μέγιστη και η παραμένουσα τιμή του  $A_{Sa}^*$  οι οποίες αναμένονται για  $T_{str}/T_s = 1$  (συντονισμός εδάφους – κατασκευής) και  $T_{str}/T_s \rightarrow \infty$ , αντίστοιχα. Η τιμή του  $A_{Sa,p}^*$  δίνεται από τη σχέση (5):

$$A_{Sa,p}^* = \begin{cases} 1 + 0.318 \left(\frac{T_s}{T_e}\right)^{0.058} \\ 1.318 + 0.279 \left(\frac{T_b}{T_s}\right)^{-0.504} n^{-0.613} \left(\frac{T_s}{T_e} - 1\right) \\ 1.318 + 0.837 \left(\frac{T_b}{T_s}\right)^{-0.504} n^{-0.613} \end{cases}$$

όπου οι σχέσεις (5α) and (5γ) ισχύουν για  $T_s/T_e < 1$  και  $T_s/T_e > 4$  αντίστοιχα, ενώ η σχέση (5β) ισχύει για  $1 \leq T_s/T_e \leq 4$ . Αντίστοιχα, και η τιμή του  $A_{Sa,r}^*$  έχει τη μορφή (σχέση 6):

$$A_{Sa,r}^* = \begin{cases} 1 - 0.302 \left(\frac{T_s}{T_e}\right) \\ 0.698 + 0.189 \left(\frac{T_b}{T_s}\right)^{-0.474} n^{-0.406} \left(\frac{T_s}{T_e} - 1\right) \\ 0.698 + 0.945 \left(\frac{T_b}{T_s}\right)^{-0.474} n^{-0.406} \end{cases}$$

όπου οι σχέσεις (6α) και (6γ) ισχύουν για  $T_s/T_e < 1$  και  $T_s/T_e > 6$  αντίστοιχα, ενώ η σχέση (6β) ισχύει για  $1 \leq T_s/T_e \leq 6$ .

Σημειώνεται ότι οι ανωτέρω σχέσεις έχουν τυπική απόκλιση του σχετικού λάθους από  $\pm 20\%$  έως  $\pm 26\%$ , σε σύγκριση με την ισοδύναμα-γραμμική μέθοδο.

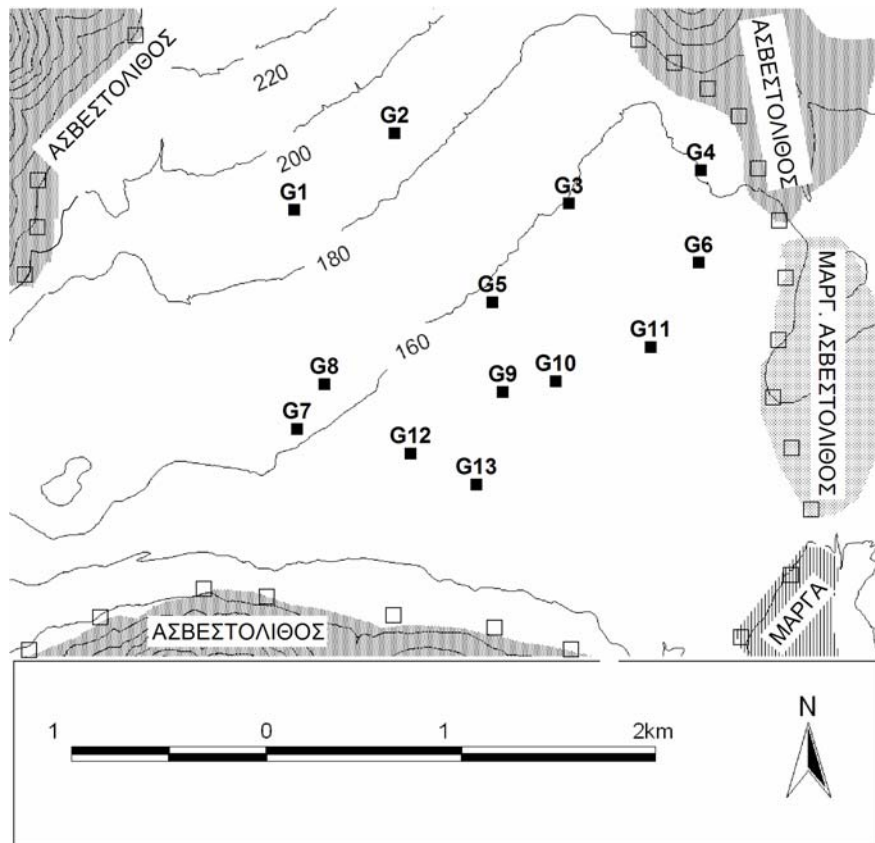
## 6. ΤΥΠΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Ως μια τυπική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας παρουσιάζεται η μικροζωνική μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας για το Δήμο Άνω Λιοσίων. Προκαταρκτικά αποτελέσματα από την παρούσα εφαρμογή παρουσιάστηκαν από τους Paradimitriou et al (2004), ενώ η πλήρης παρουσίαση γίνεται από τους Paradimitriou et al (2006).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ο ψηφιακός γεωλογικός χάρτης της περιοχής, με βάση την τεχνικο-γεωλογική μελέτη (βάση [ii]). Παρατηρείται ότι η περιοχή μελέτης έχει έκταση 10km<sup>2</sup> περίπου, χαρακτηρίζεται από μια ήπια κλίση προς τα βόρειο-δυτικά και κυκλώνεται από αναδυόμενους βραχώδεις σχηματισμούς, τους ασβεστόλιθους της Πάρνηθας και του Αιγάλεω και τις μάργες προς τα ανατολικά. Το έδαφος στα Άνω Λιόσια αποτελείται κυρίως από Πλειστοκαινικούς κώνους κορημάτων, οι οποίοι υπέρκεινται μαργών ή ασβεστολίθων, (γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής). Σε όλες τις θέσεις το έδαφος θεωρείται Κατηγορίας Α ή Β κατά τον ΕΑΚ (2000) και συναντά το γεωλογικό υπόβαθρο σε βάθη μικρότερα των 30 – 35m.

Η γεωτεχνική πληροφορία στην παρούσα εφαρμογή εισήχθη αυτόματα από τη βάση HELGEORDAS (Αντωνίου 2003), μια σχεσιακή βάση δεδομένων (βάση [i]) που περιέχει το γεωλογικό προφίλ, και δεδομένα από επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές για περισσότερες από 2000 θέσεις γεωτρήσεων στο Λεκανοπέδιο Αττικής. Με τη συσχέτιση της βάσης [i] με GIS, εντοπίστηκαν δεκατρείς (13) θέσεις γεωτρήσεων ή/και επιτόπου δοκιμών, δηλ. N = 13 στο Σχήμα 1. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι 13 αυτές θέσεις (G1 έως G13), μαζί με τις M θέσεις αναδυόμενου υποβάθρου που ψηφιοποιήθηκαν με βάση το γεωλογικό χάρτη.

Η γεωτεχνική πληροφορία από τη βάση [i] παράγαγε τους πίνακες: *geological*, *geotechnical* και *geophys-c*, δηλ. πέρα από τη στρωματογραφία και τους κτύπους  $N_{SPT}$  προέκυψαν δεδομένα από δοκιμές Downhole που πραγματοποιήθηκαν ακριβώς δίπλα στις γεωτρήσεις. Έτσι, οι εδαφικές τομές (σε όρους  $V_s$ ) και τα βάθη  $H$  στις N=13 θέσεις βασίστηκαν άμεσα στις γεωφυσικές μετρήσεις, με βάση της οποίες το βάθος  $H$  κυμαίνεται μεταξύ 4 και 35m.



Σχήμα 2. Ψηφιακός γεωλογικός χάρτης Άνω Λιοσίων, με N θέσεις γεωτρήσεων ή/και επιτόπου δοκιμών (G1 έως G13) και M θέσεις αναδύομενου υποβάθρου  
 Figure 2. Digital geological map of Ano Liossia, with N locations of boreholes and/or insitu test sites (G1 to G13) and M locations of outcropping bedrock

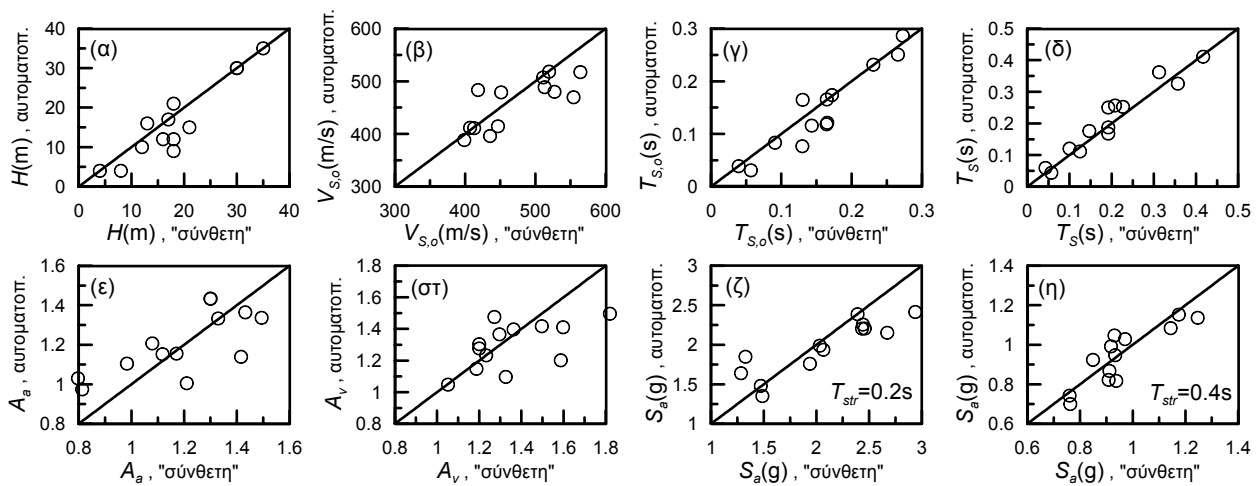
Εδώ, ως σεισμική διέγερση χρησιμοποιείται μια συνθετική χρονοϊστορία η οποία προσομοιώνει τη σεισμική κίνηση κατά το σεισμό της Αθήνας (1999) στην περιοχή, και η οποία αντιστοιχεί στις εξής σεισμικές παραμέτρους:  $a^b_{max} = 0.633g$ ,  $T_e = 0.13s$  και  $n = 4$ .

Με βάση το Σχήμα 1, η μεθοδολογία προχωρεί στην εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης του εδάφους ξεχωριστά για κάθε μια από τις 13 θέσεις, μέσω των σχέσεων (1) έως (6). Χάρην συγκρίσεως, χρησιμοποιούνται και αντίστοιχες αριθμητικές αναλύσεις με το *Shake91*, οι οποίες είχαν εκτελεσθούν στα πλαίσια της μικρο-ζωνικής μελέτης του Δήμου Άνω Λιοσίων που ολοκληρώθηκε πολύ πριν την παρούσα εφαρμογή (Μπουκοβάλας κ.α. 2000).

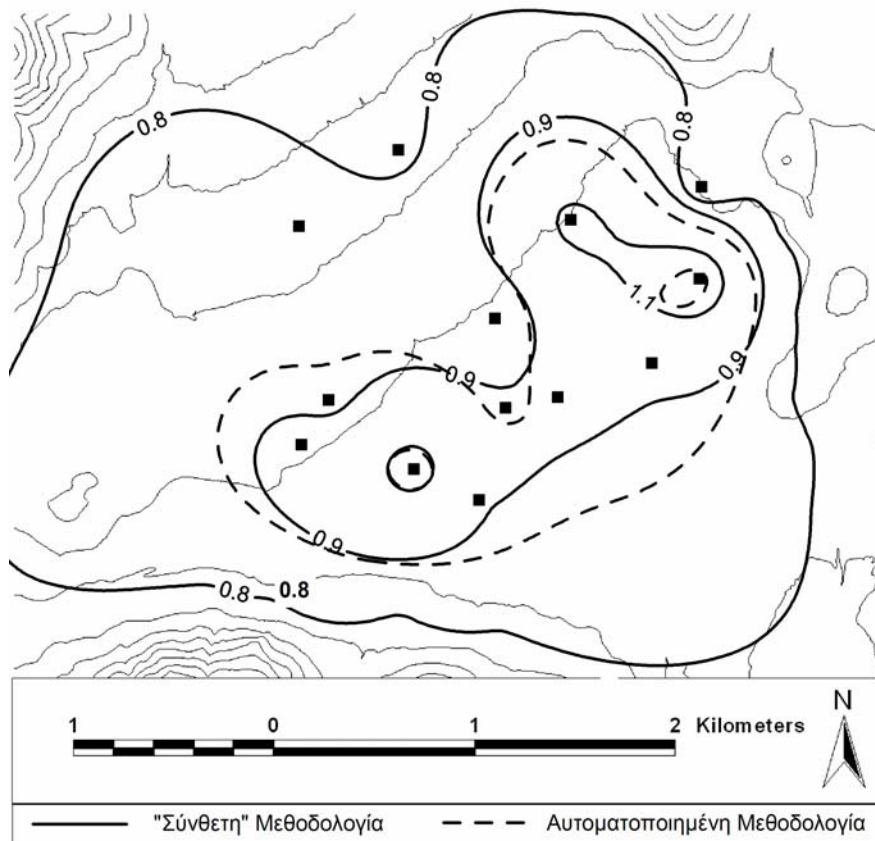
Μια συνολική σύγκριση μεταξύ επεξεργασμένων δεδομένων και αποτελεσμάτων από την προτεινόμενη αυτοματοποιημένη μεθοδολογία με τα αντίστοιχα από τη «σύνθετη» μεθοδολογία (με τη χρήση *Shake91*) και για τις 13 θέσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Η σύγκριση γίνεται σε όρους  $H$ ,  $V_{S,o}$ ,  $T_{S,o}$ ,  $T_S$ ,  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $S_a[T_{str}=0.2s]$  και  $S_a[T_{str}=0.4s]$  στα Σχήματα 3α

έως 3η, αντίστοιχα. Οι τελευταίες δύο παράμετροι, δηλ. η φασματική επιτάχυνση  $S_a$  στην επιφάνεια του εδάφους για ιδιοπεριόδους κατασκευής  $T_{str} = 0.2$  και  $0.4s$ , αντιστοιχούν αδρά στις επιταχύνσεις κτιρίων με 1-2 και 3-4 ορόφους, αντίστοιχα. Η σύγκριση δείχνει μια συνολική συμφωνία μεταξύ των δύο μεθοδολογιών, η οποία γίνεται βέλτιστη για τις ιδιοπεριόδους  $T_{S,o}$  και  $T_S$  (Σχ. 3γ, 3δ).

Όμως, η πιο ουσιώδης σύγκριση μεταξύ των δύο μεθοδολογιών γίνεται επί τη βάση ψηφιακών χαρτών, δηλαδή το τελικό «προϊόν» μιας μικρο-ζωνικής μελέτης. Η δημιουργία τους προϋποθέτει τον ορισμό συγκεκριμένων τιμών στις παραμέτρους θέσης και σεισμικής έντασης στα M σημεία αναδύομενου υποβάθρου:  $H = 0$ ,  $V_{S,o} = 750m/s$ ,  $T_{S,o} = T_S = 0$ ,  $A_a = A_v = 1$ ,  $S_a[T_{str}=0.2s] = 1.43g$  και  $S_a[T_{str}=0.4s] = 0.76g$ . Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η σύγκριση ισοκαμπυλών για τη φασματική επιτάχυνση  $S_a(g)$  σε ιδιοπερίοδο κατασκευής  $T_{str} = 0.4s$ , που αντιστοιχεί σε κτίρια με 3-4 ορόφους. Η σύγκριση τους είναι πολύ καλή, ειδικά στην περιοχή όπου οι φασματικές επιταχύνσεις αναμένονται ιδιαίτερα μεγάλες ( $> 0.9g$ ).



Σχήμα 3. Σύγκριση μεταξύ της αυτοματοποιημένης και της «σύνθετης» μεθοδολογίας για διάφορες παραμέτρους θέσης και σεισμικής έντασης.  
 Figure 3. Comparison between the automated and the complex methodologies for various site and seismic intensity parameters



Σχήμα 4. Σύγκριση μεταξύ της αυτοματοποιημένης και της «σύνθετης» μεθοδολογίας, σε όρους ισοκαμπυλών της φασματικής επιτάχυνσης  $S_a(g)$  για  $T_{str} = 0.4s$ .  
 Figure 4. Comparison between the automated and the complex methodologies, in terms of contours of the spectral acceleration  $S_a(g)$  for  $T_{str} = 0.4s$ .

Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με τους Bouckovalas & Kouretzis (2001), αυτή ακριβώς η περιοχή του Δήμου Άνω Λιοσσιών εμφάνισε συγκέντρωση βλαβών κατά το σεισμό του 1999.

## 7. ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο άρθρο αυτό προτείνεται μια αυτοματοποιημένη μεθοδολογία εκτέλεσης μικροζωνικών μελετών σεισμικής επικινδυνότητας με χρήση GIS. Η μεθοδολογία προϋποθέτει την ύπαρξη τουλάχιστον μιας γεωτεχνικής βάσης

δεδομένων. Το GIS χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των θέσεων με γνωστά γεωτεχνικά στοιχεία και για τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών μεταβολής της σεισμικής έντασης. Η επεξεργασία των δεδομένων και οι αναλύσεις σεισμικής απόκρισης γίνονται εξωτερικά προς το GIS μέσω κώδικα Η/Υ, του οποίου το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται εδώ. Ο κώδικας Η/Υ δημιουργεί την εδαφική τομή της περιοχής μελέτης και εκπονεί αναλύσεις σεισμικής απόκρισης με πολύ-παραμετρικές σχέσεις (Bouckovalas & Papadimitriou 2003, 2005), που αναπαράγουν τα αποτελέσματα της ισοδύναμα-γραμμικής μεθόδου. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποδεικνύεται: i) ακριβής, λόγω της ακρίβειας των ανωτέρω σχέσεων, ii) εύχρηστη, καθώς δεν προϋποθέτει τη χρήση άλλου λογισμικού (π.χ *Shake91*), και iii) γενικής χρήσης, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί με προϋπάρχουσες βάσεις δεδομένων.

Επισημαίνεται, ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει τρεις (3) βασικούς περιορισμούς: (α) Δεν υπάρχουν έντονες τοπογραφικές ανωμαλίες στην επιφάνεια του εδάφους και στη διεπιφάνεια εδάφους – γεωλογικού υποβάθρου. (β) Δεν διατρέχουν την περιοχή μελέτης σημαντικά ενεργά ρήγματα. (γ) Τα εδάφη στην περιοχή μελέτης δεν ανήκουν στην Κατηγορία Χ κατά ΕΑΚ ή στις Κατηγορίες S1 και S2 του EC-8.

Υπογραμμίζεται ότι οι συγγραφείς έχουν την πεποίθηση ότι κανένας κώδικας Η/Υ δεν μπορεί να υποκαταστήσει την τεχνική γνώμη ενός ειδικού, και για το λόγο αυτό ο κώδικας δίνει πολλές δυνατότητες επιλογής στο χρήστη. Δεδομένων και περιορισμών της, η προτεινόμενη μεθοδολογία θεωρείται κατάλληλη για εκτέλεση τουλάχιστον προκαταρκτικών μικροζωνικών μελετών, και πιθανώς για τον εντοπισμό περιοχών υψηλής επικινδυνότητας, όπου χρειάζονται επιπλέον γεωτεχνικές, γεωφυσικές έρευνες, ή και ακριβέστερες αριθμητικές αναλύσεις.

## 8. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διατύπωση των πολύ-παραμετρικών σχέσεων εκτίμησης της σεισμικής εδαφικής απόκρισης (εξ. 1 έως 6) χρηματοδοτήθηκε από τον Ο.Α.Σ.Π.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αντωνίου Α. Α. (2003), "HELGEORDAS:

Πρωτότυπο Σχεσιακό Σύστημα Διαχείρισης Γεωτεχνικών Δεδομένων και συνεργασία του με ΓΣΠ", Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολ/Μηχ, Ε.Μ.Π.

Biggs J. M. (1965), "Introduction to structural dynamics". New York: McGraw – Hill.

Bouckovalas G. D., Kouretzis G. P. (2001), "Stiff soil amplification in the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(8): 671 – 687, December.

Bouckovalas G. D., Papadimitriou A. G. (2003), "Multi-variable relations for soil effects on seismic ground motion" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32(10): 1867 – 1896, October.

Bouckovalas G. D., Papadimitriou A. G. (2005α), "Multi-variable relations for soil effects on peak seismic motion parameters" *Τεχνικά Χρονικά*, 25(1): 9–22.

Bouckovalas G. D., Papadimitriou A. G. (2005β), "Multi-variable relations for soil effects on elastic response spectra" *Τεχνικά Χρονικά*, 25(1): 23 – 36.

Μπουκοβάλας Γ. Δ., Παπαδημητρίου Α. Γ., Αντωνίου Α. Α., Ανδριανόπουλος Κ. Ι., Κουρετζής Γ. (2000), "Αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του εδάφους στο Δήμο Άνω Λιοσίων", *Τεχνική Έκθεση*, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολ/Μηχ, ΕΜΠ

Idriss I. M., Sun J. I. (1992), "SHAKE91 – A computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soils" *CGM Research Report*, UC Davis

Imai T., Tonuchi K. (1982), "Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus", *Proc., 2<sup>nd</sup> European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam

Papadimitriou A. G., Antoniou A., Bouckovalas G. D., Marinos P. (2004), "Approximate relations for GIS-aided evaluation of soil effects on seismic ground motion", *Proc., 11<sup>th</sup> IC on SDEE – 3<sup>rd</sup> IC on EGE*, 2: 39–46.

Papadimitriou A. G., Antoniou A., Bouckovalas G. D., Marinos P. (2006), "Methodology for automated GIS-aided seismic micro-zonation studies", *Computers and Geotechnics* (υπό κρίση).

Zonno G., Garcia-Fernandez M., Jimenez M. J., Menoni S., Meroni F., Petrini V. (2003), "The SERGISAI procedure for seismic risk assessment", *Journal of Seismology*, 7, 259 – 277.