

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ GREEN ΣΤΟ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΑΤΡΑΣ*

ΣΩΚΟΣ Ε.¹

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μέθοδος των εμπειρικών συναρτήσεων Green, όπως προτείνεται από τους Irikura & Kamae 1994, εφαρμόστηκε στην περίπτωση του σεισμού της 14^{ης} Ιουλίου 1993 στην Πάτρα. Χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές του σεισμού αυτού, στον επιταχυνσιογράφο του Εθνικού Αστεροσκοπείου στην Πάτρα καθώς και οι καταγραφές δύο μετασειμών από τον ίδιο σταθμό. Έγινε προσπάθεια με την χρήση των μετασειμών και αλλάζοντας συστηματικά διάφορες παραμέτρους να συνθέσουμε τον κύριο σεισμό. Οι δύο μετασειμοί, αν και τα επίκεντρό τους είναι πολύ κοντά γεωγραφικά, παρουσιάζουν αρκετές διαφορές και δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα στη σύνθεση. Με βάση την ανάλυση προκύπτει ότι η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να δώσει πολύτιμα συμπεράσματα κατά την διαδικασία του σεισμικού σεναρίου της πόλης και προτείνεται η εγκατάσταση αρκετών επιταχυνσιογράφων ώστε να εμπλουτιστεί η βάση δεδομένων με περισσότερες καταγραφές σειμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εμπειρικές συναρτήσεις Green.

ABSTRACT

The empirical green function method (EGF), as proposed by Irikura & Kamae 1994, was used for the synthesis of the 14th of July 1993, Patras earthquake. The accelerograms of the main shock and two aftershocks recorded at the National Observatory of Athens strong motion station, were used. Our goal was, using the two aftershocks and systematically changing various parameters to synthesize the main earthquake. Although the two aftershocks were very close to each other their recordings were very different. The EGF method produced also different results depending on the aftershock that was used, as expected. Based on this analysis we conclude that the EGF method can give useful results for the Patras Seismic Scenario. Finally we propose the installation of strong motion stations which will enrich the strong motion database with earthquake recordings that can be used as empirical green functions.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Σύνθεση εδαφικών κινήσεων; Επιταχυνσιογράμματα; Εμπειρικές συναρτήσεις Green; Σεισμικό σενάριο.

KEY WORDS: Ground motion Synthesis; Accelerograms; Empirical Green Functions; Seismic Scenario.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

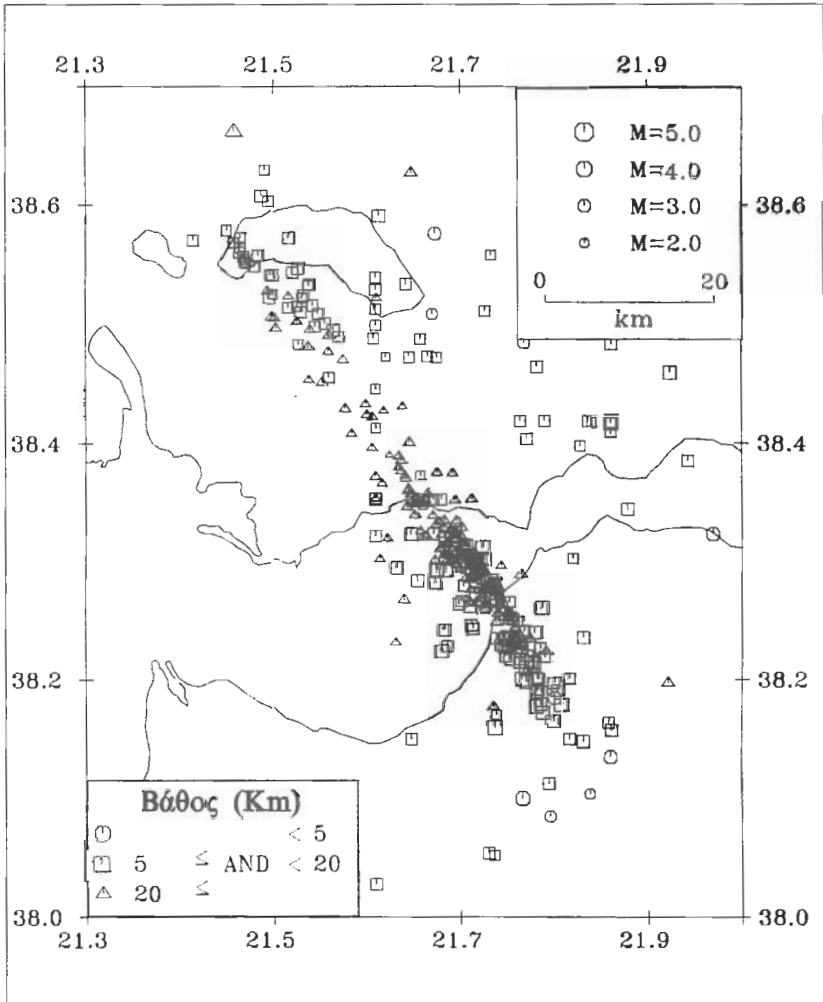
Την 14^η Ιουλίου 1993 συνέβη πολύ κοντά στην πόλη της Πάτρας ένας σεισμός μεγέθους 5.4Μ_s. Ο σεισμός αυτός ακολουθήθηκε από εκατοντάδες μετασειμούς (Tselentis et al 1994) (Σχ.1), προζάλεσε δε σημαντικές βλάβες στην πόλη. Περίπου 500 σπίτια χρειάστηκε να κατεδαφιστούν ή να επισκευαστούν. Ο σεισμός αυτός αποτελεί αδιαμφισβήτητα αντικείμενο έρευνας για το Σεισμικό Σενάριο της πόλης, το οποίο εκπονείται από το Εργαστήριο Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών.

Η πρώτη φάση του σεισμικού σεναρίου περιλαμβάνει την μελέτη των σεισμικών πηγών που

* APPLICATION OF EMPIRICAL GREEN FUNCTION METHOD IN PATRAS SEISMIC SCENARIO

¹ Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Εργαστήριο Σεισμολογίας Ρίο 26110, Πάτρα.

ενδέχεται να επηρεάσουν την πόλη. Στην φάση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι για την σύνθεση κινήσεων αντιπροσωπευτικών των πηγών αυτών. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση των καταγραφών του σεισμού της Πάτρας, με την μέθοδο των εμπειρικών συναρτήσεων Green. Χρησιμοποιώντας τις καταγραφές από τον σεισμό αυτό εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα σε σχέση με τη δομή του φλοιού στην περιοχή, τον τρόπο διάρρηξης κατά την διάρκεια του σεισμού και τις τιμές παραμέτρων χρήσιμων στην σύνθεση κινήσεων, όπως η πτώση τάσης και οι διαστάσεις της σεισμικής πηγής.



Σχήμα 1: Η μετασεισμική ακολουθία του σεισμού της Πάτρας (Tselentis et al 1994).

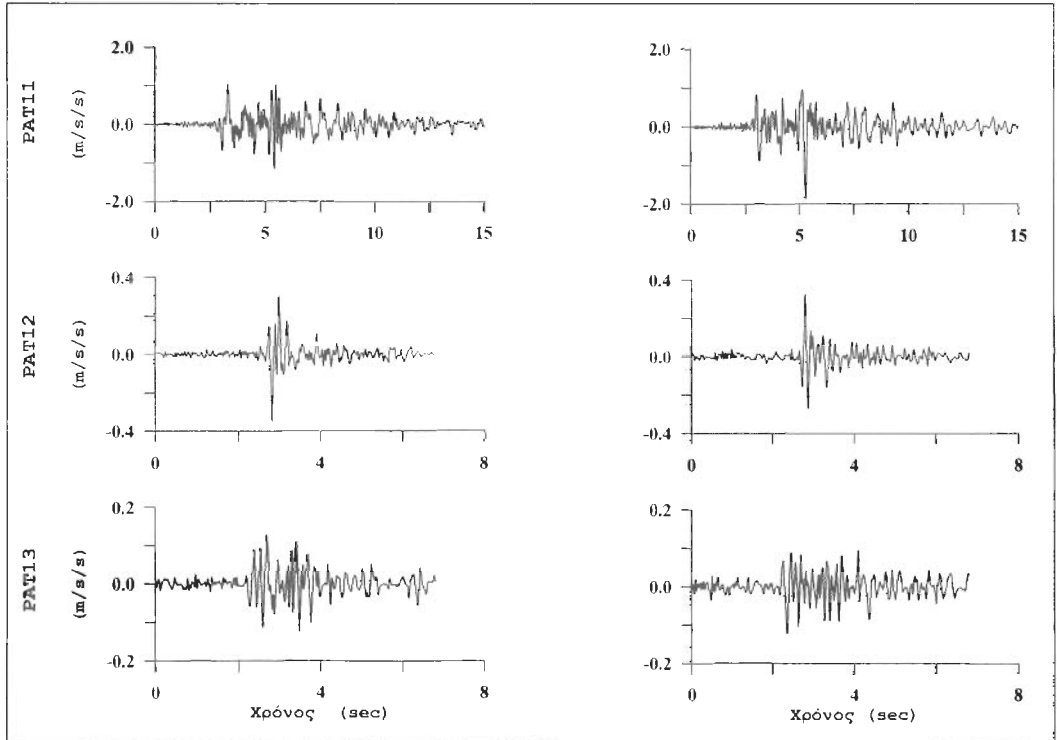
Figure 1: The aftershock sequence of Patras earthquake (Tselentis et al 1994).

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές του κύριου σεισμού (PAT11) καθώς και οι καταγραφές των δύο μετασεισμών (PAT12, PAT13), στον σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου στο κτίριο του ΟΤΕ στην Πάτρα (Kalogeras & Stavrakakis 1995). Οι καταγραφές αυτές παρουσιάζονται στο Σχ.2. Ο κύριος σεισμός προκάλεσε ψήφιατη βιβλιοθήκη Θεοφράστους Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. καταγραφές του ΙΤΣΑΚ που βρισκόταν στην εκκλησία του Αγίου Δημητρίου κατέγραψε μέγιστη επιτάχυνση = 0.4g (ΙΤΣΑΚ 1997). Η

μεγάλη αυτή διαφορά ίσως οφείλεται στις διαφορετικές τοπικές εδαφικές συνθήκες ανάμεσα στις δύο θέσεις (Tselentis et al 1996), δεν αποτελεί όμως αντικείμενο ανάλυσης σε αυτή την εργασία.

Τα επίκεντρα τόσο του κύριου σεισμού όσο και των μετασεισμών υπολογίστηκαν από τις καταγραφές του δικτύου PATNET με μια ακρίβεια $\pm 0.5\text{km}$ (Tselentis et al 1994). Η σεισμική ροπή, ο μηχανισμός γένεσης και η διάφραξη της διάφορηξης για τον κύριο σεισμό προσδιορίστηκαν από το USGS (USGS 1993) και είναι: $M_0=3.2 \cdot 10^{17}\text{Nm}$, διεύθυνση 238° , κλίση 73° και διάνυσμα ολίσθησης -163° για το κύριο επίπεδο και διάφραξη 3.2sec. Για τους δύο μετασεισμούς δεν υπάρχει επίλυση εστιακού μηχανισμού αλλά από την μορφή των επιταχυνσιογραμμάτων και τα επίκεντρό τους μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο δεύτερος μετασεισμός (PAT13) είχε μηχανισμό γένεσης παρόμοιο με τον κύριο σεισμό.



Σχήμα 2: Τα επιταχυνσιογραμμάτια που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

Figure 2: The accelerograms that were used in the analysis.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ GREEN

Η μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε είναι των εμπειρικών συναρτήσεων Green. Η αρχική ιδέα των εμπειρικών συναρτήσεων Green προέκυψε από την χρήση μικρών σεισμών για την σύνθεση μεγαλύτερων, αντί των θεωρητικών συναρτήσεων Green. Η μέθοδος βασίζεται σε δύο σχέσεις αναλογίας ανάμεσα σε σεισμούς μεγάλου και μικρού μεγέθους, η πρώτη από αυτές είναι:

$$Z_1 = \frac{X_1 - X_m}{S}$$

(1)

όπου έχουμε αντίστοιχα για μεγάλους και μικρούς σεισμούς, L και l το μήκος του ρήγματος, W και w το πλάτος του ρήγματος, T και t ο χρόνος ολίσθησης, M_0 και m_0 η σεισμική ροπή και D και d η ολίσθηση. Η παραπάνω σχέση είναι η σχέση αναλογίας των μεγεθών των σεισμών και ανεξάρτητη από το μέγεθος του σεισμού. Στην περίπτωση που η πτώση τάσης δεν θεωρείται σταθερή, σε σχέση με το

μέγεθος, η σχέση 1 γίνεται:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\left(\left[\sum_i (x_i - x_m)^2 \right] \left[\sum_i (y_i - y_m)^2 \right] \right)^{1/2}} \quad (2)$$

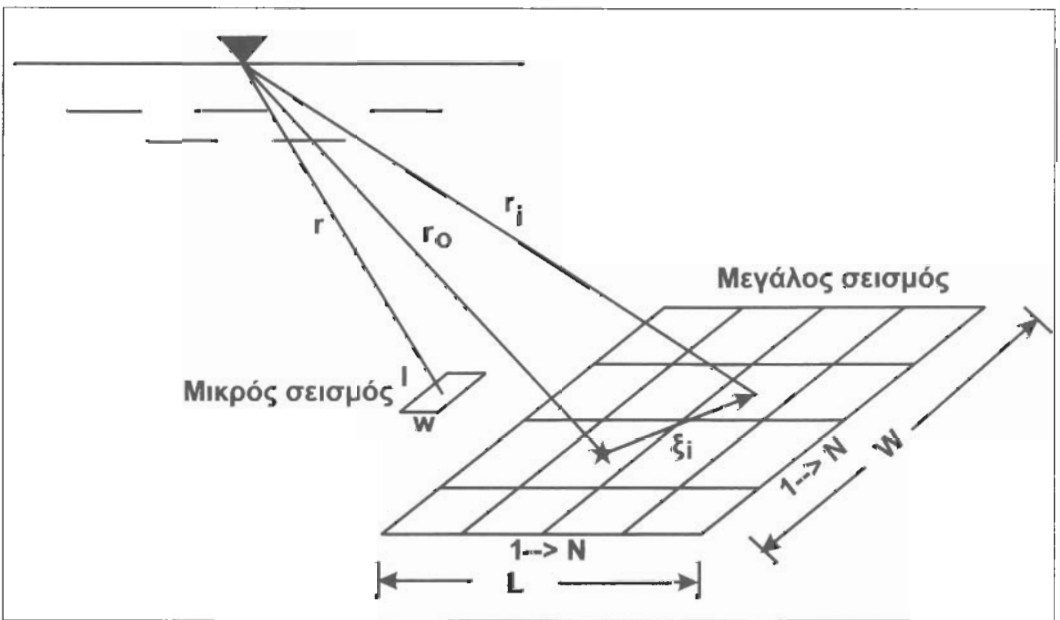
όπου C είναι ο λόγος ανάμεσα στην πτώση τάσης του μεγάλου και του μικρού σεισμού. Στο Σχ.3 παρουσιάζεται σχηματικά ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου. Ανάλογα με τον λόγο των δύο σεισμικών ροπών το επίπεδο του ρήγματος χωρίζεται σε μικρότερα ρήγματα τα οποία αντιστοιχούν σε μικρούς σεισμούς, π.χ. αν ο λόγος των ροπών είναι N^3 τότε το ρήγμα χωρίζεται σε $N \times N$ μικρότερα ρήγματα. Το σεισμογράμματα του μεγάλου σεισμού σε σχέση με τον μικρότερο σεισμό μπορεί να γραφεί:

$$\log \left(\frac{2H_i}{O_i} \right) \quad (3)$$

και

$$O_i \quad (4)$$

όπου r είναι η υποκεντρική απόσταση, r_i είναι η απόσταση του σημείου παρατήρησης έως το ρήγμα i , ξ_i είναι η απόσταση από την αρχή της διάρρηξης έως το ρήγμα i , V_r είναι ταχύτητα διάρρηξης, T είναι ο χρόνος ανάδυσης, n' είναι ένας αριθμός ο οποίος χρησιμοποιείται για τη διόρθωση μιας συχνότητας η οποία εισάγεται από τη μέθοδο και $F(t)$ ένα φίλτρο το οποίο προσαρμόζει τη διαφορά της συνάρτησης ολίσθησης ανάμεσα στο μικρό και το μεγάλο σεισμό (Irikura & Kamae 1994).



Σχήμα 3: Εφαρμογή της μεθόδου των εμπειρικών συναρτήσεων Green (Irikura & Kamae 1994).

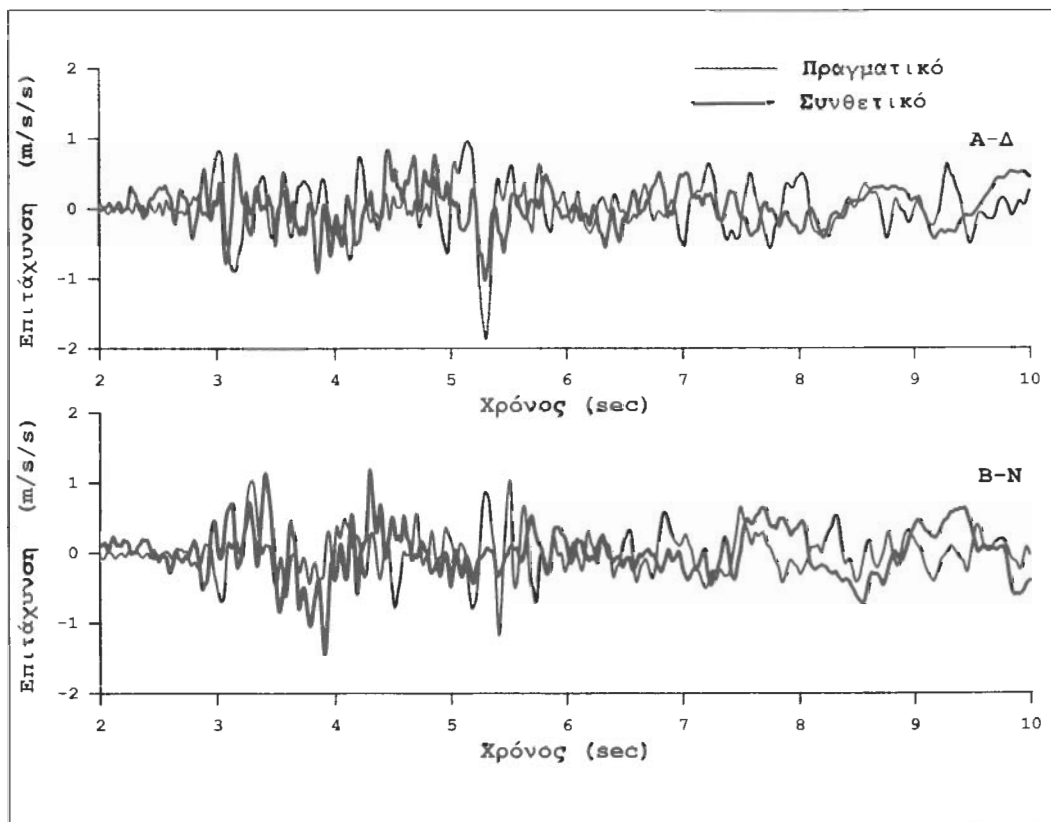
Figure 3: The Empirical Green Function method (Irikura & Kamae 1994).

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν κατά την ανάλυση ήταν το μέγεθος του ρήγματος και η πτώση τάσης. Με βάση την διάρρηξη, όπως αυτή υπολογίστηκε από το USGS ($T=3.2\text{sec}$), η γωνιακή συχνότητα προκύπτει ίση με 0.3Hz και αν θεωρήσουμε κυκλική σεισμική πηγή η ακτίνα της είναι ίση με 3km . Από τις παραπάνω τιμές η πτώση τάσης είναι ίση με 5MPa , τιμή που είναι συμβατή με τις τιμές που έχουν υπολογιστεί από άλλους συγγραφείς (π.χ. Irikura & Kamae 1994, Irikura & Kamae 1995).

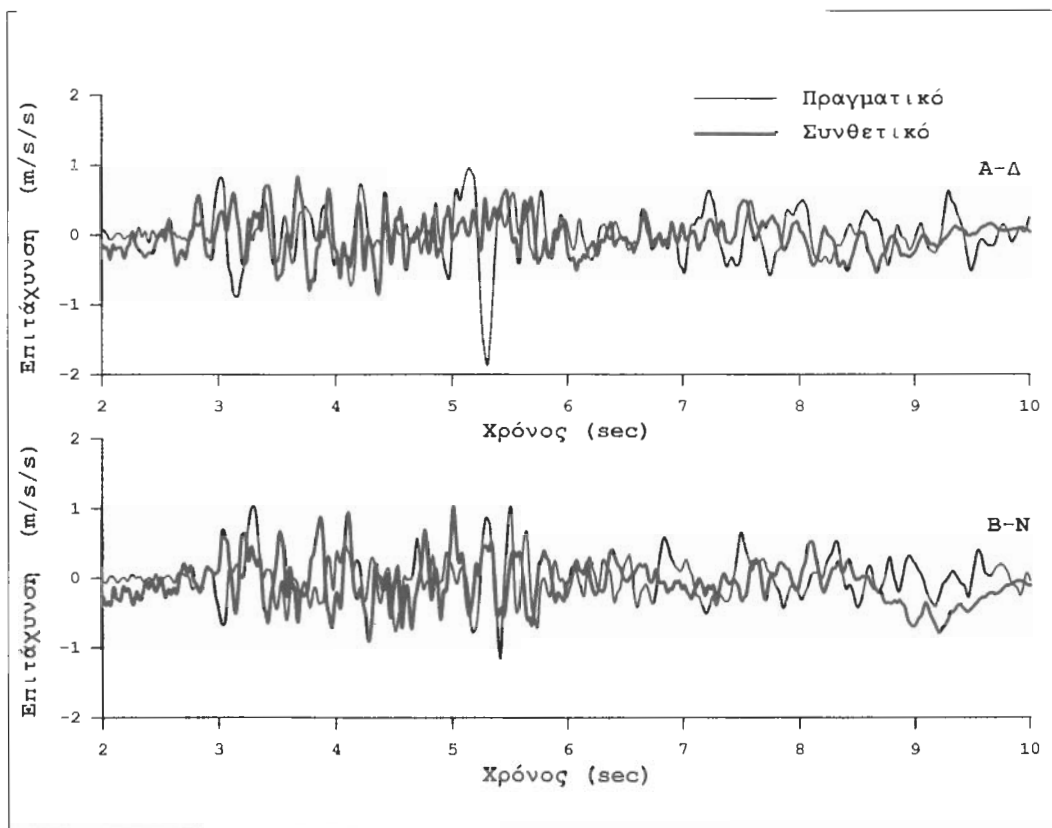
Η μέθοδος των εμπειρικών συναρτήσεων Green χρησιμοποιήθηκε σε μία επαναληπτική διαδικασία αλλαγής της τιμής της σεισμικής ακτίνας και του λόγου C, της πτώσης τάσης του μεγάλου σειμού προς τον μικρό, ώστε να έχουμε την καλύτερη προσαρμογή ανάμεσα στο πραγματικό και το συνθετικό επιταχυνσιόγραμμα. Σαν μικρός σεισμός επιλέχθηκε τόσο το επιταχυνσιόγραμμα PAT12 όσο και το επιταχυνσιόγραμμα PAT13. Τα χειρότερα αποτελέσματα προέκυψαν από το μετασεισμό PAT12. Η σεισμική ροπή του κύριου σειμού, κρατήθηκε σταθερή και η σεισμική ροπή του μικρού σειμού υπολογίστηκε, από την σχέση που προτείνεται από τους Melis et al 1995, και βρέθηκε ίση με $m_0=3.6 \cdot 10^{13} \text{Nm}$.

Το λάθος κάθε ανάλυσης υπολογίστηκε με βάση την ακόλουθη σχέση: $e_i = d_i^{\text{πραγμ.}} - d_i^{\text{συνθετ.}}$, όπου d_i είναι το πλάτος κάθε σημείου του επιταχυνσιογράμματος, το συνολικό λάθος είναι το άθροισμα των σφαλμάτων σε κάθε σημείο. Μετά από περίπου 2000 επαναλήψεις των υπολογισμών, η καλύτερη προσαρμογή του συνθετικού και του πραγματικού επιταχυνσιογράμματος (Σχ.4) επιτεύχθηκε για ακτίνα $R=1.9\text{km}$ και λόγο $C=31$. Θέλοντας να ελέγξουμε αν η εκτίμηση του USGS για ακτίνα $R=3\text{km}$ είναι σωστή, η ακτίνα κρατήθηκε σταθερή ίση με 3km και η διαδικασία επαναλήφθηκε. Τελικά η προσαρμογή που προέκυψε στην περίπτωση αυτή ήταν χειρότερη σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση, αλλά δεν μπορούμε να την απορρίψουμε με βάση τα στοιχεία τα οποία διαθέτουμε (Σχ.5).



Σχήμα 4: Αποτελέσματα σύνθεσης με την μέθοδο των εμπειρικών συναρτήσεων Green για σεισμική ακτίνα $R=1.9\text{km}$.

Figure 4: Results of the EGF method for seismic radius $R=1.9\text{km}$.
 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.



Σχήμα 5: Αποτελέσματα σύνθεσης με την μέθοδο των εμπειρικών συναρτήσεων Green για σεισμική ακτίνα $R=3\text{km}$.
Figure 5: Results of the EGF synthesis using fault radius $R=3\text{km}$.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, δύο σεισμικές ακτίνες είναι πιθανές, για τον σεισμό της Πάτρας, δεν είναι όμως δυνατόν να διακρίνουμε μία από τις δύο σαν πιο σωστή. Στην πρώτη περίπτωση ($R=1.9\text{km}$) η προτεινόμενη από το USGS ακτίνα ίσως είναι τόσο μεγάλη λόγω επίδρασης της δομής του φλοιού. Η πολυπλοκότητα του φλοιού διακρίνεται και στις καταγραφές των δύο μετασεισμών, οι οποίοι αν και πολύ κοντά μεταξύ τους παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στις κινηματομορφές και κυρίως στην διάσχεσή τους. Αν θεωρήσουμε ότι η ακτίνα είναι 1.9km τότε η πτώση τάσης προκύπτει ίση με 20MPa αραχτά μεγαλύτερη από τις συνηθισμένες τιμές για την Λιτική Ελλάδα (Stavrakakis et al 1994).

Ένα πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι και στις δύο περιπτώσεις ο λόγος της πτώσης τάσης του μεγάλου σεισμού προς την πτώση τάσης του μικρού σεισμού είναι πολύ μεγάλος ($C=31$ και $C=17$ αντίστοιχα) συμπέρασμα πολύ σημαντικό για την μελλοντική σύνθεση κινήσεων στην περιοχή. Ακόμη η πολυπλοκότητα του φλοιού μας περιορίζει στη χρησιμοποίηση καταγραφών σε μικρή απόσταση από την σεισμική πηγή που μας ενδιαφέρει, μια και διαφορετικά η ανάλυσή μας θα είναι λανθασμένη όπως στην περίπτωση του μετασεισμού PAT12.

Για το λόγο αυτό προτείνεται για την περιοχή ένα πυκνό δίκτυο σεισμογράφων που θα υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια τα επίκεντρα, ακόμη και των πολύ μικρών σεισμών, σε συνδυασμό με ένα δίκτυο επιταχυνσιογράφων που θα προσφέρει καταγραφές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εμπειρικές συναρτήσεις Green.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας ευχαριστεί τον Αναπλ. Καθηγητή κ. Α. Τσελέντη για την πολύτιμη βοήθειά του, κατά την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας, καθώς και τον Καθηγητή κ. J. Zahradnik για την προσφορά του προγράμματος με το οποίο έγινε η ανάλυση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- IRIKURA, K. and KAMAE, K. 1994, Estimation of strong motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique, *Annali di Geofisica*, XXXVII, 1721-1743.
- ITSAK 1997, Bulletins of strong motion recordings of ITSAK strong motion network 1980-1994, ITSAK Internal Report, 97-01, 1997, 219 pp.
- KALOGERAS, I. S. and STAVRAKAKIS, G. N. 1995, Analysis of Greek accelerograms recorded at stations of NOA's network time period 1990-1994, National Observatory of Athens (NOA), Geodynamic Institute, Publication No. 5, 1995, 403 pp.
- MELIS, N. S., BROOKS, M. and PEARCE, R. G. 1989, A microearthquake network in the Gulf of Patras, western Greece, and its seismotectonic interpretation, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 98, 515-524.
- MELIS, N. S., BURTON, P.W. and BROOKS, M. 1995, Coseismic crustal deformation from microseismicity in the Patras area. *Geophys. J. Int.*, 122, 815-836.
- STAVRAKAKIS, G. N., KALOGERAS, I. S. and DRAKOPOULOS, J. K. 1994, Analysis of accelerograms of the Patras' seismic sequence (July 14, 1993) recorded at National Observatory of Athens (NOA) stations. In: C. Makropoulos, P. Suhadolc (ed.), *Pro. of ESC XXIV General Assembly*, Athens, Greece, 19-24 September 1994: 1455-1465.
- TSELENTIS, G-A., MELIS, N.S. and SOKOS, E., 1994. The Patras (July 14, 1993; MS=5.4) earthquake sequence. In: VIIIth Congress Greek Geological Society, 1994 May 25-27, Thessaloniki, Greece [in press].
- TSELENTIS, G-A., KOUKIS, G., SOKOS, E., RUBAS, D., JANSKY, J., PLICKA, V., PAKZAD, M. and ZAHRADNIK, J. 1996, Modelling the strong ground motions in the city of Patras, Greece, during July 1993 earthquake. In: *Sociedad Mexicana de Ingeniera Sismica* (ed.), *Pro. 11th World conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico 23-28 June 1996.
- U.S.DEPT. OF INTERIOR/GEOL.SURVEY 1993. Preliminary determination of epicentres. - National Earthquake Information Center, Monthly Listing, July 1993.