

# Η Επίδραση των Τοπικών Εδαφικών Συνθηκών στη Σεισμική Διέγερση και η Δυναμική Απόκριση της Καλωδιωτής Γέφυρας του Ευρίπου

## Local Soil Effects on Ground Motion and Dynamic Response of the Evripos Cable-Stayed Bridge

ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ, Χρ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ  
ΜΑΚΡΑ, Κ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Δόκιμος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ  
ΛΕΚΙΔΗΣ, Β. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ  
ΚΛΗΜΗΣ, Ν. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης της επιροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση με την εφαρμογή των τεχνικών του κλασσικού φασματικού λόγου και του λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα στις καταγραφές των σταθμών στα βάθρα του μόνιμου δικτύου επιταχυνσιογράφων της γέφυρας του Ευρίπου. Επιπλέον, η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής με ενόργανες μετρήσεις επέτρεψε τη σύγκριση με αποτελέσματα αναλυτικών προσομοιώματων, και τη βαθμονόμηση των τελευταίων, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε πιο αξιόπιστες αποτιμήσεις της δυναμικής απόκρισης της γέφυρας σε μελλοντικές σεισμικές και άλλου τύπου διεγέρσεις

**ABSTRACT:** In this paper, we present results on the evaluation of local site effects with the use of the standard spectral ratio and horizontal to vertical spectral ratio techniques, which were applied on recordings from the permanent accelerometric network of the Evripos cable-stayed bridge. In addition to the above, we have studied the dynamic response of this bridge using these recordings and compared the results with analytical ones. The latter allowed calibrating the analytical models in order to be used for a more reliable evaluation of the dynamic response of the bridge during future earthquakes or other type of dynamic excitations.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών με τη βοήθεια επιταχυνσιογράφων συμβάλλει καθοριστικά στην πληρέστερη και ακριβέστερη κατανόηση της πραγματικής απόκρισης μιας κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός σεισμού ή άλλης δυναμικής διέγερσης. Επιπλέον, η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής δίνει τη δυνατότητα στον ερευνητή να χρησιμοποιήσει τις καταγραφές-ενόργανες μετρήσεις του έργου για τη σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναλυτικών προσομοιώματων, και να προχωρήσει στην κατάλληλη βαθμονόμηση των τελευταίων. Τα βαθμονομημένα προσομοιώματα μπορούν κατόπιν να χρησιμοποιηθούν για μια πιο αξιόπιστη αποτίμηση της δυναμικής απόκρισης της γέφυρας σε μελλοντικές σεισμικές και άλλου

τύπου διεγέρσεις.

Το ΙΤΣΑΚ, ήδη από το 1994, έχει προχωρήσει στην εγκατάσταση και λειτουργία μόνιμου δικτύου 32 επιταχυνσιογράφων στην γέφυρα του Ευρίπου. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, το δίκτυο έχει καταγράψει την απόκριση της γέφυρας σε διάφορους, κυρίως μικρού και μεσαίου μεγέθους, σεισμούς.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται καταγραφές σεισμών για την εξέταση της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση διαμέσου δύο εμπειρικών προσεγγίσεων. Παράλληλα, με βάση τις καταγραφές της απόκρισης της ανωδομής στην εξεταζόμενη σειρά σεισμικών συμβάντων που έπληξαν τη γέφυρα, υπολογίζονται, με κατάλληλη μεθοδολογία, τα δυναμικά χαρακτηριστικά της (ιδιομορφές, ιδιοτιμές), και τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με αυτά αναλυ-

τικών προσομοιωμάτων της γέφυρας. Από τη σύγκριση των πειραματικών και αναλυτικών προσεγγίσεων προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την πραγματική δυναμική απόκριση της γέφυρας και των διαφόρων παραγόντων που την επηρεάζουν.

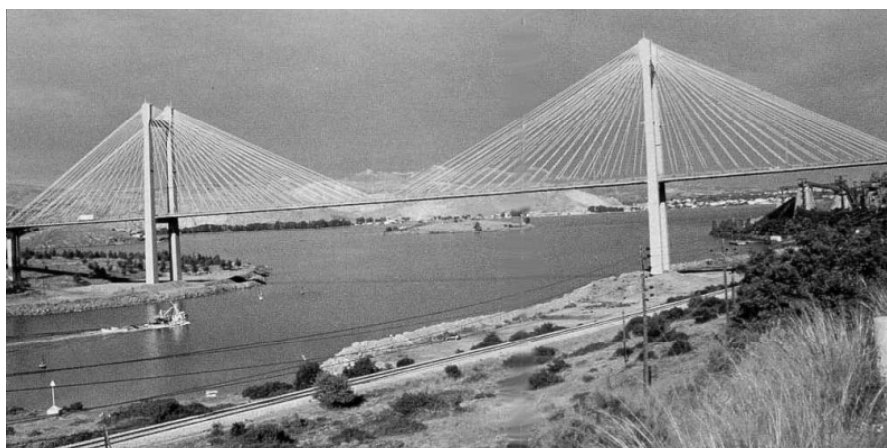
## 2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ

Η υψηλή γέφυρα (Φωτογραφία 1) είναι μία από τις σημαντικότερες στην Ελλάδα και μία από τις μεγάλες του είδους της στην Ευρώπη. Έχει συνολικό μήκος 694.50m και ωφέλιμο πλάτος 12.60m, ενώνοντας τη Βοιωτική με την Ευβοϊκή ακτή. Η γέφυρα αποτελείται από τις προσβάσεις και το κεντρικό τμήμα. Οι γέφυρες πρόσβασης, μήκους 4X35.90 m (Βοιωτία) και 4X39.00m (Εύβοια), μορφώνονται με προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς διατομής διπλού ταυ (H) και επιτόπου σκυροδετούμενη εγκάρσια προεντεταμένη πλάκα κυκλοφορίας.

Το κεντρικό, καλωδιωτό τμήμα της γέφυρας

έχει μήκος 395.00m με κεντρικό άνοιγμα 215.00m και δύο πλευρικά ανοίγματα των 90.00m, και ελεύθερο ύψος 35.51m. Τα στοιχεία του κεντρικού ανοίγματος επιτρέπουν τη διέλευση μεγάλων πλοίων από και προς τη Χαλκίδα. Το κατάστρωμα της γέφυρας, που είναι από σκυρόδεμα, αναρτάται με χαλύβδινα καλώδια από δύο πυλώνες ύψους περίπου 90.00m πάνω από τη θάλασσα. Η θεμελίωση των πυλώνων έγινε με σύστημα φρεατοπασσάλων Φ120 (Σταθόπουλος, 1994).

Πέρα από τα συνήθη προβλήματα που προκύπτουν λόγω της ιδιάζουσας συμπεριφοράς των κρεμαστών γεφυρών (π.χ. μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδίων, αεροελαστική ευστάθεια), το συγκεκριμένο έργο παρουσιάζει μία σειρά προσθέτων προβλημάτων τα οποία προκύπτουν λόγω των γεωλογικών και γεωγραφικών ιδιαιτεροτήτων στη θέση του έργου, και τα οποία το καθιστούν ένα από τα δυσχερέστερα που πραγματοποιήθηκαν στον κόσμο.



Φωτογραφία 1. Η καλωδιωτή γέφυρα του Ευρίπου

Photo 1. The Evripos cable-stayed bridge

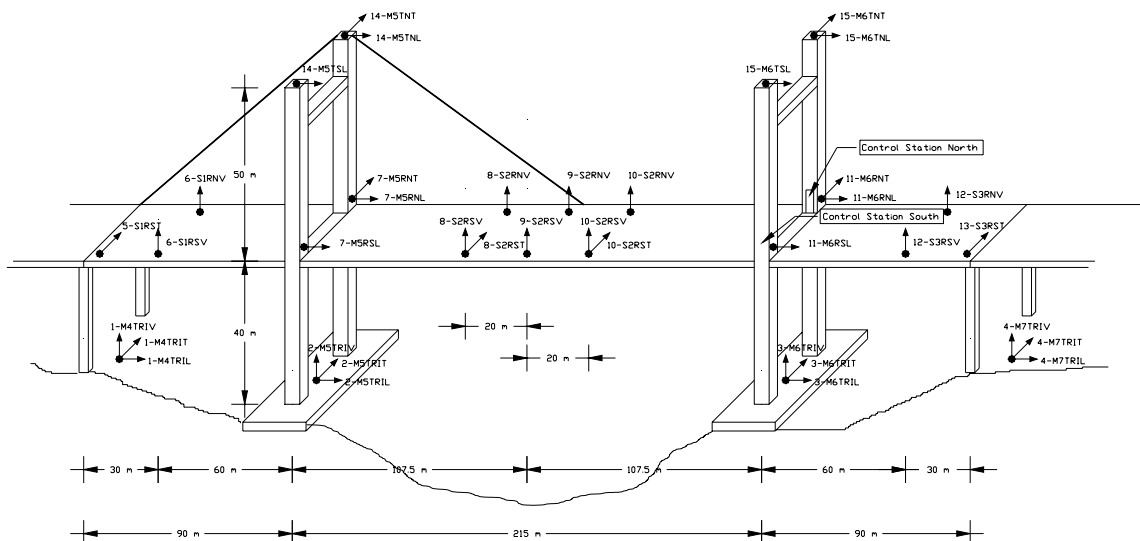
## 3. ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΕΥΡΙΠΟΥ

Από το 1994, το ΙΤΣΑΚ εγκατέστησε σταδιακά στο κεντρικό καλωδιωτό τμήμα της γέφυρας ένα μόνιμο δίκτυο επιταχυνσιογράφων αποτελούμενο σήμερα από 32 αισθητήρες οι οποίοι παρακολουθούν και καταγράφουν την σεισμική συμπεριφορά του έργου. Οι θέσεις των αισθητήριων επιλέχθηκαν προσεκτικά και με τέτοιο τρόπο ώστε να απεικονίζουν, κατά τον πληρέστερο δυνατό τρόπο, την δυναμική συμπεριφορά της. Στο Σχήμα 1 δίνεται η διάταξη ενοργάνωσης της γέφυρας. Έξι αισθητήρες ανίχνευσης της κατακόρυφης κίνησης και δύο για την καταγραφή της εγκάρσιας, καταγράφουν την απόκριση στο μεσαίο άνοιγμα της γέφυρας, ενώ στον καθένα από τους δύο πυλώνες τοποθετήθηκαν έξι αισθητήρες. Υπάρχουν

επίσης 4 τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα, δύο στη βάση του κάθε πυλώνα και δύο ελεύθερου πεδίου, σε κάθε μία από της ακτές του πορθμού. Όλοι οι αισθητήρες είναι συνδεδεμένοι με την καταγραφική μονάδα ώστε να έχουν κοινή διέγερση, κοινή δειγματοληψία και χρόνο. Ο ρυθμός χρονικής δειγματοληψίας των επιταχυνσιομέτρων έχει ορισθεί στα 200 δείγματα ανά δευτερόλεπτο.

## 4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Είναι ευρέως γνωστό ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά τη σεισμική κίνηση σε μία θέση. Η γεωμετρία της εδαφικής δομής, η διακύμανση των εδαφικών σχηματισμών και των ιδιοτήτων τους με το βάθος, οι



Σχήμα 1 Διάταξη μόνιμου δικτύου επιταχυνσιομέτρων της γέφυρας του Ευρίπου  
 Figure 1 The permanent accelerometer structural array on Enripos cable-stayed bridge

πλευρικές ετερογένειες και η τοπογραφία είναι οι συνηθέστερες αιτίες που προκαλούν ενίσχυση της σεισμικής κίνησης και έχουν επανειλημμένως συσχετισθεί με την παρατηρούμενη κατανομή των βλαβών από καταστροφικούς σεισμούς (Aki, 1993; Bard, 1994; Faccioli, 1991; Chávez-García et al., 1996). Ένας από τους στόχους της σεισμικής γεωτεχνικής μηχανικής είναι η ποσοτικοποίηση της ενίσχυσης και του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής κίνησης από καταγραφές ειδικών δικτύων και ο συσχετισμός τους με τις επικρατούσες τοπικές εδαφικές συνθήκες τόσο σε περιοχές υψηλής οικιστικής δραστηριότητας όσο και κατά μήκος υποδομών μεγάλης σπουδαιότητας που βρίσκονται σε περιοχές υψηλής σεισμικής δραστηριότητας όπως η γέφυρα του Ευρίπου.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιχειρείται η ερμηνεία της χωρικής διαφοροποίησης της σεισμικής κίνησης από θέση σε θέση σε συνδυασμό με τις επικρατούσες εδαφικές συνθήκες της περιοχής των βάθρων θεμελίωσης της γέφυρας του Ευρίπου. Η ερμηνεία αυτή βασίζεται κυρίως στην ανάλυση των καταγραφών στις βάσεις των πυλώνων καθώς και στο ελεύθερο πεδίο και τις διαθέσιμες πληροφορίες για τους εδαφικούς και βραχώδεις σχηματισμούς της περιοχής από σχετικές γεωτεχνικές έρευνες (ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΠΕ, 1985).

#### 4.1. Χρησιμοποιηθείσες καταγραφές

Η μελέτη της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση βασίζεται κυρίως στην ανάλυση των καταγραφών των σταθμών σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου στα ακρόβαθρα M4 και M7 καθώς επίσης και εκεί-

νων που είναι τοποθετημένοι στον κεφαλόδεσμο θεμελίωσης των βάθρων M5 και M6 (Σχ.1).

Από την αρχή της λειτουργίας του μέχρι σήμερα το σύστημα έχει καταγράψει σημαντικό αριθμό διεγέρσεων που οφείλονται σε μικρής και μέτριας έντασης σεισμικές δονήσεις σε αποστάσεις 20-100 km από το έργο. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές των σεισμών του Πίνακα 1 μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται ο σεισμός της Αθήνας (Πάρνηθα) της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 και ο σεισμός της Σκύρου της 26<sup>ης</sup> Ιουλίου 2001. Η επιλογή των καταγραφών των σεισμών που αναφέρονται στον Πίνακα 1 βασίστηκε κυρίως στα παρακάτω κριτήρια: α) σεισμοί με μέγεθος  $M > 4$  σε διαφορετικές επικεντρικές αποστάσεις (κοντινού και μακρινού πεδίου) και β) ύπαρξη ταυτόχρονων καταγραφών σε όλες τις θέσεις μελέτης (M4-M7). Οι σεισμοί που επιλέχθηκαν ικανοποιούν πλήρως το πρώτο κριτήριο ενώ μερικώς το δεύτερο, διότι ο κύριος σεισμός της Σκύρου της 26<sup>ης</sup> Ιουλίου 2001, δεν διέγειρε το πιο απομακρυσμένο σημείο της γέφυρας (βάθρο M4) (βλ. Πίνακα 2) ενώ οι καταγραφές των σεισμών 4 και 5 στο βάθρο M6 ήταν πρακτικά μη αξιοποιήσιμες.

#### 4.2. Τεχνικογεωλογικές συνθήκες των βάθρων θεμελίωσης

Η ανάπτυξη των γεωλογικών σχηματισμών στο χώρο κατασκευής της γέφυρας ελέγχεται καθοριστικά από τα ρήγματα της περιοχής και μία προσέγγιση του γεωλογικού μοντέλου όπου θεμελιώνεται το έργο δίνεται στη γεωλογική τομή του Σχήματος 2a (Γεωμηχανική

Πίνακας 1. Παράμετροι των σεισμών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη  
 Table 1. Seismological parameters of the earthquakes that were used in the present study

α/α	Ημερομηνία	Χρόνος GMT	Γεωγρ. Συντετ.		Βάθος (km)	Μέγεθος ( $M_w$ )	Απόσταση
			$\varphi_B^\circ$	$\lambda_A^\circ$			
1	1998 ΜΑΙ. 22	16:22	38.495	23.428	19	4.3	15
2	1999 ΣΕΠ. 07	11:57	38.059	23.571	14	5.9	43
3	2001 ΙΟΥΛ 26	00:22	39.039	24.339	7	6.4	93
4	2003 ΙΟΥΝ 18	05:25	38.62	23.68	21	4.9	19
5	2003 ΙΟΥΝ 26	13:45	38.61	23.65	19	4.6	17

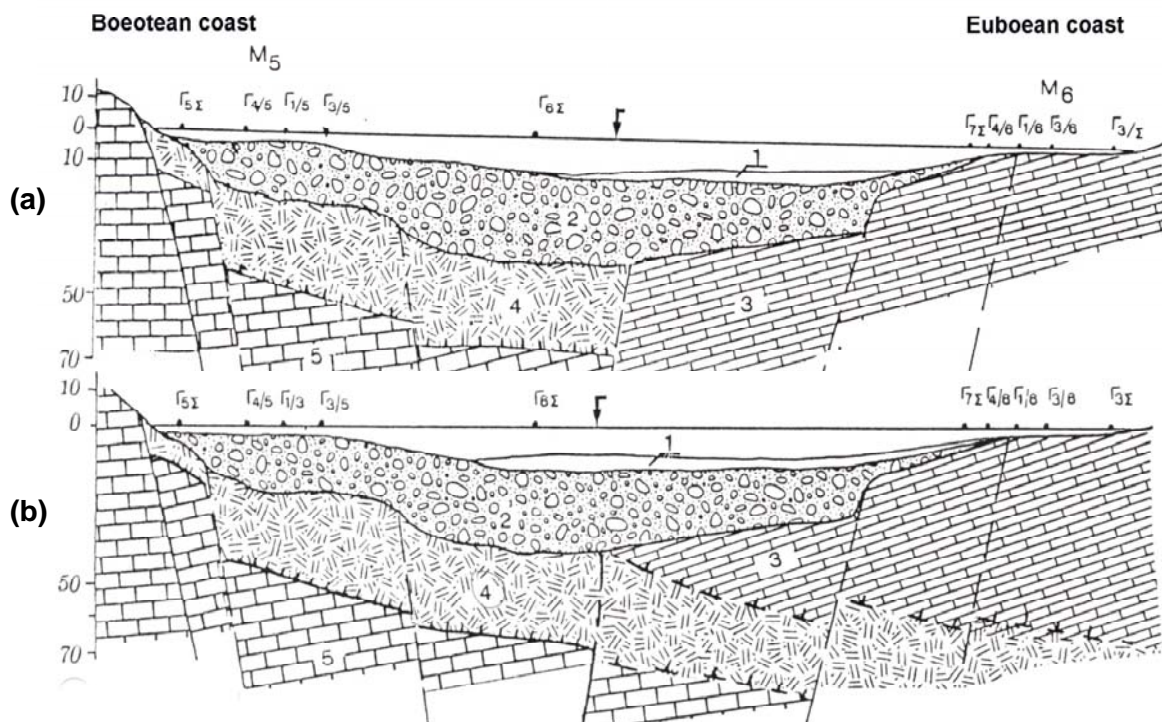
Πίνακας 2. Καταγραφές σεισμών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη  
 Table 2. Earthquake recordings that were used in the present study

	1998 ΜΑΙ. 22	1999 ΣΕΠ. 07	2001 ΙΟΥΛ 26	2003 ΙΟΥΝ 18	2003 ΙΟΥΝ 26
M4	X	X		X	X
M5	X	X	X	X	X
M6	X	X	X		
M7	X	X	X	X	X

1985). Μία δεύτερη προσέγγιση προτείνεται από τους Marinis et al. (1994) οι οποίοι προτείνουν διαφορετικό γεωλογικό προσομοίωμα (Σχήμα 2b) το οποίο σύμφωνα με τους συγγραφείς ερμηνεύει ορθότερα τη δημιουργία διαύλου, υποθέτοντας ότι οι κρητιδικό ασβεστόλιθοι είναι επωθημένοι πάνω στους άλλους σχηματισμούς (οφιολίθους) και ότι στη συνέχεια η δομή αυτή τεμαχίσθηκε με ρήγματα βαρύτητας. Η διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων του σχήματος 2, από πλευράς εφηρμοσμένου ενδιαφέροντος είναι η ηπιότερη δραστηριότητα των ρηγμάτων της Ευβοϊκής α-

κτής, κατά το πρόσφατο παρελθόν, που χαρακτηρίζει το δεύτερο.

Συμπερασματικά και σε ό,τι αφορά τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες των περιοχών των βάθρων θεμελίωσης (Γεωμηχανική, 1985), μπορεί να ειπωθεί ότι: α) Το ακρόβαθρο M4 εδράζεται σε τριαδικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες της Βοιωτικής ακτής, μετρίως έως ελάχιστα ρηγματωμένους, σχετικά καλής συμπεριφοράς με μικρή πιθανότητα συνάντησης καρστικών εγκοίλων. Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη πυρήνων του βραχώδους υλικού κυμαίνεται μεταξύ 25 και 50 MPa ενώ το μέτρο ελαστικότητας



Υπόμνημα 1: Σύγχρονα θαλάσσια ιζήματα (αμμοιλύς) 2. Αργιλοιλύς με θραύσματα ασβεστόλιθου 3. Ασβεστόλιθοι κρητιδικού 4. Οφιολιθικό σύμπλεγμα 5. Ασβεστόλιθοι Τριαδικού – Ιουραϊκού  
 Σχήμα 2. Γεωλογικές τομές κατά μήκος της γέφυρας α) Γεωμηχανική, 1985 β) Marinis et al., 1994.  
 Figure 2. Geological models along the bridge a) Geomichaniki Ltd, 1985 & b) Marinis et al., 1994.

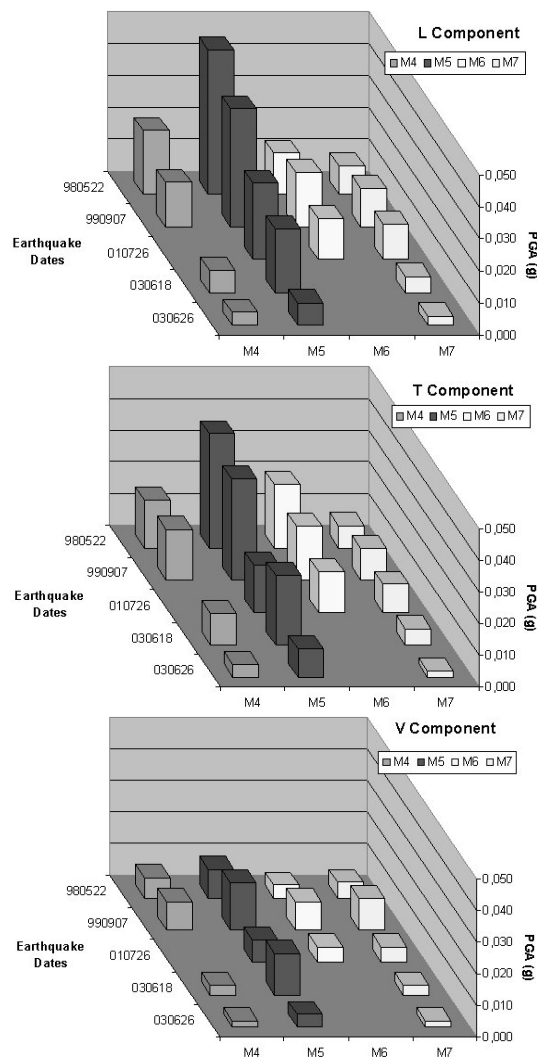
μεταξύ 1.0 και 2.2 GPa. β) Το βάθρο M5 της βοιωτικής πλευράς του διαύλου θεμελιώνεται σε πασσάλους που φτάνουν σε σύμπλεγμα σερπεντινιτών σε βάθη μεταξύ 17 και 49m. Το σύμπλεγμα αυτό υπόκειται μίας στρώσης αργιλωδών ιλύων και χαρακτηρίζεται από ανομοιογενή και ακατάστατη δομή, πτωχής έως πολύ πτωχής μηχανικής συμπεριφοράς. Το υγιές υπόβαθρο αποτελείται από τριαδικούς ασβεστολίθους και δολομίτες με παρόμοια μηχανική συμπεριφορά όπως στο ακρόβαθρο M4. γ) Το βάθρο M6 ανήκει στους σχηματισμούς της Ευβοϊκής ακτής και θεμελιώνεται με πασσάλους μήκους 15m σε Κρητιδικούς ασβεστολίθους ιδιαίτερα κερματισμένους με τοπικές μεταβάσεις προς συμπεριφορά αργιλοχαλικώδους συνάγματος. δ) Το ακρόβαθρο M7 θεμελιώνεται σε κρητιδικούς ασβεστολίθους μέτριας έως αρκετά ρηγματωμένους, μέτριας έως καλής συμπεριφοράς. Η πιθανότητα συναντήσεων καρστικών εγκοίλων πληρωμένων με αργιλικό υλικό είναι πιο μεγάλη απ' ό,τι στο βάθρο M4.

#### 4.3. Χαρακτηριστικά σεισμικής απόκρισης

Για τις καταγραφές των σεισμών του Πίνακα 1, στο σχήμα 3 δίνεται η κατανομή κατά μήκος του άξονα της γέφυρας των καταγεγραμμένων στα βάθρα κορυφαίων εδαφικών επιταχύνσεων και των τριών συνιστωσών της σεισμικής κίνησης. Στο ακρόβαθρο M7 της Ευβοϊκής ακτής, παρατηρούνται οι μικρότερες κορυφαίες εδαφικές επιταχύνσεις σε σύγκριση με τις αντίστοιχες στις άλλες θέσεις ανεξαρτήτως μεγέθους και επικεντρικής απόστασης του σεισμού. Οι τιμές των κορυφαίων εδαφικών επιταχύνσεων στο ακρόβαθρο M4 και στο βάθρο M6 είναι γενικά κατά μέσο όρο της ίδιας τάξης και κατ' ελάχιστον μεγαλύτερες εκείνων του βάθρου M7, ενώ οι μεγαλύτερες εδαφικές επιταχύνσεις παρατηρούνται στο βάθρο M5. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι συμβατές με τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες ανά θέση.

Η αύξηση του πλάτους της κορυφαίας εδαφικής επιτάχυνσης στο βάθρο M5 φαίνεται κατ' αρχήν να συνδέεται με την ύπαρξη 17m πάχους εδαφικών υλικών πληρώσεως και 32m περίπου πετρώματος πολύ πτωχής μηχανικής συμπεριφοράς, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα βάθρα όπου τοποθετούνται σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς (ρηγματωμένους, κερματισμένους ή μη).

Προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή της τοπικής γεωλογίας των βάθρων στα χαρακτηριστικά της σεισμικής κίνησης, υπολογίσθηκαν οι συναρτήσεις μεταφοράς της σεισμικής κίνη-



Σχήμα 3. Κορυφαίες εδαφικές επιταχύνσεις κατά μήκος της γέφυρας  
Figure 3. Peak ground accelerations along the bridge

σης με την τεχνική του κλασσικού φασματικού λόγου (SSR). Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής προϋποθέτει την ύπαρξη καταγραφών απαλλαγμένων από πάσης φύσεως επιρροή δηλαδή να προέρχονται από θέσεις σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου και επιφανειακής εκδήλωσης βράχου (σταθμός αναφοράς).

Βάσει των γεωλογικών και γεωτεχνικών περιγραφών, προκύπτει ότι τόσο οι καταγραφές του ακρόβαθρου M4 όσο και του M7 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό (ελεύθερο πεδίο, ασβεστολιθικοί σχηματισμοί). Προκειμένου να βρεθεί η καταλληλότερη θέση μεταξύ των M4 και M7 που θα χρησιμοποιηθεί ως σταθμός αναφοράς, υπολογίζονται οι μέσοι φασματικοί λόγοι της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα των σεισμών του Πίνακα 1 (Σχήμα 4). Σύμφωνα με τους Stiedl et al. (1996), μία θέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σταθμός αναφοράς όταν ο φασματικός λόγος

της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα είναι μονάδα για συχνότητες μικρότερες από 5Hz. Από το σχήμα 4, προκύπτει ότι για το βάθρο M7 η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης είναι μικρότερη από 2 για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων μέχρι τα 10Hz σε αντίθεση με εκείνη του M4 όπου παρατηρείται ενίσχυση μεγαλύτερη από 2 (σε μερικές περιπτώσεις μεγαλύτερη από 3) για συχνότητες μεγαλύτερες από 2Hz. Για το λόγο αυτό, η καταλληλότερη θέση για να χρησιμοποιηθεί ως σταθμός αναφοράς είναι M7, επιλογή σύμφωνη με τα γεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των κρητιδικών ασβεστολίθων που παρουσιάζουν καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τους τριαδικούς ασβεστολίθους και δολομίτες.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς με την τεχνική του κλασσικού φασματικού λόγου χρησιμοποιώντας ως κίνηση αναφοράς τις καταγραφές της θέσης M7. Στο σχήμα 5 δίνονται οι μέσες συναρτήσεις μεταφοράς της επιμήκους και εγκάρσιας συνιστώσας των καταγραφών στα βάθρα M4, M5 και M6. Οι συναρτήσεις αυτές εκφράζουν τη διαφοροποίηση της σεισμικής κίνησης σε συνάρτηση με τη συχνότητα σε κάθε θέση μελέτης και σε σχέση με εκείνη που καταγράφηκε στο βάθρο M7. Στο σχήμα 5 παρατηρείται ότι: α) Στο βάθρο M4, το πλάτος ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης δεν υπερβαίνει το 4.0, αφορά συχνότητες μεγαλύτερες από 5Hz, ενώ κατά μέσο όρο στο εύρος αυτό των συχνοτήτων δεν

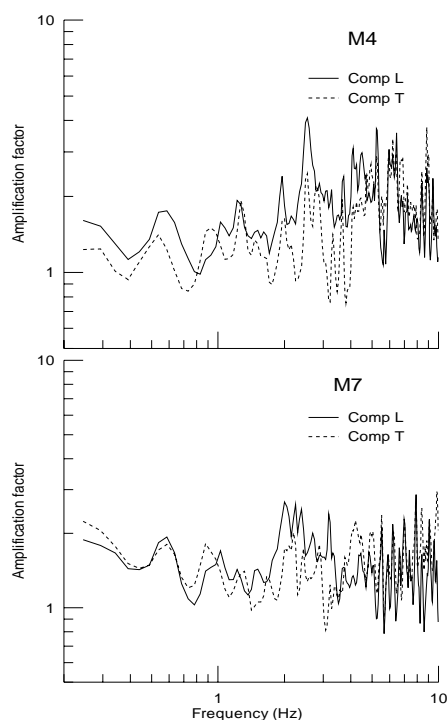
υπερβαίνει το 3.0. β) Στο βάθρο M5, ενίσχυση της σεισμικής κίνησης παρατηρείται για μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων ( $f > 3\text{Hz}$ ) με σημαντικά μεγαλύτερα πλάτη ( $> 5$  κατά μέσο όρο), ενώ για την επιμήκη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης και για μία διακεκριμένη συχνότητα ( $\sim 4.5\text{Hz}$ ), το πλάτος ενίσχυσης υπερβαίνει την τιμή 10. γ) Στο βάθρο M6, ενίσχυση της σεισμικής κίνησης παρατηρείται για ένα πολύ μικρό εύρος περιόδων (μεταξύ 6.0 και 9.0Hz) με πλάτος που δεν υπερβαίνει το 5. δ) Σε κάθε περίπτωση, στο εύρος των 23 πρώτων ιδιοσυχνοτήτων ταλάντωσης (0.25-1.632 Hz. βλ. §5) δεν παρατηρείται ενίσχυση της σεισμικής κίνησης (μοναδιαίο περίπου πλάτος συναρτήσεων μεταφοράς) λόγω της επιρροής της τοπικής γεωλογίας των θέσεων των βάθρων ή της ταλάντωσης της κατασκευής δεδομένου ότι οι επιταχυνσιογράφοι στις θέσεις M5 και M6 είναι τοποθετημένοι στο κεφαλόδεσμο της θεμελίωσης των βάθρων.

Όλα τα αποτελέσματα οδηγούν στα παρακάτω συμπεράσματα: α) η επιρροή της τοπικής γεωλογίας στη σεισμική κίνηση αφορά κυρίως το βάθρο M5 όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ενισχύσεις για μεγαλύτερο εύρος περιόδων, γεγονός που σχετίζεται ποιοτικά και με τις υπάρχουσες γεωλογικές και γεωτεχνικές πληροφορίες για την περιοχή β) η επιρροή της τοπικής γεωλογίας στη σεισμική κίνηση δεν φαίνεται να επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της σεισμικής απόκρισης της γέφυρας και αντιστρόφως, διότι η όποια ενίσχυση της σεισμικής κίνησης παρατηρείται σε συχνότητες μεγαλύτερες από εκείνες των 23 πρώτων ιδιομορφών ταλάντωσης της κατασκευής (βλ. §.5.1).

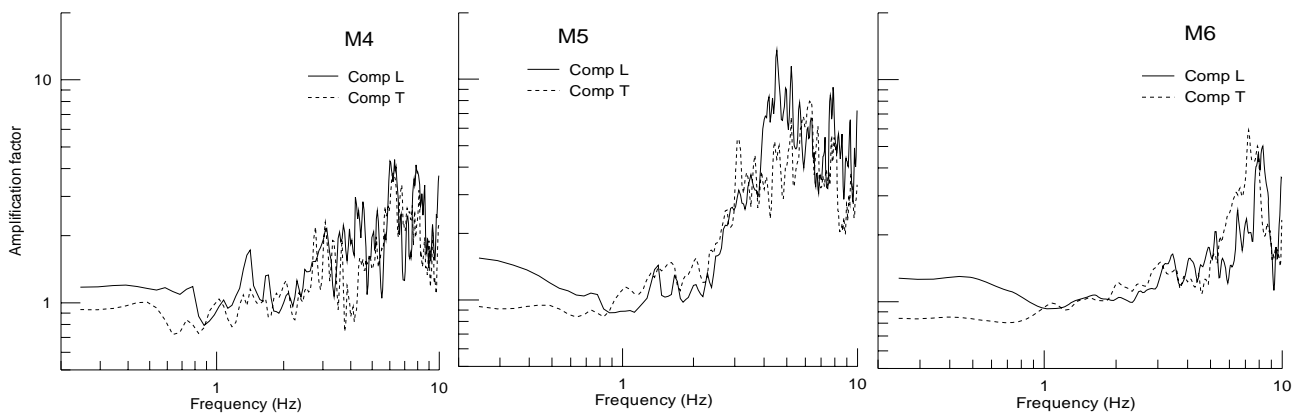
## 5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Για τη μελέτη των δυναμικών χαρακτηριστικών και της απόκρισης της γέφυρας, αναπτύχθηκε προσωμοίωμα πεπερασμένων στοιχείων 4346 βαθμών ελευθερίας (749 κόμβοι) με χρήση 194 στοιχείων δοκού και 554 στοιχείων κελύφους του προγράμματος ανάλυσης SAP2000. Η ιδιομορφική ανάλυση έδειξε ότι για τις πρώτες 23 ιδιομορφές (με τιμές από 2.764sec / 0.362Hz μέχρι 0.612sec / 1.632Hz), οι λόγοι των συγκεντρωτικών ενεργών μαζών είναι 90.6% για τη διαμήκη και 80.1% για την εγκάρσια διεύθυνση. Στο σχήμα 6 δίδονται ενδεικτικά η 1<sup>η</sup> (2.764sec / 0.362Hz), 2<sup>η</sup> (2.601sec / 0.385 Hz) και 10<sup>η</sup> (1.065sec / 0.939Hz) αναλυτική ιδιομορφή.

Για την αποτίμηση των δυναμικών χαρακτη-



Σχήμα 4. Φασματικοί λόγοι H/V στα M4 και M7  
Figure 4. H/V spectral ratios at M4 and M7



Σχήμα 5. Κλασσικοί φασματικοί λόγοι στις θέσεις M4, M5 και M6  
Figure 5. Standard spectral ratios at M4, M5 and M6 sites

ριστικών της γέφυρας από τις ενόργανες μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές της απόκρισης της ανωδομής στο σεισμό της 26/7/2001 (Πιν.1). Στο σχήμα 7 παρουσιάζονται οι μετασχηματισμοί Fourier (FFT) των καταγραφών του παραπάνω σεισμού στη θέση δύο αισθητήρων. Ο πρώτος (14-M5TNT, δεξ Σχ.2) καταγράφει τη διαμήκη απόκριση της βόρειας κορυφής του πυλώνα της Βοιωτικής ακτής. Ο δεύτερος (9-S2RNV, δεξ Σχ.2) καταγράφει την κατακόρυφη απόκριση του βόρειου τμήματος του καταστρώματος στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος. Παρατηρείται ότι και στις δύο θέσεις εμφανίζονται αποκρίσεις γύρω στα 0.4Hz (2.5sec). Η ίδια συχνότητα παρατηρείται επίσης και στις καταγραφές στη θέση 15-M6TNL στη βόρεια κορυφή του πυλώνα της Ευβοϊκής ακτής, καταδεικνύοντας μία ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των τμημάτων της ανωδομής διαμέσου των καλωδίων (Lekidis et al., 1999).

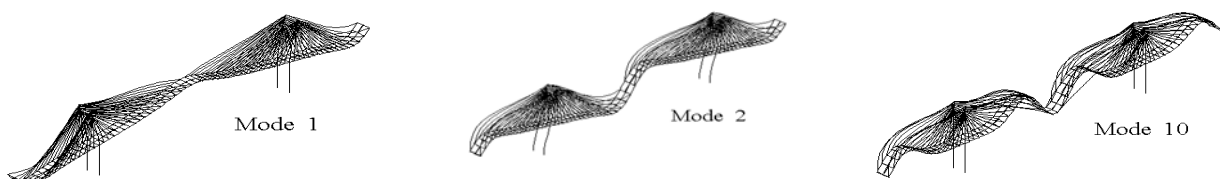
Από τη φασματική ανάλυση των καταγραφών είναι δυνατόν να προσδιορισθούν ιδιομορφές της γέφυρας που διεγέρθηκαν από τα σεισμικά συμβάντα. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι για το σεισμικό συμβάν της 26/7/2001 η καταγραφείσα απόκριση στα 0.4Hz αντιστοιχεί στην 1<sup>η</sup> αναλυτική ιδιομορφή των 0.362Hz, ενώ η διεγερθείσα ιδιοσυχνότητα στα 0.9Hz αντιστοιχεί στη 10<sup>η</sup> αναλυτική ιδιομορφή των 0.939 Hz. Στο σχήμα 8 παρουσιάζονται οι αναλυτικά και

πειραματικά προσδιορισμένες ιδιομορφές με καλή μεταξύ τους συμφωνία. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και από αντίστοιχη ανάλυση της σεισμικής διέγερσης της 7/9/1999 (Lekidis et al. 2005).

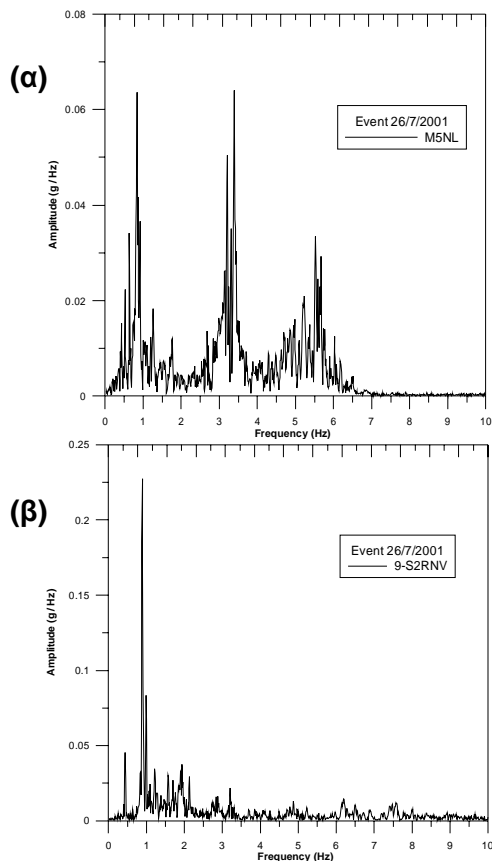
## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη της επιρροής της τοπικής γεωλογίας στις θέσεις θεμελίωσης των βάθρων της γέφυρας έγινε με την χρήση καταγραφών από το μόνιμο δίκτυο επιταχυνσιογράφων της. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής συσχετίστηκαν με τις διαθέσιμες γεωλογικές και γεωτεχνικές πληροφορίες και οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η επιρροή της τοπικής γεωλογίας στη σεισμική κίνηση αφορά κυρίως το βάθρο M5 όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ενισχύσεις για μεγαλύτερο εύρος περιόδων και ότι η επιρροή αυτή δεν φαίνεται να επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της σεισμικής απόκρισης της γέφυρας και αντιστρόφως, διότι η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης παρατηρείται σε συχνότητες μεγαλύτερες εκείνων των κυριοτέρων ιδιομορφών ταλάντωσης της κατασκευής.

Η αποτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της γέφυρας του Ευρίπου έγινε τόσο με τη χρήση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, όσο και από καταγραφές της απόκρισης της σε σεισμικές διεγέρσεις, με καλή συμφωνία μεταξύ των αναλυτικών και των πειραματικών

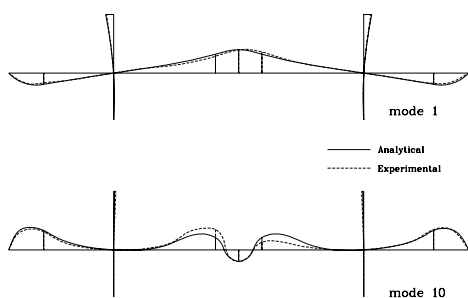


Σχήμα 6. Αναλυτικές ιδιομορφές της γέφυρας.  
Figure 6. Analytical eigenvalues of the bridge.



Σχήμα 7. Σεισμικό συμβάν της 26/7/2001: (α) FFT της απόκρισης της γέφυρας στη θέση 14-M5TNL (β) FFT της απόκρισης στη θέση 9-S2RNV.

Figure 7. Earthquake event of 26/7/2001 : (a) FFT of bridge response at sensor 14-M5TNL (b) FFT of bridge response at sensor 9-S2RNV.



Σχήμα 8. Σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών ιδιομορφών της γέφυρας  
Figure 8. Comparison between analytically and experimentally derived modes of the bridge

αποτελεσμάτων. Η ενοργάνωση σημαντικών έργων, όπως η γέφυρα του Ευρίπου παρέχει ιδιαίτερα χρήσιμες πληροφορίες για την πραγματική τους απόκριση σε δυναμικές διεγέρσεις και οδηγεί σε βαθύτερη κατανόηση των παραγόντων που την επηρεάζουν. Παράλληλα

επιτρέπουν τον έλεγχο της ορθότητας και τη βελτίωση αναλυτικών προσομοιωμάτων των έργων, επιτρέποντας έτσι μια πιο αξιόπιστη πρόβλεψη της απόκρισης τους σε μελλοντικούς σεισμούς.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aki K. (1993), "Local site effects on weak and strong ground motion", *Tectonophysics*, Vol. 218, pp. 93-111.
- Bard, P.Y. (1994), "Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues", *Proc. 10th Eur. Conf. Earthq. Eng.*, Vienna, Austria, Vol. 1, pp. 305-323.
- Faccioli, E. (1991), "Seismic amplification in the presence of geological and topographic irregularities", *Proc. 2nd Intern. Conf. On Recent Advances in Geotechnical Earthq. Engrg. and Soil Dynamics*, March 11-15, St. Louis, Missouri, S. Prakash (etidor), Univ. of Missouri-Rolle, Vol. 2, pp. 1779-1797.
- Chávez-García, F.J., Sanchez, L.R. and Hatzfeld, D. (1996), "Topographic site effects and HVSR. A comparison between observations and theory", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 86, pp. 1559-1575
- Γεωμηχανική ΕΠΕ (1985), "Γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα - Τόμος III", ΥΠΕΧΩΔΕ
- Lekidis, V.A., Karakostas, C.Z. and Talaslidis, D.G. (1999), "Instrumentation, Measurements and Numerical Analysis of bridges: an example of the cable-stayed bridge on Evripos Channel, Greece", *Proc. Advanced NATO Workshop on Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures*. M. Erdik et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, pp. 481-493.
- Lekidis, V., Tsakiri, M., Makra, K., Karakostas, C., Klimis, N., and Sous, I. (2005), "Evaluation of Dynamic Response and Local Soil Effects of the Evripos Cable-Stayed Bridge using Multi-sensor Monitoring Systems", *Engineering Geology*, Vol. 79, pp.43-59
- Μαρίνος, Π., Φυτρολάκης, Ν. και Βαϊναλής, Δ. (1994), "Η συμβολή της Τεχνικής Γεωλογίας στην κατασκευή της υψηλής καλωδιωτής γέφυρας της Χαλκίδας", *Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.*, τομ. 30, σελ. 351-360.