



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών

Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος

**Λίθινη Τοξωτή Γέφυρα Κλειδωνιάς**

**Μορφολογική Τεκμηρίωση και Διερεύνηση Συμπεριφοράς με  
Θεώρηση Εναλλακτικών Χαράξεων**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Μαρκεσίνης Αντώνης

Επιβλέπουσα: Βιντζηλαίου Ελισάβετ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Σύμβουλος: Γιαννέλος Χρήστος, Υπ. Δρ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2021



Copyright © Αντώνης Μαρκεσίνης, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Antonis Markesinis, 2021

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).





## Ευχαριστίες

Στο τέλος της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν σε αυτήν.

Αρχικά, ευχαριστώ την επιβλέπουσα της εργασίας, Καθηγήτρια Ελισάβετ Βιτζηλαίου, για τα σχόλια και τις διορθώσεις της. Επίσης, την ευχαριστώ για την διδασκαλία της στα μαθήματα του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Χρήστο Γιαννέλο, Υπ. Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, για τη βοήθεια και την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εργασίας. Τον ευχαριστώ επίσης για τον χρόνο που διέθεσε, για τις πολύτιμες συμβουλές του, για την υποστήριξη και για το επίπεδο γνώσεων που μου παρείχε.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς και την αδερφή μου για τη στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

*Αντώνης Μαρκεσίνης  
Ιούνιος, 2021*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφορά στις λίθινες τοξωτές γέφυρες και ειδικότερα στη γέφυρα της Κλειδωνιάς ή Βοϊδομάτη. Η γέφυρα της Κλειδωνιάς βρίσκεται στον Δήμο Κόνιτσας του Νομού Ιωαννίνων, κατασκευάστηκε το 1853 και το άνοιγμα του τόξου της είναι περίπου 21 μέτρα. Αποτελεί χαρακτηρισμένο μνημείο ως αντιπροσωπευτικό δείγμα της παραδοσιακής μηχανικής και της τέχνης της γεφυροποιίας των Ηπειρωτών μαστόρων, ενώ το ιδιαίτερο κάλλος της την καθιστά μία από τις πιο επισκέψιμες γέφυρες του Νομού. Η γέφυρα αποτελούσε αναπόσπαστο κομμάτι του οδικού δικτύου της εποχής, καθώς συνέδεε την Κόνιτσα με τα Γιάννενα, την πρωτεύουσα και διοικητικό κέντρο του πασαλικιού των Ιωαννίνων.

Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της ιδιαίτερης χάραξης του τόξου, η αναζήτηση πιθανών επιρροών σε αυτό από την γεφυροποιία στην Ευρώπη κατά τα χρόνια που προηγήθηκαν της κατασκευής της γέφυρας Κλειδωνιάς, καθώς και η μελέτη της δομοστατικής συμπεριφοράς της γέφυρας σε σύγκριση με τρεις εναλλακτικές χαράξεις του τόξου που θα μπορούσαν πιθανόν να έχουν επιλεγεί αντί της υφιστάμενης.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στα ιστορικά στοιχεία και τη θέση γεφύρωσης. Γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της γέφυρας και σημαντικών ιστορικών γεγονότων πριν και μετά την κατασκευή της, καθώς και της κοινωνικής κατάστασης που επικρατούσε κατά τον 19<sup>ο</sup> αιώνα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνθήκες στην περιοχή της γέφυρας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι σεισμολογικές συνθήκες μαζί με τους σημαντικότερους ιστορικούς σεισμούς μέχρι τις μέρες μας, καθώς και γεωλογικά και υδρολογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά στην περιγραφή της γέφυρας. Αρχικά γίνεται μια εκτενέστερη περιγραφή της γέφυρας και της παθολογίας που αυτή παρουσιάζει, ενώ στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση της χάραξης του τόξου της.

Στο τέταρτο κεφάλαιο επιχειρείται η ερμηνεία των μορφολογικών χαρακτηριστικών της γέφυρας. Αρχικά γίνεται συνοπτική αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει τα τόξα, καθώς και στη διαχρονική εξέλιξη των κανόνων σχεδιασμού. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον 18<sup>ο</sup> αιώνα και στη συμβολή του Γάλλου μηχανικού J.R.Perronet, του οποίου το έργο φαίνεται να έχει επηρεάσει τον σχεδιασμό της γέφυρας της Κλειδωνιάς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μνημεία συγκριτικής θεώρησης και μέσω αυτών γίνεται η επιλογή των τριών εναλλακτικών χαράξεων που θεωρούνται και προσομοιώνονται στη συνέχεια, μαζί με την πραγματική χάραξη, στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.

Το έκτο κεφάλαιο αφορά στη μεθοδολογία και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Κατ' αρχήν γίνεται αναφορά στη μέθοδο προσομοίωσης και την επιλογή των διαφόρων παραμέτρων αυτής, καθώς και στις στατικές και δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων, τα οποία παρουσιάζονται με συγκριτικό τρόπο μεταξύ των εναλλακτικών χαράξεων, ενώ στο τέλος της κάθε ανάλυσης παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων που εξάγονται από ολόκληρη την εργασία.

Στο παράρτημα που ακολουθεί περιέχονται φωτογραφίες και μετρήσεις από επίσκεψη που πραγματοποιήθηκε στο Νομό Ιωαννίνων, δύο γεωμετρικές μέθοδοι κατασκευής

καταβιβασμένων τόξων τριών κέντρων, καθώς και μια επιπλέον εναλλακτική προσομοίωσης που, εν τέλει, δεν χρησιμοποιήθηκε στα αποτελέσματα του κυρίως σώματος της εργασίας. Τέλος, συγκεντρώνεται η βιβλιογραφία της παρούσας εργασίας.

## ABSTRACT

The present master thesis refers to stone arch bridges and especially to that of Kleidonia or Voidomatis. The bridge of Kleidonia, located in the municipality of Konitsa, in the county of Ioannina, was built in 1853 and its arch span is approximately 21 meters. It has been characterized as a monument, representative of traditional bridge engineering of the masons of Epirus. The bridge was part of the road network of the era connecting the city of Konitsa with the city of Ioannina, the political, economic and administrative center of the region.

The goal of this thesis is the assessment of the arch's design, the investigation of the possible influence from Europe's bridge construction of the past years and the analysis of the behavior of the bridge under a variety of imposed loads while comparing it to another three alternative arch designs.

The first chapter refers to the historic documentation and to the location site of the bridge of Kleidonia. A brief presentation is made of the important events before and after its construction, as well as to the social situation that held place during the 19<sup>th</sup> century.

Chapter two presents the conditions of the broader area where the bridge is located. In particular, it refers to earthquake activity, as well as to hydrological and geological conditions of the area.

Chapter three makes an extensive presentation of the bridge and its pathology as well as investigates the arch's design.

The fourth chapter attempts a description of the bridge's morphological characteristics, beginning with a synopsis of the theoretical basis of arch construction as well as the diachronic evolution of design rules. Special emphasis is made to the 18<sup>th</sup> century and to the contribution of the French engineer J.R.Perronet whose work seems to have influenced the design of the Kleidonia Bridge.

The fifth chapter presents comparative monuments through which a selection of three alternative arch designs is made with each type to be modelled later on the finite elements programs.

The sixth chapter refers to the methodology and the presentation of the program's results. To begin with, reference is made to the modelling method selected and to the parameters used as well as to the static and dynamic analysis that are performed. In following, the results of the analysis are presented while comparing them to each one of the three alternative arch designs previously selected. At the end of each analysis, a synopsis of the conclusion is made.

The seventh chapter contains the conclusions drawn from the thesis.

Following, on-site photographs and measurements taken from the visit to the county of Ioannina are presented, as well as the presentation of an extra geometric arch design method referring to oval bridges of three centers.

Lastly, one finds the bibliography used for this thesis.



## Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	13
1 - Ιστορικά Στοιχεία - Θέση Γεφύρωσης.....	15
2 - Συνθήκες στην Περιοχή της Γέφυρας.....	19
2.1 - Σεισμολογικά Χαρακτηριστικά Ηπείρου .....	19
2.1.1 - Ιστορικοί σεισμοί της Ηπείρου.....	20
2.2 - Γεωλογικά Στοιχεία .....	24
2.3 - Υδρολογικά Στοιχεία .....	26
3 - Περιγραφή της Γέφυρας .....	29
3.1 - Γενική Περιγραφή .....	29
3.2 - Παθολογία.....	32
3.3 - Διερεύνηση Γεωμετρικής Χάραξης του Τόξου .....	34
3.3.1 - Μεθοδολογία γεωμετρικού σχεδιασμού.....	36
4 - Ερμηνεία Μορφολογικών Χαρακτηριστικών .....	37
4.1 - Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	37
4.2 – Κανόνες Σχεδιασμού κατά τον 18 <sup>ο</sup> αιώνα - Η Συμβολή του Perronet .....	48
4.3 - Συμπεράσματα.....	51
5 - Μνημεία Συγκριτικής Θεώρησης - Επιλογή Εναλλακτικών Χαράξεων.....	53
6 - Μεθοδολογία και Αποτελέσματα .....	59
6.1 - Φόρτιση με το Ίδιο Βάρος.....	62
6.2 - Προσθήκη των Κινητών Φορτίων.....	64
6.2.1 - Κινητό Φορτίο '1' .....	64
6.2.2 - Κινητό Φορτίο '2' .....	66
6.3 - Σεισμική Φόρτιση.....	68
6.3.1 - Ιδιομορφική Ανάλυση .....	68
6.3.2 - Δυναμική Φασματική Ανάλυση .....	70
6.3.3 - Ισοδύναμη Στατική Ανάλυση .....	71
6.4 - Αναλύσεις Χρονοϊστορίας.....	78
6.4.1 - Εγκάρσια σεισμική διεύθυνση.....	80
6.4.2 - Διερεύνηση επιρροής διαμήκους συνιστώσας.....	84
7 - Συμπεράσματα.....	87
Παράρτημα.....	89
Α. Επίσκεψη στις γέφυρες του Ν. Ιωαννίνων.....	89
Β. Γεωμετρική μέθοδος κατασκευής τόξου τριών κέντρων.....	94
Γ. Προσομοίωση του τόξου με γραμμικά στοιχεία.....	95

Δ. Σχέδια της γέφυρας της Κλειδωνιάς.....	96
Βιβλιογραφία .....	97



## Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εκπονείται στα πλαίσια απόκτησης του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης (Master of Science) του ΔΠΜΣ “Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών” του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ασχολείται με το θέμα των ιστορικών λίθινων τοξωτών γεφυρών και βασικό αντικείμενο της είναι η γέφυρα Κλειδωνιάς, η οποία αποτελεί μια από τις πρώτες προσπάθειες γεφύρωσης ανοίγματος με καταβιβασμένο τόξο στον Ελλαδικό χώρο και παράλληλα μια γέφυρα ιδιαίτερου κάλους.

Εκ πρώτης όψews, είναι φανερό ότι η γέφυρα της Κλειδωνιάς διαφέρει από τον “κλασικό” σχεδιασμό της ημικυκλικής χάραξης των τόξων που κατά κανόνα παρατηρείται στα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα και παλαιότερα. Η ιδιαίτερη χάραξη του τόξου που φαίνεται να ξεφεύγει από την πεπατημένη όσον αφορά στον σχεδιασμό, αποτέλεσε αρχικά το έναυσμα για την ενασχόληση με την συγκεκριμένη γέφυρα.

Αντικείμενο αυτής της εργασίας, πέραν της δομοστατικής συμπεριφοράς, είναι η διερεύνηση της χαράξεως του τόξου αλλά και του πλαισίου μέσα στο οποίο συνελήφθη, κατασκευάστηκε και λειτούργησε η προς μελέτη γέφυρα από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα οπότε και κατασκευάστηκε. Για τον σκοπό αυτό, αφιερώθηκε μεγάλο μέρος του διαθέσιμου χρόνου στην μελέτη και διερεύνηση τόσο των ιστορικών στοιχείων όσο και των συνθηκών στην ευρύτερη περιοχή της γέφυρας.

Ο προβληματισμός όσον αφορά στην “νεωτεριστική” χάραξη του τόξου μας οδηγεί σε μια προσπάθεια αναζήτησης πιθανών επιρροών αυτής στην Ευρώπη, και πιο συγκεκριμένα στην Γαλλία, όπου οι καταβιβασμένες μορφές τόξων φαίνεται να είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες ήδη από τον 18<sup>ο</sup> αιώνα. Η μελέτη των πρώτων κανόνων σχεδιασμού που κάνουν την εμφάνισή τους στις αρχές του 18<sup>ου</sup> αιώνα στην Ευρώπη και των χαράξεων που αυτοί αφορούν, αποτελεί μια προσπάθεια σύνδεσης των τεκταινόμενων σε αυτήν όσον αφορά στον τομέα της γεφυροποιίας με την γέφυρα της Κλειδωνιάς.

Στη συνέχεια, η θεώρηση της γέφυρας της Κλειδωνιάς ως μέρους ενός ευρύτερου συνόλου λίθινων παραδοσιακών γεφυρών του οποίου αποτελεί κομμάτι, οδηγεί στην διερεύνηση της δομοστατικής συμπεριφοράς της γέφυρας σε σύγκριση με εναλλακτικές χαράξεις που θα μπορούσαν πιθανόν να έχουν επιλεγεί αντί της υφιστάμενης. Μέσω των αναλύσεων που πραγματοποιούνται αναζητείται, πέραν της αισθητικής και ενδεχόμενη υπεροχή της ιδιαίτερης αυτής χάραξης σε στατικές και δυναμικές καταπονήσεις έναντι των εναλλακτικών και πιο διαδεδομένων χαράξεων που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή.



## 1 - Ιστορικά Στοιχεία - Θέση Γεφύρωσης

Η Κλειδωνιά είναι γεωργικό χωριό του Δήμου Κόνιτσας στον Νομό Ιωαννίνων, κοντά στον ποταμό Βοϊδομάτη, 15 περίπου χιλιόμετρα Νοτιοδυτικά της Κόνιτσας και 50 χιλιόμετρα Βόρεια των Ιωαννίνων (εικ.1.1). Οι κάτοικοι του σύγχρονου οικισμού της Κλειδωνιάς, παλαιότερη ονομασία Καλύβια, προέρχονται από την μετοίκηση των κατοίκων από το ορεινό παλιό χωριό Γλυτουνιαύσα ή Λιτονιάβιστα ή Κλειδωνιάβιστα (όνομα που διατηρήθηκε μέχρι το 1953). Σήμερα ο αρχικός οικισμός αναφέρεται ως Άνω ή Παλαιά Κλειδωνιά και βρίσκεται ψηλότερα στα ανατολικά του σημερινού οικισμού και σε απόσταση περίπου 8 χιλιομέτρων και σε υψόμετρο 880 μέτρων (εικ.1.2). Ο παλιός οικισμός παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον με την πλούσια ιστορία του και τα πολλά μεταβυζαντινά μνημεία του, καθώς μέσα ή γύρω από το χωριό σώζονται αρκετές βυζαντινές εκκλησίες και ξωκλήσια του 16<sup>ου</sup> αιώνα.

Η κοινότητα της Κλειδωνιάς το 1895 είχε 82 οικίες, πληθυσμό 138 άρρενες και 140 γυναίκες, μέχρι το 1940 είχε 60 κατοικίες και πληθυσμό 380 κατοίκους, στην απογραφή του 2001 είχε 207 κατοίκους (195 τα Καλύβια και 12 η Κλειδωνιά).

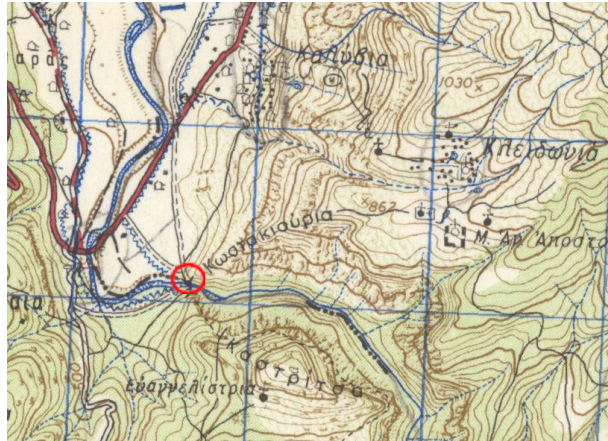


Εικόνες 1.1-1.2 - Αριστερά: Χάρτης του Νομού Ιωαννίνων, Δεξιά: Άνω Κλειδωνιά

Στις όχθες του Βοϊδομάτη, σε απόσταση 2 χιλιομέτρων από την Κλειδωνιά και σε υψόμετρο περίπου 450 μέτρων, βρίσκεται το λίθινο γεφύρι της Κλειδωνιάβιστας (ή Βοϊδομάτη), ένα από τα ομορφότερα μονότοξα ηπειρώτικα γεφύρια (εικ.1.3, 1.4, 1.8). Το άνοιγμα του τόξου του γεφυριού είναι περίπου 21 μέτρα, το ύψος του τόξου 8.50 μέτρα, ενώ το πλάτος του καταστρώματος είναι 2.65 μέτρα. Γεφυρώνει τον Βοϊδομάτη ποταμό, ένα από τα καθαρότερα ποτάμια της Ευρώπης, ενώ, κατά το παρελθόν, εξασφάλιζε την επικοινωνία του χωριού του Αγίου Μηνά με τον κάμπο της Κόνιτσας και όσους ήθελαν να κατευθυνθούν από την περιοχή της Κόνιτσας προς τα Γιάννενα, το σημαντικότερο οικονομικό κέντρο της Ηπείρου κατά την περίοδο της Τουρκοκρατίας. Η γέφυρα αποτελεί εξάλλου αναπόσπαστο κομμάτι του οδικού δικτύου της εποχής, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.7. Το πέτρινο γεφύρι της Κλειδωνιαβίστας παραμένει, έως και σήμερα, λειτουργικό και κοσμεί με την παρουσία του τη περιοχή. Αποτελεί συνήθη τουριστικό προορισμό και είναι η αφετηρία μονοπατιού, που χαράσσεται παράλληλα στην δεξιά όχθη του ποταμού και διασχίζει κατά μήκος τη χαράδρα του Βίκου, μια από τις ωραιότερες πεζοπορικές διαδρομές στην Ήπειρο.

Το 1844 ο εκ Μπάγιας (σήμερα Κήποι Ζαγορίου) Γ.Κ. Μπερζεγιάννης δαπάνησε για την κατασκευή γεφυριού στην ίδια θέση 19.000 γρόσια (Παπακώστα, 2002). Ωστόσο, η γέφυρα αυτή φαίνεται να κατέρρευσε σύντομα μετά την κατασκευή της από αιτία που δεν αναφέρεται στις βιβλιογραφικές πηγές. Μέχρι τότε αρκετοί άλλοι προσπάθησαν να

γεφυρώσουν το Βοϊδομάτη στο ίδιο το σημείο αλλά απέτυχαν, καθώς, όπως διαφαίνεται στο ταξιδιωτικό βιβλίο του F.-C.-H.-L. Rouqueville “Ταξίδι στην Ελλάδα”, στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα ο συγγραφέας διαβαίνει “μια μονότοξη γέφυρα, που έχει άνοιγμα πάνω από σαράντα πόδια και ύψος τριάντα από την επιφάνεια του νερού ως την κορυφή του τόξου” στην ίδια θέση. Το υφιστάμενο μονότοξο γεφύρι, η περιοχή του οποίου υπαγόταν διοικητικά στο πασαλίκι των Ιωαννίνων (εικ.1.6), κτίσθηκε το 1853 με δαπάνη 37.000 γροσίων του χαρεμιού του Μαλήκ Πασά, εγγόνου της αδερφής του Αλή Πασά, Χαϊνίτσας.

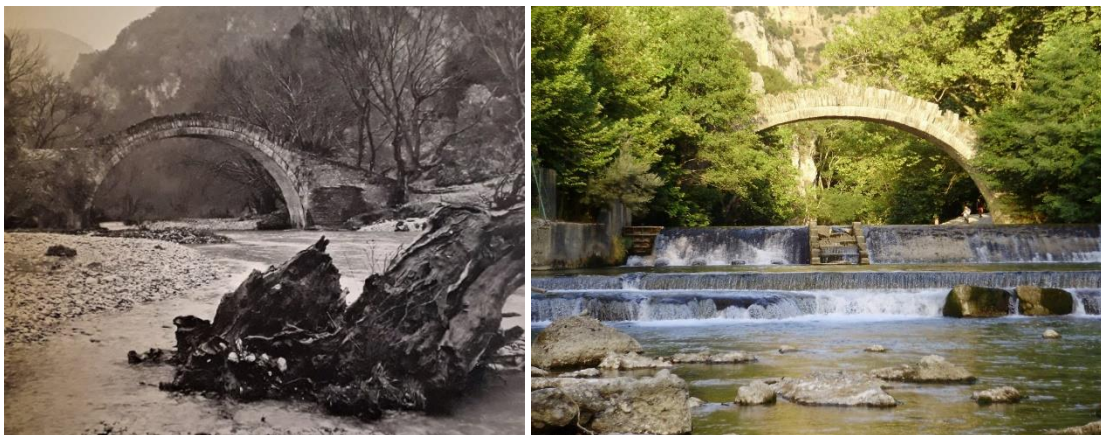


Εικόνα 1.3 - Χάρτης περιοχής της γέφυρας της Κλειδωνιάς

Το 1988 η υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων της Νομαρχίας Ιωαννίνων, σε απόσταση 18 μέτρων στα κατάντη της γέφυρας κατασκεύασε φράγμα, διαμόρφωσε ιχθυόσκαλα και αρδευτικό αύλακα από σκυρόδεμα και έγιναν επιχώσεις με βράχους στα κατάντη τη αριστερής όχθης (εικ.1.5).

Η γέφυρα της Κλειδωνιάς ή Βοϊδομάτη πήρε τη δεύτερη ονομασία της από τον ομόνυμο ποταμό. Οι κύριες πηγές του βρίσκονται κάτω από το χωριό Βίκος. Στην διαδρομή του δέχεται και άλλα υδάτινα ρεύματα που σχηματίζονται στις πλαγιές της Τύμφης ή προέρχονται από το Φαράγγι του Βίκου και τελικά συμβάλει στον Αώο κοντά στην Κόνιτσα. Η θερμοκρασία του νερού του ποταμού είναι πολύ χαμηλή ακόμη και τους καλοκαιρινούς μήνες.

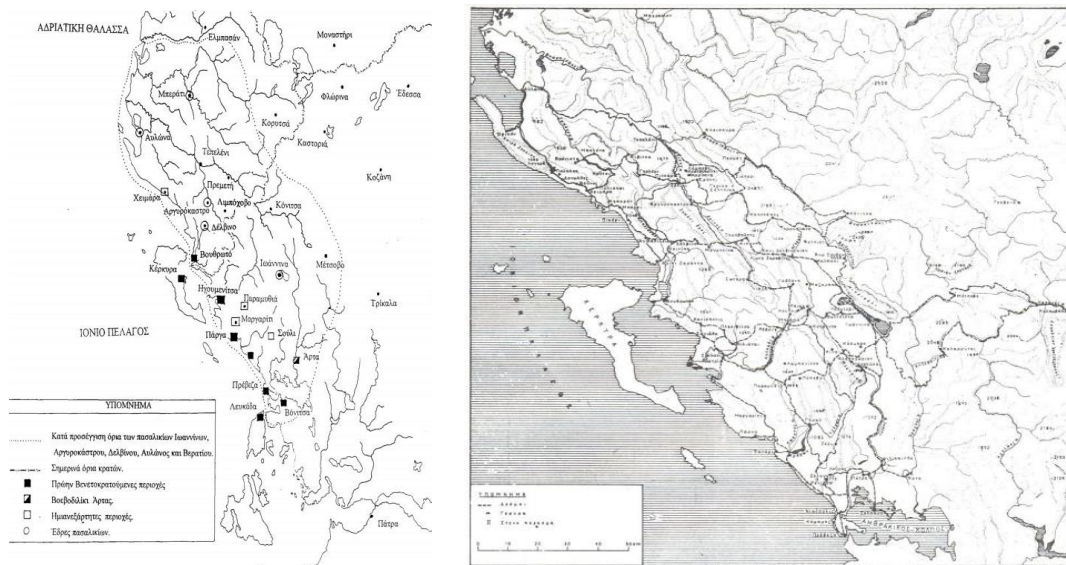
Το γεφύρι της Κλειδωνιάς έχει κηρυχτεί ιστορικό διατηρητέο μνημείο από το 1982 (ΥΑ ΥΠΠΕ/ΔΙΛΑΠ/Γ/1260/30653/2-7-1982 - ΦΕΚ 628/Β/26-8-1982, ΦΕΚ 189/2017).



Εικόνες 1.4-1.5 -Αριστερά: Η γέφυρα της Κλειδωνιάς (φωτογραφία της Heidi Mattenberger, 1958-1959), Δεξιά: Φράγμα στα κατάντη της γέφυρας



Η περιοχή της Ηπείρου τελούσε υπό Οθωμανική κατοχή έως το 1881, οπότε με την Συνθήκη του Βερολίνου η περιοχή της Άρτας προσαρτήθηκε στην Ελλάδα, ενώ μετά τους Βαλκανικούς πολέμους προσαρτήθηκε και η υπόλοιπη, συμπεριλαμβανομένης της ευρύτερης περιοχής της Κόνιτσας όπου βρίσκεται και η γέφυρα της Κλειδωνιάς. Ωστόσο, ήδη από τον 17ο αιώνα πολλοί έμποροι από τα Ιωάννινα, το Μέτσοβο, το Ζαγόρι και άλλες περιοχές, συνέβαλαν με ευεργεσίες στην πνευματική ανάκαμψη του τόπου, με την ανέγερση σχολείων και βιβλιοθηκών. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η Ήπειρος αποτέλεσε κοιτίδα της καλλιέργειας του Νεοελληνικού Διαφωτισμού (Φλώρος, 2005).



Εικόνες 1.6-1.7 - Αριστερά: Το πασαλίκι των Ιωαννίνων (1788-1822) (Σμύρης, 2004), Δεξιά: Το οδικό δίκτυο της Ηπείρου σύμφωνα με τις περιηγήσεις του Π. Ποταγού (1886)

Ο 19<sup>ος</sup> αιώνας ιδιαίτερα, αποτέλεσε περίοδο οικονομικής, πνευματικής και πολιτιστικής ακμής για την Ήπειρο. Σε αυτό συνέβαλλαν τόσο οι εμπορικές δραστηριότητες της περιοχής με την Ευρώπη και η υποστήριξη ξενιτεμένων Ηπειρωτών από την Βενετία στην τοπική κοινωνία, όσο και η ανάπτυξη της κτηνοτροφίας και η φήμη των προϊόντων της περιοχής, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τα βότανα του φαραγγιού του Βίκου, η φήμη των οποίων ήταν διαδεδομένη στην Δυτική Ευρώπη και στην Μικρά Ασία (Σιαμόπουλος, 2016).



Εικόνα 1.8 - Η γέφυρα της Κλειδωνιάς (φωτογραφία 14/5/2021)



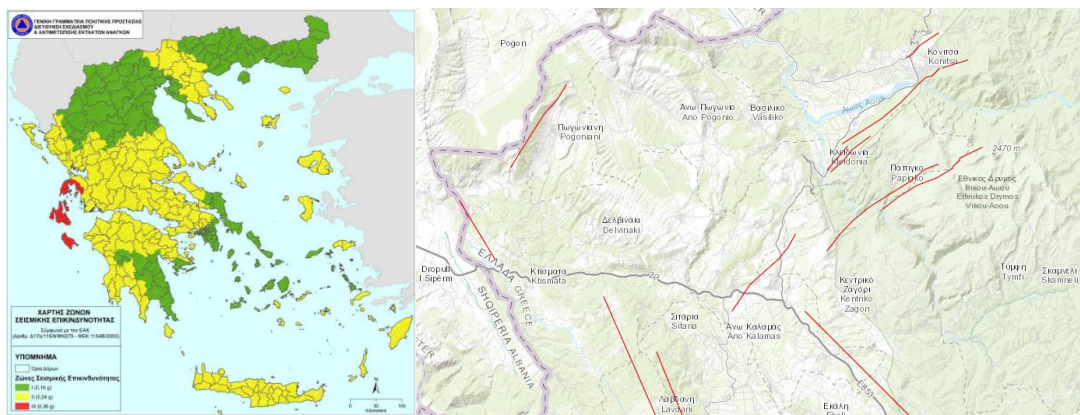
## 2 - Συνθήκες στην Περιοχή της Γέφυρας

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται τα σεισμολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής της γέφυρας της Κλειδωνιάς, καθώς και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του ποταμού Βοϊδομάτη, τον οποίο γεφυρώνει. Η μελέτη των συνθηκών στην περιοχή της γέφυρας αποτελεί προϋπόθεση για την αξιόπιστη διερεύνηση της συμπεριφοράς της γέφυρας από την κατασκευή της έως σήμερα.

### 2.1 - Σεισμολογικά Χαρακτηριστικά Ηπείρου

Η μελέτη του ιστορικού των σεισμικών γεγονότων σε μια περιοχή αποτελεί σημαντική παράμετρο για την ερμηνεία της ιστορικής και της παρούσας παθολογίας του μνημείου, καθώς και την ποιοτική αποτίμηση της ενδεχόμενης επιρροής κατασκευαστικών φάσεων και προηγούμενων επεμβάσεων στην συμπεριφορά της γέφυρας. Δεδομένου του περιορισμένου χρονικού διαστήματος για το οποίο διατίθενται καταγραφές σεισμικών γεγονότων, αποκτούν ιδιαίτερη σημασία τα στοιχεία τα οποία αφορούν ιστορικούς σεισμούς.

Από ιστορικά στοιχεία και σύγχρονες ενόργανες καταγραφές προκύπτει ότι το Ελληνικό Τόξο (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989) είναι μία από τις πλέον ενεργές περιοχές στο κόσμο και παρουσιάζει μεγάλη σεισμικότητα, καθώς βρίσκεται στο όριο σύγκλισης δυο λιθοσφαιρικών πλακών, της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής. Η σεισμικότητα της δυτικής Ελλάδος επηρεάζεται από το Ελληνικό τόξο. Η συχνή ενεργοποίηση του δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης της Κεφαλονιάς - Λευκάδας προκαλεί έντονες σεισμικές δονήσεις και στο μεγαλύτερο τμήμα της Ηπείρου (Ντόκος, 2017). Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ2000, όπως αυτός τροποποιήθηκε το 2003), η Ήπειρος υπάγεται εν μέρει στην ζώνη I και εν μέρει στην ζώνη σεισμικότητας II (εικ.2.1). Η περιοχή στην οποία ευρίσκεται η γέφυρα της Κλειδωνιάς (στο βορειότερο τρίτο της Ηπείρου), υπάγεται σε ζώνη σεισμικότητας I, για την οποία η μέγιστη αναμενόμενη εδαφική επιτάχυνση για τον σχεδιασμό, λαμβάνεται ίση με 0,16g (με πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 έτη).



Εικόνες 2.1-2.2 - Αριστερά: Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδας (Χάρτης Πολιτικής Προστασίας), Δεξιά: Ενεργά ρήγματα περιοχής ενδιαφέροντος (Χάρτης Γεωδυναμικού Ινστιτούτου)

Παρά ταύτα, στην εξεταζόμενη περιοχή εντοπίζονται ρήγματα τα οποία θεωρούνται ενεργά (εικ.2.2) και τα οποία ενδέχεται να δώσουν σεισμούς στο μέλλον. Τα κυριότερα και πλησιέστερα προς την περιοχή ενεργά ρήγματα, σύμφωνα με το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, είναι αυτά της Κόνιτσας, του Παπίγκου, της Αστράκας, των Δολιανών, του Κασσιδιάρη και του Μιτσικελίου.

### 2.1.1 - Ιστορικοί σεισμοί της Ηπείρου

Στην περιοχή της Ηπείρου έχει καταγραφεί σημαντικός αριθμός σεισμών μεγέθους έως και 6,4 βαθμών της κλίμακας Richter ( $M = 6,4$ ) για τη χρονική περίοδο 1964-2016. Εκτός όμως από τους πρόσφατους σεισμούς, αναφέρονται και αρκετοί προγενέστεροι σεισμοί μεγέθους μεγαλύτερου των 6 βαθμών της κλίμακας Richter, οι οποίοι σημειώθηκαν από τους ιστορικούς χρόνους μέχρι το 1964 (εικ.2.3). Αν και πολλοί από αυτούς βρίσκονται εκτός της περιοχής της Ηπείρου, εντούτοις αναφέρονται επειδή το μέγεθος τους ήταν ικανό ώστε να γίνουν έντονα αισθητοί στην περιοχή, προκαλώντας ορισμένες φορές και καταστροφές. Πληροφορίες για τους σεισμούς αυτούς αντλήθηκαν κυρίως από τους κατάλογους που παρατίθενται στα ακόλουθα βιβλία:

- Ισόσειστες από τον Άτλαντα του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του ΑΠΘ (Parazachos et al., 1982)
- Οι σεισμοί της Ελλάδος (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003)
- Atlas of isoseismal maps for strong shallow earthquakes in Greece and surrounding area (426BC - 1995; Parazachos et al., 1997).

Καθ' ότι δεν υπάρχουν μαρτυρίες ή ιδιαίτερες ενδείξεις για βλάβες στην γέφυρα της Κλειδωνιάς λόγω σεισμικών δονήσεων, τα παρακάτω ιστορικά στοιχεία δεν αξιοποιούνται στη συνέχεια της εργασίας. Για εγκυκλοπαιδικούς και ιστορικούς λόγους θα αναφερθούν στη συνέχεια αναλυτικότερα μόνο οι ιστορικοί σεισμοί που συνέβησαν από το 1853 και έπειτα, δηλαδή ύστερα από την κατασκευή της γέφυρας της Κλειδωνιάς. Το σύνολο των σεισμών, μεγέθους μεγαλύτερου των 6 Richter από τους ιστορικούς χρόνους και έπειτα, παρατίθεται στον χάρτη που ακολουθεί στο τέλος της παραγράφου (εικόνα 2.3).

Οι σεισμοί αυτοί, από το 1853 και ύστερα, είναι κάτωθι:

Στο Δέλβινο της Αλβανίας ( $39.8^{\circ}\text{N}$ ,  $20.2^{\circ}\text{E}$ ), στις 30 Ιουλίου του 1854, σημειώθηκε πολύ ισχυρός σεισμός, μεγέθους 6,5 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VII βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003), από τον οποίο προκλήθηκαν καταστροφές του Δελβίνου, του Σουλίου και ερήμωση των ενδιάμεσων περιοχών, προκαλώντας τραυματισμό και θάνατο πολλών ανθρώπων.

Στις 5 Απριλίου του 1858, ένας καταστροφικός σεισμός, μεγέθους 6,5 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VIII βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003; Karnik 1971) έπληξε τα Ιωάννινα.

Στις 4 Δεκεμβρίου 1866, στην περιοχή του Αργυροκάστρου της Αλβανίας, σημειώθηκε πολύ καταστροφική σεισμική δόνηση, μεγέθους 6,3 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης IX βαθμών της κλίμακας Mercalli, προκαλώντας ζημιές στις περιοχές μεταξύ της Χειμάρρας και της Αυλώνας. Ακολούθησαν μετασεισμικές δονήσεις για διάστημα μεγαλύτερο των εννέα μηνών, ενώ ο σεισμός έγινε ιδιαίτερα αντιληπτός και από τους κατοίκους των Ιωαννίνων. (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003; Karnik, 1971).

Στο χρονικό διάστημα των μετασεισμών του Αργυροκάστρου του 1866, στις 27 Ιανουάριου του 1867, κοντά στην πόλη των Ιωαννίνων ( $39.6^{\circ}\text{N}$ ,  $20.8^{\circ}\text{E}$ ), σημειώθηκε σεισμός, μεγάλης διάρκειας, μεγέθους 6,2 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VIII βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003). Σύμφωνα με τον Karnik (1971) κατάστρεψε για ένατη φορά την πόλη των Ιωαννίνων, ενώ ο σεισμός αυτός έγινε έντονα αισθητός έως τις περιοχές Αργυρόκαστρο και Αυλώνα (Michailovic, 1951).



Στη βόρεια Κέρκυρα, στις 9 Απριλίου του 1871, σημειωθήκαν δύο πολύ ισχυροί σεισμοί, μεγέθους 6,0 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VII βαθμών της κλίμακας Mercalli, από τους οποίους προκλήθηκαν μικρές ζημιές στο νησί και περισσότερο κοντά στα ορεινά χωριά Παρά και Στρογγυλή (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003; Karnik, 1971).

Ένα χρόνο αργότερα (11 Φεβρουαρίου του 1872), απέναντι από την Κέρκυρα, στην περιοχή της Σαγιάδας Θεσπρωτίας (39.7°N, 20.2°E), εκδηλώθηκε σεισμική δόνηση, μεγέθους 6,1 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης IX βαθμών της κλίμακας Mercalli, πολύ καταστροφική. Οι μετασεισμοί διήρκησαν περισσότερο από ένα χρόνο (Μάρτιο του 1873; Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003).

Στις 27 Ιουνίου του 1891, στην περιοχή του Μύτικα στη Πρέβεζας έγινε πολύ ισχυρός σεισμός, μεγέθους 6 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VII βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003), από τον οποίο προκλήθηκαν εκτεταμένες ζημιές στην περιοχή της Πρέβεζας και καταστράφηκαν κτίρια, ενώ ο σεισμός έγινε αισθητός μέχρι την Πάλαιρο.

Κοντά στην περιοχή του Ζερβοχωριού (Δραγουμή) Παραμυθιάς, στις 14 Μαΐου του 1895, σημειώθηκε εξαιρετικά καταστροφικός σεισμός, μεγέθους 6,3 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης X βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003). Από καταγεγραμμένα στοιχεία, για δώδεκα συνολικά γειτονικά χωριά, προκύπτουν 83 θάνατοι, αρκετοί τραυματισμοί, καταστροφές 293 σπιτιών, 5 εκκλησιών, ενός σχολείου και μεγάλος αριθμός υλικών ζημιών. Ο σεισμός έγινε αισθητός σε μία μεγάλη ακτίνα, χαρακτηριστικά, αναφέρεται ότι σημειωθήκαν ζημιές στους Φιλιάτες, τα Ιωάννινα και τη Ζάκυνθο.

Στη Δίβρη (Divre) της Αλβανίας, καταγράφηκε πολύ καταστροφικός σεισμός, μεγέθους 6,2 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης IX βαθμών της κλίμακας Mercalli, στις 17 Ιανουαρίου του 1897, μετά τον οποίο ακλούθησαν αρκετοί μετασεισμοί. Στην ομώνυμη πόλη, μαρτυρίες αναφέρουν 4 θανάτους ανθρώπων και 37 τραυματισμούς καθώς και καταστροφές σε 180 οικίες (ολική κατάρρευση των 70 (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003). Αυτός ο σεισμός ήταν ισχυρός σε πολλά χωριά της Ηπείρου και της Αλβανίας.

Στις 31 Ιουλίου του 1898 (ώρα 05:40), στην περιοχή της Δραγοψάς, Ιωαννίνων, έγινε πολύ ισχυρός σεισμός μεγέθους 6,3 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VIII βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003; Karnik, 1971), τον οποίο επακολούθησαν μετασεισμοί για περίπου τρεις μήνες, με μεγαλύτερο αυτών, του μεσημεριού της ίδιας μέρας. Στην πόλη των Ιωαννίνων καταγράφηκαν ζημιές σε πολλά κτίρια και καταστράφηκαν οικοδομές, σκορπίζοντας τον πανικό στους κατοίκους.

Στο Ιόνιο, στα ανοιχτά του Γαΐου, στους Παξούς, έγινε πολύ ισχυρός σεισμός στις 19 Αυγούστου του 1915, με μέγεθος 6,1 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VII βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003), από τον οποίο προκλήθηκαν βλάβες σε σπίτια των Παξών, κυρίως ρωγμές σε τοίχους. Οι κάτοικοι της Κέρκυρας άκουσαν θόρυβο πριν το σεισμό, ενώ οι δονήσεις έγιναν αντιληπτές μέχρι την Άρτα, τη Ναύπακτο και το Αργοστόλι.

Στις 23 Μαΐου του 1917, στα ανοιχτά (5 miles) του Μύτικα της Πρέβεζας έγινε ισχυρός σεισμός μεγέθους 6,1 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VI+ βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003), τον οποίο διαδέχτηκαν αρκετοί μετασεισμοί.

Στις 22 Δεκεμβρίου του 1919, στο Λεσκοβίκι (Leschovitz) της Αλβανίας, κοντά στην περιοχή της Κόνιτσας, έγινε πολύ καταστροφικός σεισμός, μεγέθους 6,3 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VIII+ βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003). Η μετασεισμική δράση διήρκησε ολόκληρο το Δεκέμβριο και ο μεγαλύτερος μετασεισμός ήταν μεγέθους 4,9 Richter μερικά λεπτά μετά τον κύριο. Ο σεισμός ήταν ισχυρός και στην Ελλάδα, καθώς προκάλεσε ζημιές σε 6 σπίτια της Κόνιτσας.

Κοντά στο χωριό Σαρδινία, δίπλα στην πόλη της Αμφιλοχίας, στις 13 Σεπτεμβρίου του 1921 έγινε καταστροφικός σεισμός, μεγέθους 6 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VIII βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003), ακολούθησαν μετασεισμοί, με τον ισχυρότερο αυτών, να έχει μέγεθος 5,4 βαθμών της κλίμακας Richter (14-09-1921. Ο σεισμός έγινε αισθητός στο μεγαλύτερο μέρος της Ηπείρου, των Ιονίων Νήσων, της δυτικής Στερεάς Ελλάδος και μέρους της Θεσσαλίας έως και το Βόλο.

Στο χωριό Πολένα της Μπεράτης της Αλβανίας, στις 26 Μαΐου του 1960, έγινε καταστροφικός έως κατά τόπους πολύ καταστροφικός σεισμός μεγέθους 6,5 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VIII+ βαθμών της Κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003). Ο σεισμός ήταν καταστροφικός βόρεια του ποταμού Οσούμι, όπου προκάλεσε το θάνατο 9 ανθρώπων, τον τραυματισμό 96 και σοβαρές ζημιές σε 595 κατοικίες των περιοχών Πολένας και Κορυτσάς. Στον Ελλαδικό χώρο έγινε ιδιαίτερως αντιληπτός στις περιοχές των Ιωαννίνων, της Καστοριάς, της Κοζάνης και της Κέρκυρας.

Στις 29 Οκτωβρίου του 1966, δίπλα στην Κατούνα της Αιτωλοακαρνανίας, εκδηλώθηκε καταστροφικός σεισμός με επίκεντρο στην περιοχή του Αμβρακικού Κόλπου, μεγέθους 6 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VIII βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος κ.ά., 1982; Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003). Οι μεγαλύτερες εντάσεις καταγραφθήκαν στις περιοχές της Κατούνας (VIII) και των Φυτειών (VII) Ακαρνανίας (Papazachos et al., 1982).

Την 1η Μαΐου του 1967 στην περιοχή της Άρτας, κοντά στα Θεοδώριανα (Δροσοπηγή), έγινε πολύ καταστροφικός σεισμός μεγέθους, 6,4 βαθμών της κλίμακας Richter και έντασης IX βαθμών της κλίμακας Mercalli (Παπαζάχος κ.ά., 1982; Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003), πλήττοντας κυρίως τις περιοχές Άρτας και Ιωαννίνων. Σύμφωνα με δημοσιεύματα, 9 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους και 56 τραυματίστηκαν, ενώ με βάση το μετασεισμικό έλεγχο κτιρίων, 10790 κτίρια υπέστησαν βλάβες (940 σπίτια καταστράφηκαν, 2.567 υπέστησαν μη επισκευάσιμες βλάβες, 2.674 σοβαρές και 4.609 ελαφρότερες).

Στις 16 Ιουνίου του 1990 (ώρα 02:16), στην περιοχή της Πρέβεζας (39.10°N, 20.70°E), εκδηλώθηκε σεισμική δόνηση, μεγέθους 6 βαθμών της κλίμακας Richter (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1999, 2003; NEIC 1990), που έγινε αντιληπτή σε πολλές περιοχές της Ηπείρου και της Κέρκυρας. Από το σεισμό προκλήθηκαν ζημιές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλοί σεισμοί που έγιναν στην περιοχή της Λευκάδας ήταν αισθητοί στο νοτιοδυτικό τμήμα της Ηπείρου και στην ευρύτερη περιοχή της. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιοι από αυτούς (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1989, 1999, 2003; Ambraseys και Finkel 1999):

- Στις 28 Δεκεμβρίου του 1869, μεγέθους 6,6 Richter και
- Στις 27 Νοεμβρίου του 1914, μεγέθους 6,7 Richter.

Τέλος, στις 26 Ιουλίου του 1996, στην περιοχή της Κόνιτσας έγινε πολύ ισχυρός σεισμός, μεγέθους 5,7 βαθμών της κλίμακας Richter και σεισμικής έντασης VIII βαθμών της κλίμακας



## 2.2 - Γεωλογικά Στοιχεία

Η περιοχή της γέφυρα της Κλειδωνιάς ανήκει στο γεωπάρκο Αώου-Βοϊδομάτη. Η ευρύτερη περιοχή του γεωπάρκου (προστατευόμενη περιοχή ιδιαίτερης γεωλογικής σημασίας, σπανιότητας και κάλλους) καταλαμβάνει το βορειοδυτικό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Ιωαννίνων στην Περιφέρεια Ηπείρου και πιο συγκεκριμένα το μεγαλύτερο μέρος των Δήμων Ζαγορίου και Κόνιτσας. Στον χώρο κυριαρχούν τα ψηλά βουνά της Βόρειας Πίνδου: η Τύμφη, ο Σμόλικας, η Τραπεζίτσα και η Νεμέρτσικα, καθώς και άλλα μικρότερα. Τα ποτάμια της περιοχής ανήκουν σχεδόν εξ ολοκλήρου στην λεκάνη απορροής του Αώου και εκτός από αυτόν περιλαμβάνουν τον Βοϊδομάτη και τον Σαραντάπορο. Όλα τα βουνά της περιοχής του έργου έχουν συμπεριληφθεί, χάρη στη μεγάλη τους οικολογική και αισθητική τους αξία, στο δίκτυο των προστατευόμενων περιοχών Natura 2000 (εικ2.8). Εδώ βρίσκεται ένα μεγάλο μέρος του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου και ο Εθνικός Δρυμός Βίκου- Αώου (Λεονταρίτης, 2014).

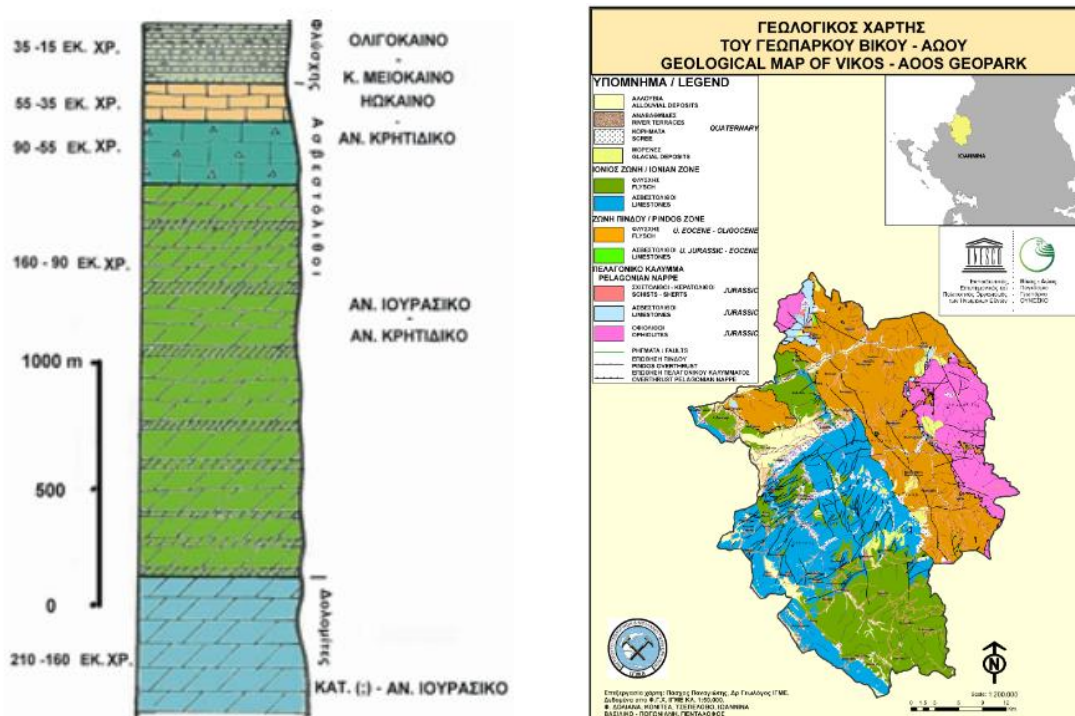
Η εκτεταμένη υδρολογική λεκάνη του ποταμού Βοϊδομάτη αποκαλύπτει σήμερα ένα υψηλό καρστικό πεδίο, το οποίο ήταν καλυμμένο κατά διαστήματα από παγετώνες στη διάρκεια του Πλειστοκαίνου (γεωλογική περίοδος που περιλαμβάνει τη χρονική περίοδο 2.588.000 με 11.700 χρόνια περίπου πριν). Τα εναλλασσόμενα παγετώδη και μεσοπαγετώδη περιβάλλοντα και οι γεωδυναμικές διεργασίες που προκάλεσαν γρήγορες ανοδικές κινήσεις, σε συνδυασμό με τα τεκτονοκαρστικά φαινόμενα, δημιούργησαν ευνοϊκές συνθήκες έντονης διάβρωσης. Οι τεράστιες ποσότητες νερού που απελευθερώνονται, ακολουθώντας διαδρομές μέσα από ασυνέχειες που προκάλεσαν τα ρήγματα, λάξευσαν βαθιά τους ασβεστολιθικούς όγκους, δίνοντας στο ανάγλυφο τη σημερινή του μορφή. Τα βαθιά φαράγγια αποκάλυψαν τη στρωματογραφική στήλη των πετρωμάτων (εικ2.4) που συνιστούν τη γεωλογική δομή της περιοχής. Αγναντεύοντας ή και προσεγγίζοντας τα φαράγγια του Βίκου ή του Αώου, μπορούμε να δούμε σε φυσική κλίμακα την αλληλουχία των ασβεστόλιθων που δημιουργήθηκαν πριν από εκατομμύρια χρόνια σε μια βαθιά θάλασσα και τώρα, μετά από σύνθετες γεωλογικές διεργασίες, βρίσκονται σε υψόμετρα που αγγίζουν τα 2.400 μέτρα (περιοδικό ΙΓΜΕ, 2009).

Η γεωλογική δομή της περιοχής συγκροτείται από ιζηματογενή πετρώματα που ανήκουν κυρίως στη γεωτεκτονική Ιόνιο ζώνη και σε μικρότερο βαθμό στη γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου. Στην Ιόνια ζώνη, τα αρχαιότερα των πετρωμάτων είναι τα ιζηματογενή πετρώματα, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι χρώματος σκούρου γκρι, άστρωτοι, ογκώδεις και συμπαγείς. Τα πετρώματα αυτά μπορούμε να τα παρατηρήσουμε στον πυθμένα του φαραγγιού του Αώου. Η ηλικία τους, η οποία προσδιορίστηκε από την παρουσία θαλάσσιων απολιθωμάτων μέσα σ' αυτά, είναι το Κατώτερο Ιουρασικό (200 εκ. χρόνια). Πάνω από αυτά απαντούν ασβεστόλιθοι πάλι, αλλά διαφορετικοί από τους προηγούμενους. Είναι οι ασβεστόλιθοι Βίγλας, πάχους 800 μ., δολομιτικοί στη βάση τους, με χρώμα σκούρο γκρι και με φακούς μαύρων κερατολίθων. Η ηλικία τους είναι Ανώτερο Ιουρασικό-Κατώτερο Κρητιδικό (160-100 εκ. χρόνια). Ακολουθούν παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι, μικρολατυποπαγείς πάχους 200-250 μ., Άνω Κρητιδικής ηλικίας (80 εκ. χρόνια) και ασβεστόλιθοι Ηωκαινικής ηλικίας (50-40 εκ. χρόνια) πάχους 250 μ. Τη γεωλογική δομή συμπληρώνουν από πάνω κλαστικές αποθέσεις του φλύσχη (άνωτερο Ηώκαινο-Ακουιτάνιο, 35-20 εκ. χρόνια) που αποτελείται από εναλλαγή αργιλικών και ψαμμιτικών στρώσεων με κατά τόπους παρεμβολές κροκαλοπαγών (εικόνα 2.4). Οι νεότεροι σχηματισμοί, τεταρτογενούς ηλικίας (2-1.8 εκ. χρόνια από σήμερα) είναι εκτεταμένα πλευρικά κορήματα στις πλαγιές των βουνών, κώνοι κορημάτων, παγετώδεις αποθέσεις, ποτάμιες αναβαθμίδες και σύγχρονες προσχώσεις των ποταμών. Σε μικρότερο

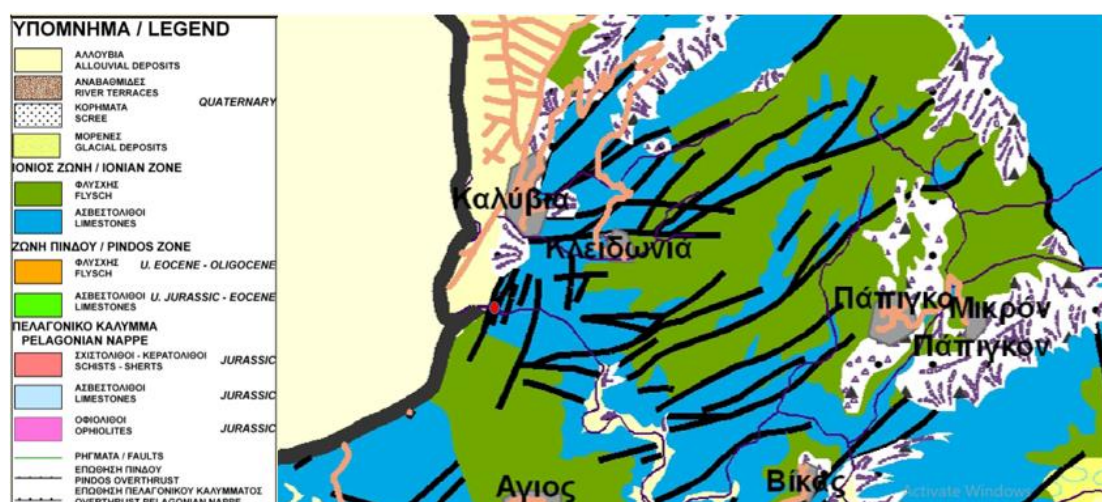


βαθμό συμμετέχουν σχηματισμοί του φλύσχη της ζώνης της Πίνδου Ηωκαινικής ηλικίας, με ανάλογη λιθολογία με το φλύσχη της Ιονίου (περιοδικό ΙΓΜΕ, 2009).

Πριν από 20 εκ. χρόνια, λόγω ισχυρών συμπιεστικών τάσεων που επικρατούσαν τότε στον Ελλαδικό χώρο, αποτέλεσμα της σύγκρουσης της Αφρικανικής με την Ευρασιατική πλάκα, η ζώνη της Πίνδου επωθείται στην Ιόνια. Τα ιζήματα παραμορφώνονται και δημιουργούνται πτυχές και ρήγματα (περιοδικό ΙΓΜΕ, 2009).



Εικόνες 2.4-2.5 - Αριστερά: Στρωματογραφική στήλη, Δεξιά: Γεωλογικός χάρτης γεωπάρκου Βίκου-Αώου (πηγή: ΙΓΜΕ)



Εικόνα 2.6 - Λεπτομέρεια γεωλογικού χάρτη γεωπάρκου Βίκου-Αώου στην περιοχή της γέφυρας της Κλειδωνιάς (πηγή: ΙΓΜΕ)

Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν δηλαδή η στάθμη του Βοϊδομάτη είναι χαμηλή, είναι ορατή η έδραση του Βόρειου βάρθρου της γέφυρας της Κλειδωνιάς σε τέμαχος βράχου και συγκεκριμένα ασβεστόλιθου, σύμφωνα με τον παραπάνω γεωλογικό χάρτη (εικ.2.6-2.7).



Εικόνα 2.7 - Έδραση βόρειου βάθρου σε βράχο (Γιαννέλος Χ., 2019)

### 2.3 - Υδρολογικά Στοιχεία

Η γέφυρα της Κλειδωνιάς, όπως αναφέρθηκε, γεφυρώνει τον ποταμό Βοϊδομάτη, η ονομασία του οποίου προέρχεται από τις σλαβικές λέξεις voda (= νερό) και mati (= πηγή). Ο ποταμός έχει συνολικό μήκος μεγαλύτερο των 30 χιλιομέτρων, 12 εκ των οποίων αποτελούν το φαράγγι του Βίκου, ενώ οι κύριες πηγές του βρίσκονται κάτω από το χωριό Βίκος (εικ.2.9). Έτσι ο ποταμός χωρίζεται στο άνω και κάτω τμήμα, ανάντη και κατάντη των κύριων πηγών αντίστοιχα.

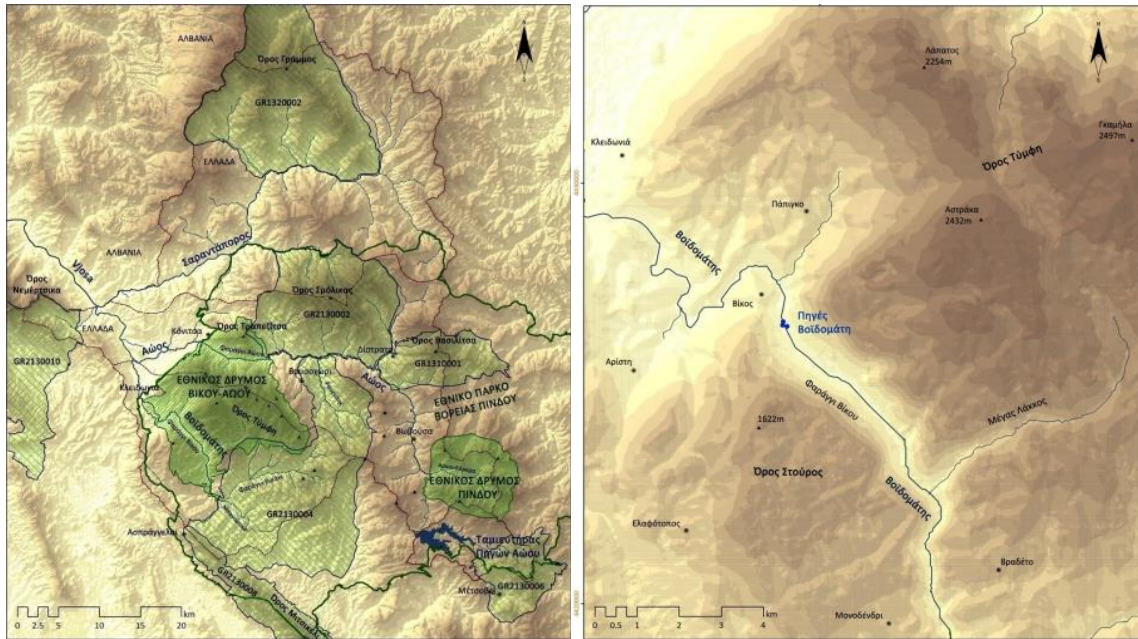
Το άνω τμήμα χαρακτηρίζεται από εποχιακή επιφανειακή ροή που είναι μόνιμη κατά την περίοδο Νοεμβρίου-Ιουνίου και οφείλεται αφενός στην τήξη του χιονιού που είναι συσσωρευμένο στον ορεινό όγκο της Τύμφης και αφετέρου στις υψηλές βροχοπτώσεις. Κατά τους υπόλοιπους μήνες, η κοίτη είναι ξερή και η όποια επιφανειακή ροή οφείλεται στην επιφανειακή απορροή της αντίστοιχης λεκάνης όταν σημειώνονται βροχοπτώσεις. Αυτό εν μέρει οφείλεται στην γεωλογία της περιοχής, η οποία χαρακτηρίζεται από ένα έντονο και πολύπλοκο καρστικό σύστημα. Η κυριαρχία των υδατοπερατών ασβεστόλιθων της περιοχής έχει ως αποτέλεσμα την διείσδυση νερού σε βαθιά στρώματα. Το νερό αυτό είτε διοχετεύεται στους υπόγειους υδροφορείς, είτε εκφορτίζεται μέσω επιφανειακών πηγών εκεί που συναντά αδιαπέραστα στρώματα και προκαλείται ανακοπή της διείσδυσής του. Σε αυτό το συμπέρασμα οδηγούν τα πολυάριθμα σπηλαιοβάραθρα (σπήλαιο Προβατίνας, -408m, Χάσμα του Έπους -451m, Γκαϊλότρυπα -155m, Τρύπα του Ορνίου -584m, που είναι το βαθύτερο βάραθρο στις Ηπειρωτική Ελλάδα) (Λεονταρίτης, 2014).

Η υπολεκάνη απορροής του άνω τμήματος συμπεριλαμβάνει το όρος Στούρος και το μεγαλύτερο μέρος της Τύμφης στα βόρεια, τις ανατολικές πλαγιές του βόρειου τμήματος του όρους Μιτσικέλι (1810m) στα δυτικά, τα όρη Κούστα (1729m) και Κοζάκος (1622m) στα ανατολικά και ένα μεγάλο τμήμα του κεντρικού Ζαγορίου κεντρικά και νότια. Τα κυριότερα ρέματα και παραπόταμοι είναι ο Ξηροπόταμος, το Βικάκι ή Σκαμνελλιώτικο, το Μπαγιώτικο και η Ντόβρη. Εδώ είναι κτισμένα και τα διάσημα πέτρινα γεφύρια του Ζαγορίου (Κόκκορη, Μίσσιου, Πλακίδα, Χάτσιου κ.α.). Σημειώνεται επίσης ότι η υπολεκάνη αυτή αποτελείται σχεδόν στο σύνολό της από προστατευόμενες περιοχές (εικ.2.8-2.10) (Λεονταρίτης, 2014).

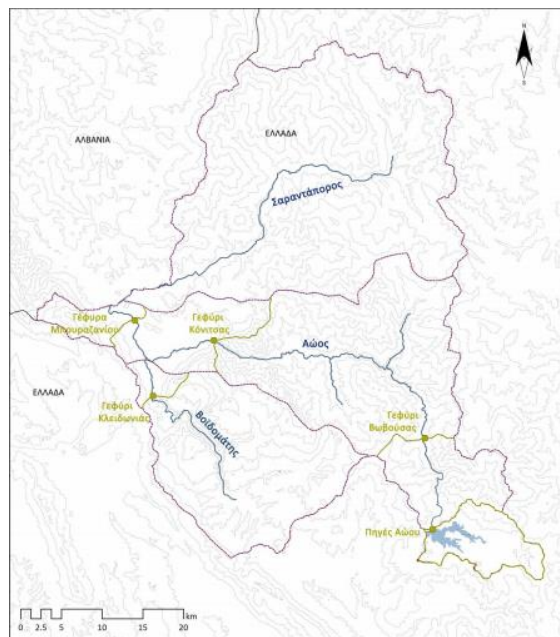
Το κάτω τμήμα του ποταμού έχει υψηλή παροχή καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου. Στην πορεία του μέχρι το γεφύρι της Κλειδωνιάς, διασχίζει το φαράγγι του Βοϊδομάτη. Σε όλο το



μήκος του ο ποταμός δέχεται πληθώρα καρστικών πηγών σε διάφορα σημεία. Λόγω της φύσεως των πηγών αυτών, καθώς και των κυρίως πηγών του ποταμού, η παροχή διατηρείται σχετικά υψηλή και η θερμοκρασία του νερού του ποταμού είναι πολύ χαμηλή ακόμη και τους καλοκαιρινούς μήνες. Στην υπολεκάνη απορροής του τμήματος αυτού συμπεριλαμβάνονται το βορειοδυτικό τμήμα της Τύμφης (Αστράκα 2432m) και οι ορεινές και ημιορεινές περιοχές ανάμεσα στην Τύμφη και το Στούρο. Η ροή του ποταμού είναι ιδιαίτερα ήπια καθ' όλο το μήκος του. Το εμβαδόν της λεκάνης απορροής του Βοϊδομάτη ποταμού είναι 332 km<sup>2</sup>, ενώ η μέση ετήσια παροχή κατά την περίοδο 1967-1977 ήταν 14.88 m<sup>3</sup>/sec (Λεονταρίτης, 2014).



Εικόνες 2.8-2.9 - Αριστερά: Χάρτης προστατευόμενων περιοχών, Δεξιά: Χάρτης Βοϊδομάτη ποταμού”, Άρης-Δημήτριος (Λεονταρίτης, 2014)



Εικόνα 2.10 - Χάρτης υπολεκάνων απορροής Αώου-Βοϊδομάτη-Σαραντάπορου και υδρομετρικών σταθμών (Λεονταρίτης, 2014)

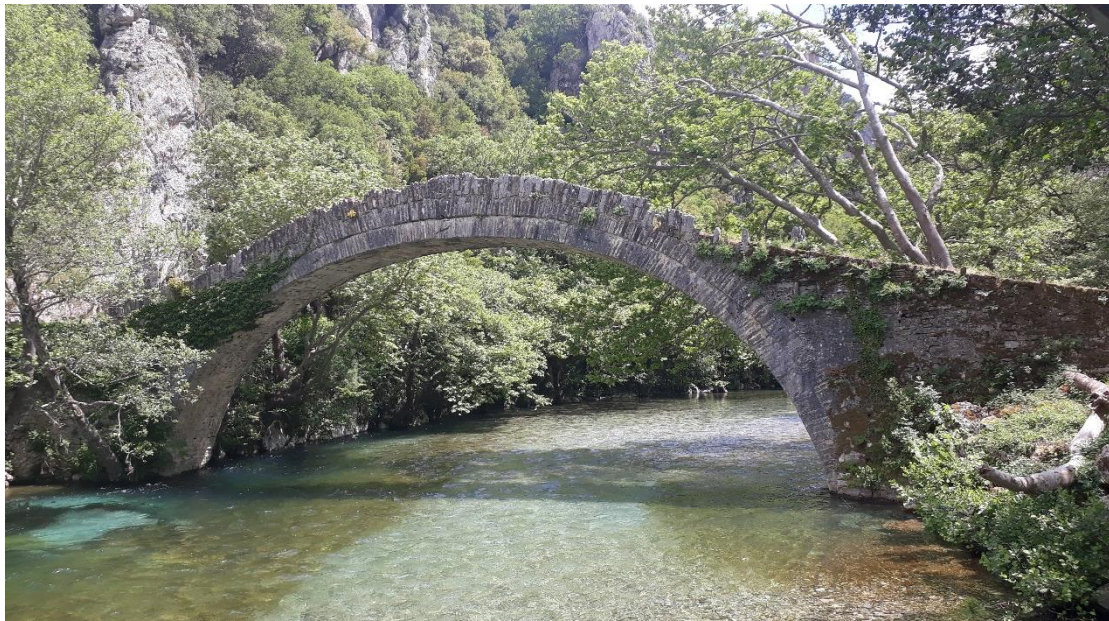




### 3 - Περιγραφή της Γέφυρας

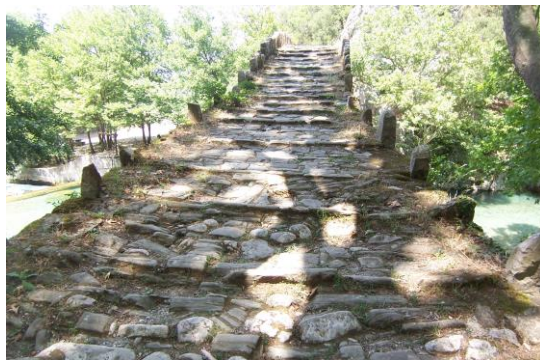
#### 3.1 - Γενική Περιγραφή

Ο άξονας της γέφυρας είναι σχεδόν παράλληλος στην διεύθυνση Βορρά-Νότου. Η ροή του ποταμού στο σημείο γεφύρωσης είναι από την Ανατολή προς την Δύση. Το άνοιγμά του τόξου της είναι 21.5 μέτρα, ενώ το συνολικό μήκος της είναι περίπου ίσο με 45 μέτρα. Το πλάτος της στην κεντρική περιοχή είναι σταθερό, ίσο με 2.65 μέτρα, το οποίο όμως σταδιακά μεταβάλλεται στα 4 μέτρα στην απόληξη της ράμπας πρόσβασης στο νότιο τμήμα της. Το ύψος της γέφυρας από το κλειδί μέχρι την στάθμη ύδατος κατά την ημέρα της αποτύπωσης ήταν 7.10 μέτρα. Η χάραξή του τόξου είναι εμφανώς καταβιβασμένη.

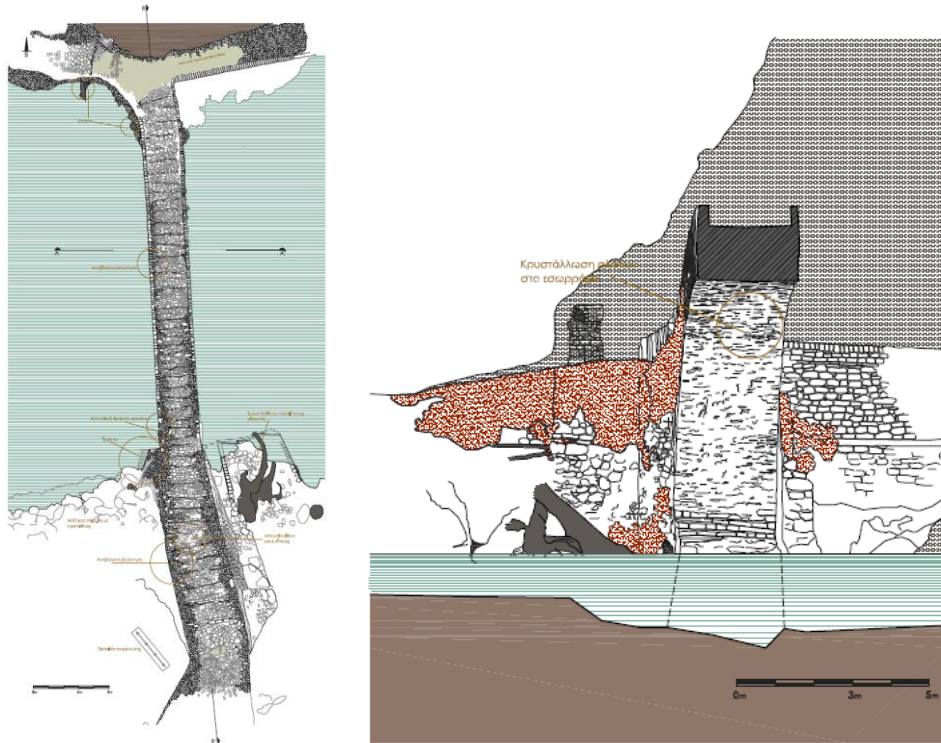


Εικόνα 3.1 - Άποψη γέφυρας από κατάντη

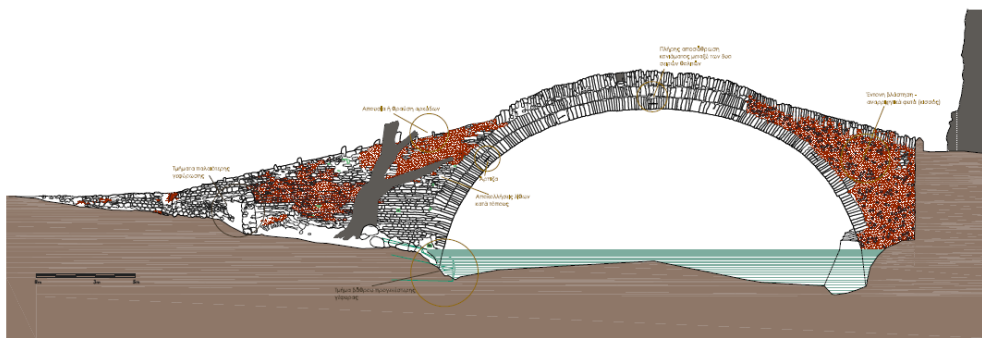
Στηθαία ύψους 60-70 εκατοστομέτρων εντοπίζονται σε όλο το μήκος του καταστρώματος, πλην της περιοχής της νότιας ράμπας πρόσβασης όπου εντοπίζονται αρκάδες, πολλοί από τους οποίους έχουν θραυσθεί, είτε απουσιάζουν εντελώς. Το κατάστρωμα είναι λιθόστρωτο, η δε πλήρωση των αρμών μεταξύ λίθων γίνεται με γαιώδες υλικό. Στο κατάστρωμα εντοπίζονται επίσης ούγιες (λίθοι προέχοντες από την επιφάνεια του καλντεριμιού) μικρού ύψους, κάθετες στον διαμήκη άξονα της γέφυρας, οι οποίες διευκολύνουν την ανάβαση και την κατάβαση (εικ.3.2-3.3).



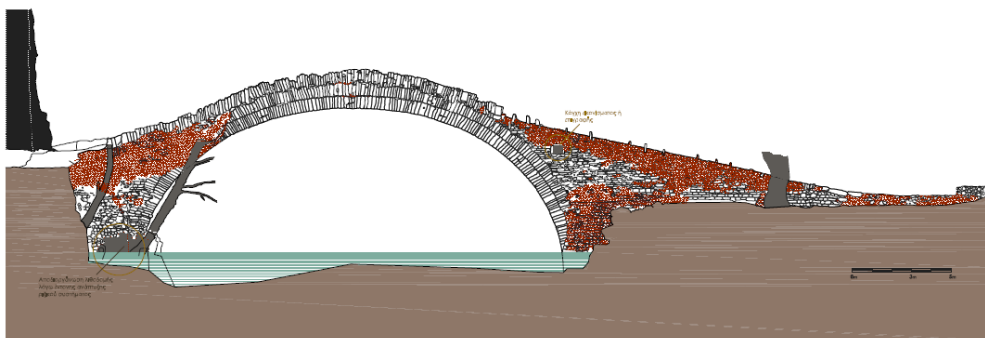
Εικόνες 3.2-3.3 - Το λιθόστρωτο κατάστρωμα από την Νότια και Βόρεια πρόσβαση (φωτογρ. αρχείο Κασκάνη Βασιλείου, 2016)



Εικόνες 3.4-3.5 - Κάτοψη και τομή ΑΑ' του γεφυριού της Κλειδωνιάς (Καπρινιώτη, 2017)



Εικόνα 3.6 - Ανατολική όψη (Καπρινιώτη, 2017)



Εικόνα 3.7 - Δυτική όψη (Καπρινιώτη, 2017)

Η υφιστάμενη γέφυρα έχει κατασκευαστεί σε σημείο στο οποίο παλιότερα προϋπήρχε άλλη, η οποία κατέπεσε (βλ. κεφ.1). Από το τμήμα του βάθρου της παλαιάς γέφυρας το οποίο σώζεται και πάνω στο οποίο έχει εδρασθεί η νέα γέφυρα (εικ.3.8), καθώς και από τα υπολείμματα του νότιου βάθρου της προγενέστερης γέφυρας στα ανάντη της υφιστάμενης (εικ.3.9), είναι εμφανές ότι ο κύριος άξονας της προγενέστερης γέφυρας ήταν στραμμένος κατά περίπου 15° προς τα ανάντη σε σχέση με την υφιστάμενη.





Εικόνες 3.8-3.9 - Αριστερά: Βόρειο ακρόβαθρο προγενέστερης γέφυρας, Δεξιά: Υπολείμματα Νότιου βάθρου προγενέστερης γέφυρας

Στην νότια όχθη του ποταμού, η πρόσβαση στην γέφυρα πραγματοποιείται μέσω ράμπας μήκους περίπου 20 μέτρων (εικ.3.11), ο άξονας της οποίας είναι στραμμένος κατά περίπου  $10^\circ$  σε σχέση με τον άξονα του τόξου. Στην βόρεια όχθη, η γέφυρα επικοινωνεί με υπερυψωμένο καλντερίμι το οποίο οδηγεί στην χαράδρα του Βίκου (εικ.3.10).



Εικόνες 3.10-3.11 - Αριστερά: Βόρεια πρόσβαση, Δεξιά: Νότια πρόσβαση και λεπτομέρεια τυμπάνου Νοτίου βάθρου από κατάντη

Το τόξο αποτελείται από δύο σειρές θολιτών χωρίς εμφανή εμπλοκή μεταξύ τους. Το πάχος κάθε σειράς είναι περίπου 60 εκατοστά, συνεπώς το συνολικό πάχος του τόξου είναι 1.20 m. Επίσης, εντοπίζονται συνολικά 5 ελκυστήρες (άρπιζες) τοποθετημένοι σε ίσες γενικά αποστάσεις μεταξύ τους στο μέσο περίπου του τόξου του εσωραχίου. Το τόξο του εξωραχίου προέχει ελάχιστα από αυτό του εσωραχίου, ενώ δεν συνεχίζει μέχρι της γεννέσεις, αλλά διακόπτεται στις θέσεις που αντιστοιχούν σε τόξα επίκεντρων γωνιών  $20^\circ$ . Η κατασκευή και των δύο τόξων είναι ιδιαίτερα επιμελής (εικ.3.12).

Οι πτερυγότοιχοι είναι κτισμένοι με λιθοδομή σε ψευδοσειρά (εικ.3.13, 3.17) Τα ακρόβαθρά της γέφυρας είναι ορθογωνικής διατομής και εδράζονται σε βραχώδες έδαφος. Στο αριστερό



τύμπανο, της κατάντη όψης του γεφυριού, υπάρχει κόγχη για εικόνισμα ή επιγραφή που δεν σώζεται (εικ.3.13).



Εικόνες 3.12-3.13 - Αριστερά: Λεπτομέρεια τόξου, Δεξιά: Λεπτομέρεια τυμπάνου

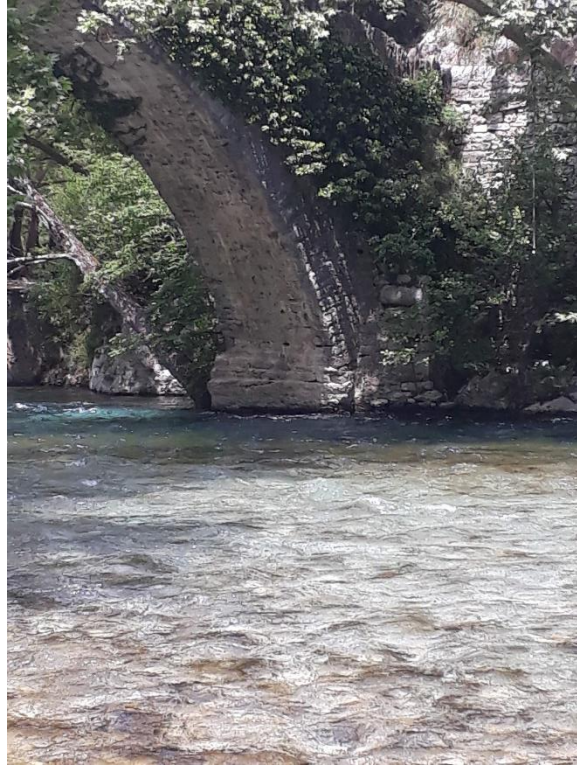
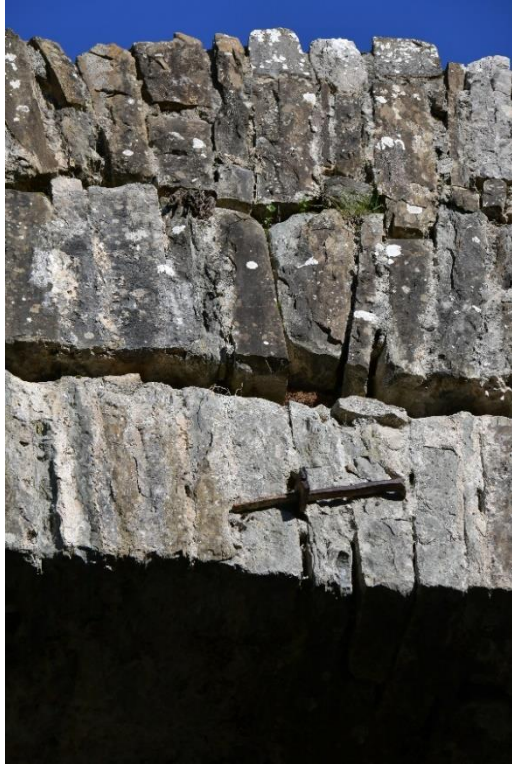
### 3.2 - Παθολογία

Η μελέτη της παθολογίας περιλαμβάνει την καταγραφή και την ερμηνεία τόσο των φθορών, όσο και των βλαβών. Οι φθορές (για παράδειγμα, εξανθήματα, επιρροή υγρασίας, κ.λπ.) καταγράφονται και μελετώνται-παρά το γεγονός ότι δεν συνιστούν κατ' ανάγκη παράγοντες μείωσης της φέρουσας ικανότητας ενός δομήματος-επειδή ενδέχεται σε μήκος χρόνου να επηρεάσουν δυσμενώς την συμπεριφορά του δομήματος (π.χ. έκπλυση κονιάματος δομήσεως εν τω βάθει ή αποδιοργάνωση κονιάματος, κ.λπ.). Οι βλάβες αποτελούν τοπικές ή γενικές αστοχίες (ρωγμές, μόνιμες παραμορφώσεις, τοπικές καταρρεύσεις, κ.λπ.) οφειλόμενες σε μηχανικό αίτιο ή σε εσφαλμένο σχεδιασμό, κακοτεχνίες κατά την κατασκευή, κ.λπ.

Η επιθεώρηση της γέφυρας της Κλειδωνιάς δεν εντοπίζει εμφανείς βλάβες. Υπάρχουν μόνο περιορισμένες φθορές, φυσιολογικές για την ηλικία της κατασκευής. Κυριότερη εξ αυτών είναι η εκτεταμένη, επιφανειακή τουλάχιστον, αποσάθρωση του κονιάματος και στην περιοχή της κλείδας, καθώς και η αποκόλληση των δύο σειρών θολιτών στο σημείο αυτό (εικ.3.14)

Επιπλέον, έντονη βλάστηση έχει αναπτυχθεί στα τύμπανα της γέφυρας και κυρίως σε αυτά του βόρειου βάθρου. Συγκεκριμένα, και τα δύο τύμπανα του βόρειου βάθρου έχουν σχεδόν καλυφθεί από αναρριχητικά φυτά (εικ.3.15), ενώ κατά τόπους εμφανίζεται βλάστηση και στα τύμπανα του νότιου βάθρου (εικ.3.16).





Εικόνες 3.14-3.15 - Αριστερά: Αποκόλληση θολιτών στην Κλείδα (Γιαννέλος Χ.,2019), Δεξιά: Βλάστηση στο ανάντη τύμπανο του Βόρειου βάθρου



Εικόνες 3.16-3.17 - Αριστερά: Βλάστηση στο κατόντη τύμπανο του Νότιου βάθρου, Δεξιά: Ρηγματώση τυμπάνου Νότιας πρόσβασης

Επίσης, ρηγματώσεις εμφανίζονται στο ανώτερο τμήμα των τυμπάνων της Νότιας πρόσβασης (εικ.3.16-3.17). Οι ρωγμές είναι κυρίως κατακόρυφες με μικρό εύρος. Η δημιουργία τους πιθανόν οφείλεται σε σεισμικές δράσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση της γέφυρας, καθώς, όπως φαίνεται στις αναλύσεις στη συνέχεια, στα σημεία αυτά παρατηρείται



συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων υπό τη συγκεκριμένη σεισμική φόρτιση. Τέλος, κρυστάλλωση αλάτων παρατηρείται στο εσωράχιο του τόξου (εικ.3.18).



Εικόνα 3.18 - Κρυστάλλωση αλάτων στο εσωράχιο του τόξου (Γιαννέλος Χ.,2019)

### 3.3 - Διερεύνηση Γεωμετρικής Χάραξης του Τόξου

Για την τεκμηρίωση της γεωμετρικής χάραξης του τόξου της γέφυρας της Κλειδωνιάς πραγματοποιείται διερεύνηση με την βοήθεια του προγράμματος σχεδίασης ηλεκτρονικού υπολογιστή AutoCAD. Καθώς είναι αμέσως ορατό ότι η χάραξη διαφέρει από την τυπική ημικυκλική, η διερεύνηση ξεκινά έχοντας ως πιθανότερες μορφές χάραξης την έλλειψη, την χάραξη τριών κέντρων (λαβή κανίστρου), την χάραξη  $n+1$  κέντρων (εικ.4.16) και το τόξο κύκλου.

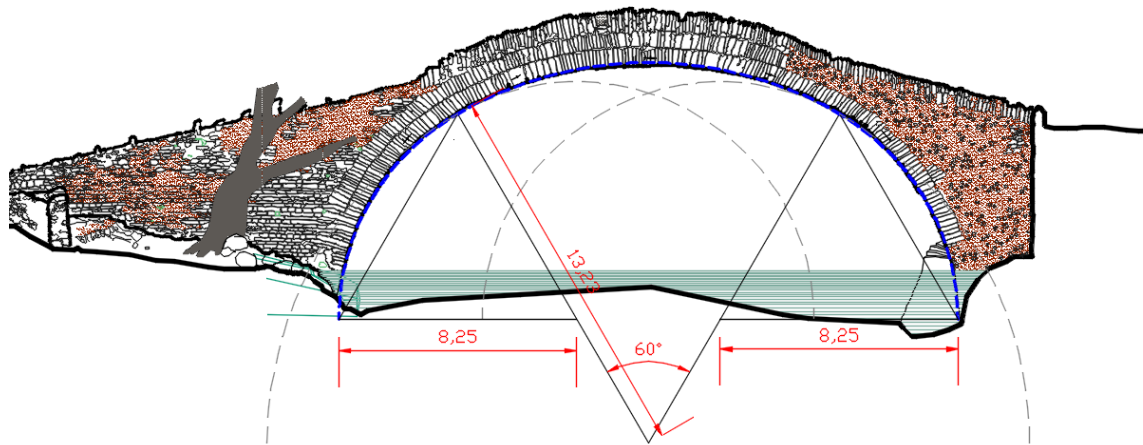
Σημειώνεται ότι στο πρόβλημα της διερεύνησης της χάραξης του τόξου συναντώνται εγγενείς δυσκολίες που δυσχεραίνουν την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για την χάραξη, καθώς πολλές φορές η πρόθεση του πρωτομάστορα όσον αφορά την γεωμετρία δεν συνάδει με την εκ των υστέρων αποτύπωση. Οι διαφοροποιήσεις αυτές στην αποτυπούμενη γεωμετρία μπορεί να οφείλονται στην συστολή ξήρανσης, στον ερπυσμό που έχει υποστεί η γέφυρα κατά τα χρόνια λειτουργίας της ή στο ιστορικό φορτίσεών της. Επιπλέον, παράγοντες όπως οι κατασκευαστικές ατέλειες (π.χ. ανακρίβεια στην κατασκευή του ξυλοτύπου, περιορισμένη δυσκαμψία του ξυλοτύπου ή πρόωρη απομάκρυνση αυτού) μπορούν να επιδράσουν σημαντικά στην τελική μορφή της χάραξης. Συνεπώς, στόχος της διερεύνησης της χάραξης είναι η όσο το δυνατόν ακριβέστερη απόδοση της προθέσεως του πρωτομάστορα όσον αφορά στην γεωμετρία του τόξου.

Η διαδικασία προσέγγισης της χάραξης γίνεται καταρχάς μέσω της προσπάθειας εγγραφής των σημείων αποτύπωσης του εσωραχίου σε τόξο κύκλου σταθερής ακτίνας. Η προσέγγιση αυτή, καθώς και η προσπάθεια ένταξης της αποτύπωσης σε ελλειψοειδή χάραξη φαίνεται ότι δεν συμπίπτουν με αποδεκτή ακρίβεια με την πραγματική χάραξη.

Από την διερεύνηση προκύπτει ότι η χάραξη προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τόξα κύκλων με τρία διαφορετικά κέντρα (εικ.3.19). Συγκεκριμένα τα δύο ακραία τόξα έχουν ακτίνα 8.25 μέτρων, ενώ το μεσαίο έχει ακτίνα 13.23 μέτρων, το κέντρο του δε βρίσκεται σε απόσταση 4.32 μέτρων χαμηλότερα από την θεωρητική γραμμή γενέσεως. Η αλλαγή καμπυλότητας πραγματοποιείται σε γωνία  $60^\circ$  από τις γενέσεις ως προς τα κέντρα χαράξεως των ακραίων κυκλικών τομών, με τους κύκλους των ακραίων τμημάτων ακτίνας 8.25 μέτρων να

εφάπτονται στον κύκλο ακτίνας 13.25 μέτρων στα σημεία αλλαγής καμπυλότητας, γεγονός που υπαγορεύεται από κατασκευαστικούς κανόνες για την ύπαρξη κοινής εφαπτομένης των κύκλων στα συγκεκριμένα σημεία.

Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν ως υπόβαθρο για την διερεύνηση της χάραξης έχουν προκύψει μέσω τοπογραφικής αποτύπωσης της γέφυρας από τον Τοπογράφο Μηχανικό Γεώργιο Μιχαηλίδη. Σημειώνεται ότι η απόκλιση του μεσαίου από τα τρία τόξα της χάραξης από τα ακριβή σημεία της αποτύπωσης στην ευρύτερη περιοχή της κλείδας είναι απόρροια της εμφανούς παραμόρφωσης που έχει υποστεί η γέφυρα στη περιοχή και της αποκόλλησης των δύο επάλληλων τόξων (εικ.3.14).

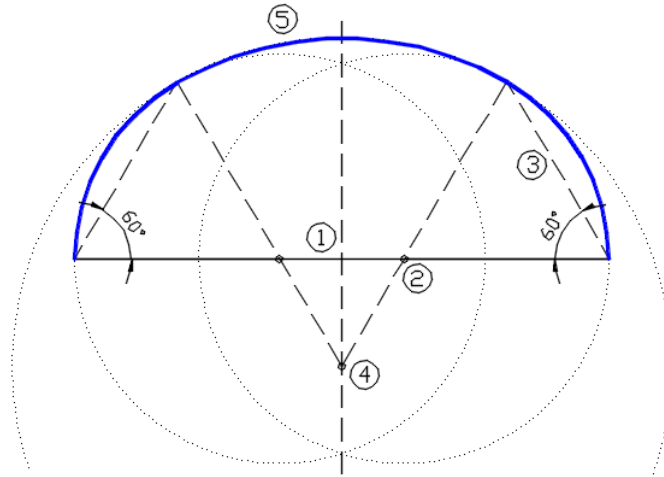


Εικόνα 3.19 - Θεωρητική χάραξη του τόξου της γέφυρας

Η καταβιβασμένη χάραξη τριών κέντρων που προκύπτει από την διερεύνηση, αποτελεί μια νεωτεριστική για την εποχή κατασκευής χάραξη, η οποία απέχει από την τυπική ημικυκλική που παρατηρείται στην πλειονότητα των λίθινων γεφυρών στον Ελλαδικό χώρο κατά την περίοδο αυτή ή και παλαιότερα. Στο κεφάλαιο 4, εξετάζονται οι ενδεχόμενες επιρροές στην χάραξη και στην λυγηρότητα της γέφυρας της Κλειδωνιάς από τα συμβαίνοντα την ίδια περίοδο στην Ευρώπη, και ιδιαίτερα στην Γαλλία, όσον αφορά στην γεφυροποιία. Μια τέτοια επιρροή θα ήταν ισχυρή ένδειξη για τις σχέσεις που είχαν αναπτυχθεί μεταξύ της υπό Οθωμανική κατοχή Ηπείρου και της Ευρώπης.

### 3.3.1 - Μεθοδολογία γεωμετρικού σχεδιασμού

Στη συνέχεια ακολουθούν τα βήματα γεωμετρικού σχεδιασμού (με κανόνα και διαβήτη) του τόξου τριών κέντρων της γέφυρας της Κλειδωνιάς. Με την παρακάτω μέθοδο και με κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου του βήματος '2' (επιλογή ακτίνας ακραίων τόξων), είναι δυνατή η γεωμετρική χάραξη οποιουδήποτε τόξου τριών κέντρων με επίκεντρες γωνίες 60 μοιρών.



Εικόνα 3.20 - Γεωμετρική μέθοδος σχεδιασμού του τόξου της γέφυρας Κλειδωνιάς

- ① - Επιλογή ανοίγματος ( $s=21.49\text{m}$ ) και χάραξη μεσοκαθέτου
- ② - Επιλογή ακτίνας ακραίων τόξων ( $R_2=8.25\text{m}^*$ ) και χάραξη κύκλων
- ③ - Χάραξη ευθείας από το άκρο του ανοίγματος με γωνία  $60^{**}$
- ④ - Χάραξη ευθείας που διέρχεται από το σημείο τομής της ευθείας '3' με τον κύκλο '2' και το κέντρο του κύκλου '2'
- ⑤ - Χάραξη κύκλου με κέντρο το σημείο τομής της ευθείας '4' με τη μεσοκάθετο και ακτίνα ίση με το αντίστοιχο ευθύγραμμο τμήμα

\* Σημειώνεται ότι μονάδα μέτρησης της εποχής ήταν ο τεκτονικός πήχης, ο οποίος ισούται με 75 εκατοστά του μέτρου. Συνεπώς, οι ακτίνες των ακριανών τόξων, όπως προκύπτει από τη διερεύνηση της χάραξης, είναι ακέραια πολλαπλάσια της μονάδας μέτρησης της εποχής ( $8.25\text{m}=11$  τεκτονικοί πήχεις).

\*\* Η γωνία 60 μοιρών μπορεί να κατασκευαστεί γεωμετρικά μέσω κατασκευής ισοσκελούς τριγώνου



## 4 - Ερμηνεία Μορφολογικών Χαρακτηριστικών

### 4.1 - Θεωρητικό Υπόβαθρο

Ακολουθούν αποσπάσματα από το βιβλίο της Καραντώνη Φ. “Κατασκευές από Τοιχοποιία”.

Οι αψίδες ή τόξα είναι επίπεδοι φορείς με κύριο χαρακτηριστικό την μεταφορά των κατακόρυφων φορτίων στις εδράσεις τους μέσω λειτουργίας θόλου. Η χρήση τους είναι πολύ παλιά. Πράγματι, η παλαιότερη σωζόμενη αψίδα είναι στην Ur της Μεσοποταμίας με άνοιγμα μόλις 0.8m, ενώ από τις μεγαλύτερες και παλιότερες σωζόμενες αψίδες είναι αυτή που βρίσκεται στο παλάτι στην Κτησιφώντα (550 μ.Χ), η οποία είναι κατασκευασμένη από ωμοπλινθοδομή και έχει άνοιγμα 25.3m. Όμως, αυτού του είδους οι κατασκευές εφαρμόστηκαν ευρέως κυρίως από τους Ρωμαίους.

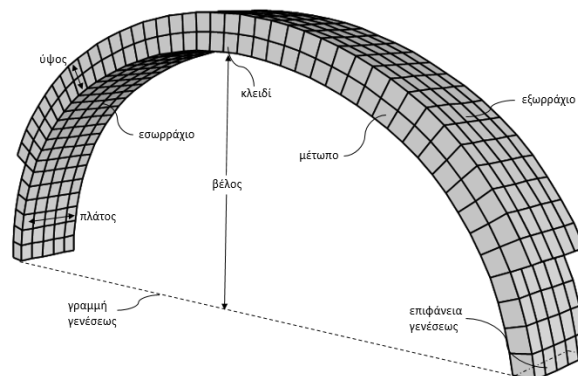
Οι αψίδες δημιουργούνται είτε με ενσφήνωση ορθογωνικών τοιχοσωμάτων με σφηνοειδείς αρμούς, τρόπος που συνηθίζεται περισσότερο στις ωμοπλινθοδομές λόγω της μη χρήσης ειδικών τεμαχίων, είτε με ενσφήνωση σφηνοειδών τεμαχίων με ορθογωνικούς αρμούς, τρόπος που συνηθίζεται σε λιθοδομές, είτε με συνδυασμό των ανωτέρω.

#### Τα κύρια τμήματα ενός τόξου

Οι ονομασίες των κύριων τμημάτων των αψίδων είναι οι ακόλουθες:

- Εσωράχιο λέγεται η κάτω (συνήθως ορατή) επιφάνεια της αψίδας
- Εξωράχιο λέγεται η άνω κυρτή ράχη της τοξωτής κατασκευής
- Επιφάνειες γενέσεως ή εδράσεως είναι οι επιφάνειες δια των οποίων η αψίδα στηρίζεται στα εκατέρωθεν κατακόρυφα ή κεκλιμένα στοιχεία, από τα οποία αρχίζει η κατασκευή
- Μέτωπα της αψίδας λέγονται οι όψεις της
- Γραμμές γενέσεως είναι οι ευθείες που ενώνουν τις επιφάνειες γενέσεως
- Ύψος είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ εσωραχίου και εξωραχίου, δηλαδή το πάχος του φέροντος στοιχείου της αψίδας ή του τόξου.
- Πλάτος ονομάζεται η μεταξύ των δύο μετώπων κάθετη απόσταση
- Κορυφή ονομάζεται το υψηλότερο σημείο του εσωραχίου
- Βέλος της αψίδας είναι η κατακόρυφη απόσταση της κορυφής από την ευθεία που ορίζουν τα σημεία των γραμμών γενέσεως στο μέτωπο της αψίδας
- Άνοιγμα της αψίδας είναι η απόσταση των γραμμών γενέσεως

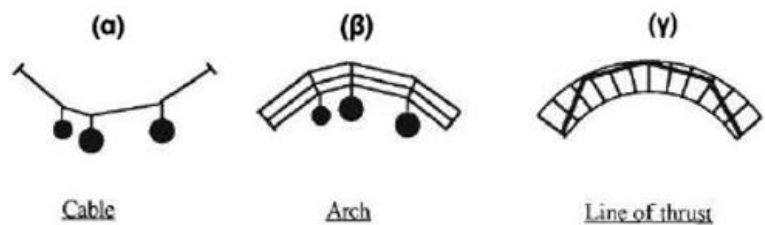
Οι λίθοι που διαμορφώνουν της αψίδα λέγονται αψιδόλιθοι και εξ αυτών διακρίνονται οι λίθοι βάσεως που είναι οι ακραίοι λίθοι της αψίδας, και η κλείδα (κοινώς κλειδί), που είναι ο αψιδόλιθος του άξονα ή διαφορετικά, ο λίθος που τοποθετείται στην κορυφή της αψίδας.



Εικόνα 4.1 - Τα μέρη της αψίδας

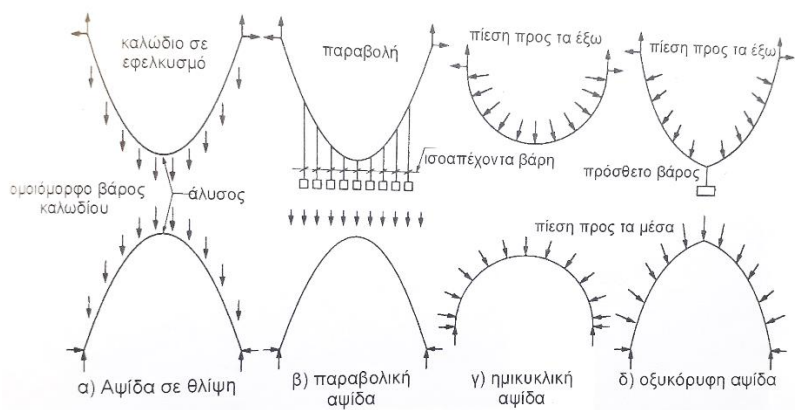
Στατική λειτουργία των τόξων

Η λειτουργία μιας αψίδας (λειτουργία θόλου) είναι περισσότερο κατανοητή με την χρήση του ανάλογου φαινομένου μιας αλυσίδας ή ενός καλωδίου που αναρτάται από τα δύο άκρα του. Το καλώδιο υπό το ίδιο βάρος του λαμβάνει το σχήμα που φαίνεται στην εικόνα 4.2<sup>α)</sup>. Αν το σχήμα αυτό μεταβληθεί σε στερεό, στραφεί περί οριζόντιο άξονα και στηριχθεί στα άκρα του, πάρει δηλαδή το σχήμα μιας αψίδας, η αψίδα θα βρίσκεται υπό καθαρή θλίψη (εικόνα 4.2<sup>β)</sup>).



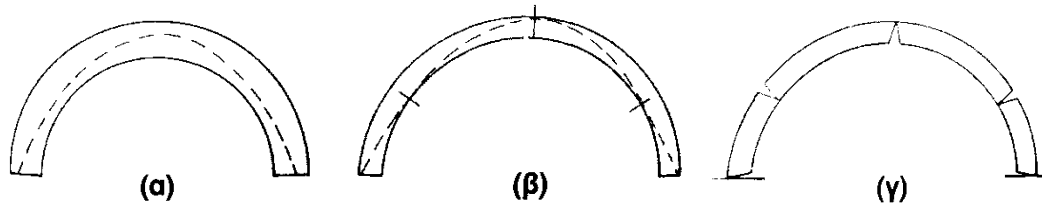
Εικόνα 4.2 - Πειραματική προσέγγιση συμπεριφοράς του τόξου (Καραντώνη, 2012)

Το σχήμα αυτό συνεπώς είναι το ιδανικότερο για μία αψίδα η οποία θε φέρει μόνο το ίδιο βάρος της ή πολύ μικρό εξωτερικό φορτίο. Αν μια αψίδα φορτίζεται και με άλλα φορτία, τότε η ιδανική χάραξη της θα προκύψει από την ανάλογη φόρτιση ενός καλωδίου. Μέσω της παραπάνω μεθόδου προκύπτει ότι το ιδανικότερο σχήμα για την παραλαβή του ίδιου βάρους είναι η παραβολή. Οι συνθήκες αυτές επικρατούν όταν το ίδιο βάρος της αψίδας είναι μικρό σχετικά με το εξωτερικό ομοιόμορφο φορτίο. Η ημικυκλική αψίδα είναι ιδανική για ακτινικά φορτία, ενώ όταν υπάρχει πρόσθετο φορτίο στην κλείδα, τα ιδανικότερο σχήμα είναι η οξυκόρυφη αψίδα (εικόνα 4.3).



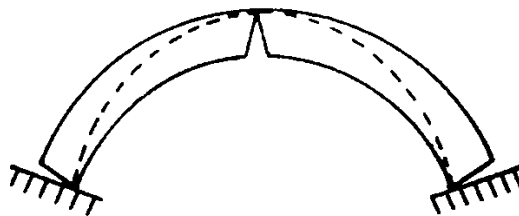
Εικόνα 4.3 - Αναλογίες καλωδίου-αψίδας για διάφορες περιπτώσεις φόρτισης (Καραντώνη, 2012)

Για το ίδιο βάρος της, μια αψίδα έχει θεωρητικά άπειρες γραμμές ωθήσεων, ανάλογα με το πού εφαρμόζεται η συνισταμένη των τάσεων στις επιφάνειες έδρασης. Στην εικ.4.4<sup>α)</sup> η γραμμή ωθήσεων βρίσκεται μέσα στο κεντρικό τρίτο της διατομής σε όλη την αψίδα και έτσι δεν αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις, αντίθετα στην εικ.4.4<sup>β)</sup> η γραμμή ωθήσεων έχει ως συνέπεια τη δημιουργία αρθρώσεων στις θέσεις που φαίνονται στην εικ.4.4<sup>γ)</sup> (Καραντώνη, 2012).

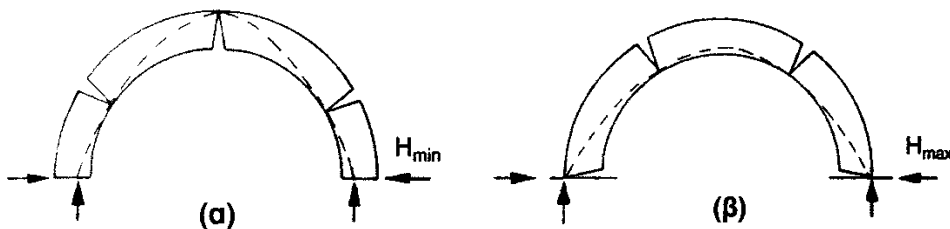


Εικόνα 4.4 - α) Γραμμή ωθήσεων που δεν δημιουργεί αρθρώσεις, β) Γραμμή ωθήσεων που δημιουργεί τις αρθρώσεις που φαίνονται στο γ) (Καραντώνη, 2012)

Αν γίνει η παραδοχή ότι οι στηρίξεις δεν είναι ακλόνητες και μια αψίδα δεν είναι από συνεχές υλικό, τότε μπορούν να γίνουν διαφορετικές εκτιμήσεις για τα σημεία από τα οποία διέρχεται η γραμμή ωθήσεων. Μπορεί για παράδειγμα να θεωρηθεί ότι η αψίδα στηρίζεται αρθρωτά, οπότε η γραμμή ωθήσεων να αντιστοιχεί στο μέγιστο δυνατό βέλος αυτής (εικ.4.5). Επίσης μπορεί να γίνει η θεώρηση ότι η οριζόντια συνιστώσα έχει την ελάχιστη τιμή της, οπότε η γραμμή ωθήσεων έχει τη μορφή της εικ.4.6<sup>α)</sup>, δηλαδή το μέγιστο δυνατό βέλος διερχόμενη από το εξωρράχιο στην κορυφή της και η αψίδα ρηγματώνεται σε τρεις θέσεις, άρα λειτουργεί ως τριαρθρωτό τόξο και παραμένει σε ισορροπία. Στην περίπτωση που η οριζόντια συνιστώσα έχει την μέγιστη τιμή της, η γραμμή ωθήσεων διέρχεται από το εξωρράχιο στις επιφάνειες γένεσης, εκεί το εσωρράχιο ρηγματώνεται και η αψίδα αστοχεί, μεταπίπτουσα σε μηχανισμό με τη δημιουργία δύο ρωγμών στο εξωρράχιο, όπως φαίνεται στην εικ.4.6<sup>β)</sup>. Για το σχεδιασμό της γραμμής ωθήσεων υπό ομοιόμορφη φόρτιση συνηθίζεται να γίνεται θεώρηση ότι στο κέντρο της δεν δημιουργείται ροπή, δηλαδή η γραμμή ωθήσεων διέρχεται από το μέσο του ύψους της στο κλειδί, και με παραδοχή αρθρώσεων στις στηρίξεις η αψίδα είναι και πάλι ένα τριαρθρωτό τόξο (Καραντώνη, 2012).



Εικόνα 4.5 - Γραμμή ωθήσεων σε τριαρθρωτό τόξο (Καραντώνη, 2012)



Εικόνα 4.6 - Ημικυκλική αψίδα υπό το ίδιο βάρος της, α) ελάχιστη οριζόντια ώθηση, β) μέγιστη οριζόντια ώθηση (Καραντώνη, 2012)

Βεβαίως, όπως θα δούμε και παρακάτω στα κεφάλαια 5 και 6, τα τόξα δύνανται να έχουν διάφορες μορφές γεωμετρικής χάραξης (π.χ. ημικυκλικά, οξυκόρυφα, ελλειψοειδή με  $n+1$  κέντρα κ.α.). Η εκάστοτε φόρτιση μπορεί να επηρεάσει διαφορετικά τις χαράξεις αυτές, οδηγώντας σε διαφορετικά αποτελέσματα κατά περίπτωση. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα όσον αφορά τις θέσεις εμφάνισης κρίσιμων διατομών ή τις οριζόντιες ωθήσεις στις στηρίξεις μιας συγκεκριμένης φόρτισης επιβαλλόμενης σε τόξα διαφορετικής γεωμετρικής χάραξης, μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους.

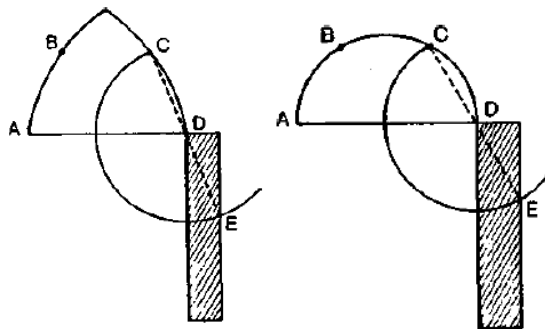
Στατική των λίθινων γεφυρών - Μια σύντομη αναδρομή

Ακολουθεί απόσπασμα από το βιβλίο των Άρη Χατζηδάκη και Ζωής Εύδου “Τα λίθινα γεφύρια του νομού Ρεθύμνου : Αναδρομή στην ιστορία τους και την ιστορία των λίθινων κατασκευών”:

Στο πλαίσιο του ενδιαφέροντος για την εξέλιξη της τεχνικής γνώσης των "γεφυροποιών", έχουν θέση στην εργασία αυτή μερικά στοιχεία που αφορούν την εξέλιξη των γνώσεων για τις λίθινες τοξωτές κατασκευές. Το θέμα δεν αφορά βέβαια μόνο τις γέφυρες, αλλά όλες τις τοξωτές κατασκευές-στοιχεία γεφύρωσης σημαντικών ανοιγμάτων με λίθινο υλικό. Ασφαλώς οι γέφυρες, λόγω του μεγέθους των προς γεφύρωση ανοιγμάτων, των αυξημένων φορτίων καθώς και των συνθηκών θεμελίωσης, αποτελούν την πιο δύσκολη περίπτωση λίθινων τόξων.

Κάθε προσπάθεια κατανόησης των κατασκευών αυτών θα πρέπει να βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο οι κατασκευαστές τους τις είχαν συλλάβει και όχι στη σημερινή μας θεώρηση μέσω της θεωρίας της ελαστικότητας. Θα πρέπει ίσως να μάθουμε να διακρίνουμε μέσα στην τοξωτή κατασκευή μερικούς απλούς ιδεατούς μηχανισμούς (κατάλληλα διατεταγμένο σύστημα μοχλών ή σφηνών) που σκοπό είχαν να προβλέψουν την συμπεριφορά της κατασκευής και τον τρόπο αστοχίας για την συναγωγή κανόνων σχεδιασμού. Είναι γνωστό ότι μια στατική θεωρία των τόξων που να οδηγεί σε ποσοτικούς όρους εμφανίστηκε περί τα τέλη του 17ου αιώνα. Όμως, παρέμεινε επί δεκαετίες υπόθεση λίγων επιστημόνων και η ενσωμάτωση των θεωριών αυτών στον εξοπλισμό του μηχανικού της πράξης χρειάστηκε πάνω από έναν αιώνα ακόμα. Είναι όμως επίσης γνωστό ότι βασικές πλευρές της στατικής συμπεριφοράς τους ήταν από πολύ παλιά γνωστές και καθοδηγούσαν την κατασκευαστική πρακτική. Για παράδειγμα στο έκτο από τα δέκα βιβλία της Αρχιτεκτονικής, ο Βιτρούβιος μιλάει για την ώθηση που τα τόξα εξασκούν στους τοίχους και τα βάθρα τους. Η κατασκευαστική εμπειρία και η στατική διαίσθηση, καλλιεργημένες μέσα από αιώνες τριβής με τα φυσικά υλικά και την διαδικασία δοκιμής και ελέγχου των κατασκευών, οδήγησαν σε αξιοθαύμαστες κατασκευές πολύ πριν την εμφάνιση και συστηματοποίηση της επιστήμης της μηχανικής.

Οι λεπτές ισορροπίες που πέτυχαν με τα οξυκόρυφα τόξα και τους θόλους με νευρώσεις, οι κατασκευαστές των γοθικών ναών, δείχνουν μια αρκετά καλή γνώση της στατικής λειτουργίας του τόξου. Σύμφωνα με τον Violet le Duc οι κατασκευαστές του Μεσαίωνα κατείχαν μια επεξεργασμένη θεωρία, αυτή που θέλει την μορφή του τόξου να πλησιάζει προς την μορφή της καμπύλης των πιέσεων. Σε αυτή την εποχή αποδίδεται και ο παρακάτω εμπειρικός τρόπος καθορισμού του πάχους των βάθρων ανάλογα με τη μορφή του τόξου.

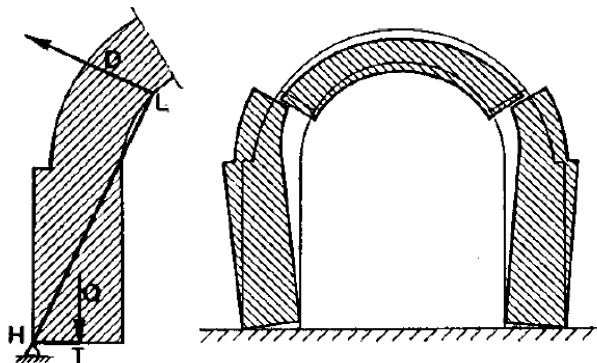


Εικόνα 4.7 - Εμπειρικός τρόπος καθορισμού του πάχους των βάθρων. Το ημικύκλιο ή το οξυκόρυφο τόξο χωρίζεται σε τρία ίσα μέρη. Η τομή του ημικύκλιου ακτίνας DC με την κατακόρυφο ορίζει το πάχος του βάθρου.

Η διαστασιολόγηση των τόξων με γεωμετρικές μεθόδους και κανόνες υπήρξε ο μόνος τρόπος που χρησιμοποιήθηκε μέχρι πρόσφατα. Η αντίληψη που κυριαρχούσε, την οποία πρώτος αμφισβήτησε ο Γαλιλαίος, ότι κατασκευές γεωμετρικά όμοιες έχουν και τις ίδιες στατικές ιδιότητες, έκανε τον Leon Batista Alberti να διαβεβαιώνει για την απόλυτη ασφάλεια του ημικυκλικού τόξου, και, τους διάφορους θεωρητικούς της Αρχιτεκτονικής να καθορίζουν την μορφή του τόξου και τις αναλογίες των διαφόρων μελών της κατασκευής με καθαρά γεωμετρικό τρόπο, χρησιμοποιώντας κριτήρια αισθητικά, συμβολικά ή ρυθμολογικά από την κλασική παράδοση. Εκείνο που κάνει εντύπωση είναι η απουσία κάθε αναφοράς στην στατική και την φέρουσα ικανότητα αυτών των κατασκευών. Εξάιρεση αποτελεί ο Leonardo Da Vinci. Πράγματι, στις σημειώσεις και τα σκίτσα του συναντά κανείς παρατηρήσεις και νύξεις που θα αναπτυχθούν αιώνες αργότερα. Φαίνεται πως προσπάθησε να μετρήσει με πειραματικό τρόπο την ώθηση των τόξων, ενώ σαν κανόνα διαστασιολόγησης πρότεινε: "το τόξο δεν θα καταρρεύσει αν η χορδή του εξωραχίου του μισού τόξου, δεν αγγίζει την καμπύλη του εσωραχίου". Τον κανόνα αυτό θα χρησιμοποιήσει τον 18<sup>ο</sup> αιώνα και ο Couplet.

Τα πρώτα βήματα για την δημιουργία μιας στατικής θεωρίας των τόξων γίνονται από το Γάλλο αστρονόμο και μαθηματικό Philippe De la Hire με τις εργασίες του "Traire de Mécanique" (1695) και "Sur la Construction des vouûtes dans les édifices" (1712). πρώτο μεταξύ πολλών αρχιτεκτόνων-γεωμετρών. Προσπάθησε να εφαρμόσει τη θεωρία του Varignon για την ανάλυση των δυνάμεων στο πρόβλημα της αντοχής των τόξων. Πίστευε ότι παρ' όλο που η γεωμετρία ήταν απαραίτητη σ' ένα μηχανικό, η φύση συμπεριφέρεται με αρκετά περίπλοκο τρόπο για να υπακούσει σε αυστηρούς γεωμετρικούς κανόνες.

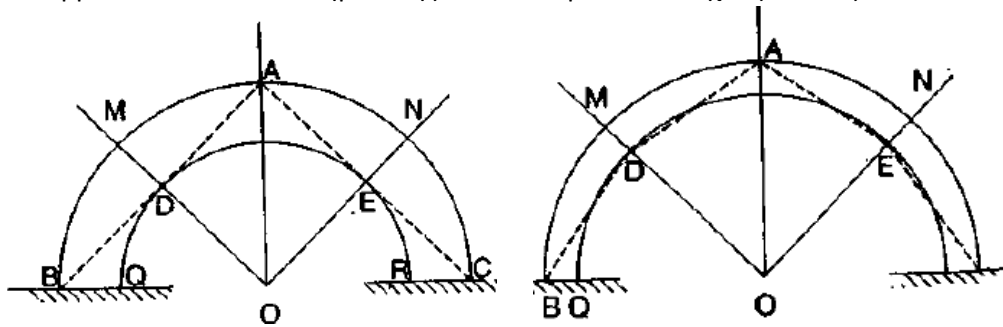
Ο De la Hire αναλύει το τόξο σε στοιχειώδεις σφήνες τους οποίους θεωρεί ως απολύτως στερεά σώματα και απολύτως λεία (αγνοεί την τριβή ανάμεσά τους). Το βασικό μειονέκτημα της προσέγγισης δεν είναι τόσο η παράβλεψη της παραμόρφωσης των «σφηνών», όσο η παραδοχή μηδενικής τριβής μεταξύ τους. Αν και η συνεισφορά του De la Hire είναι σημαντική, η διαστασιολόγηση που συνεπάγεται οδηγεί σε διάφορα παράδοξα και έρχεται σε αντίφαση με τα πειραματικά δεδομένα. Παρ' όλα αυτά αποτελεί την αρχή για μια συστηματική προσέγγιση της στατικής των τόξων και θα δεσπόσει σε όλο τον 18<sup>ο</sup> αιώνα. Στο πρόβλημα του καθορισμού των διαστάσεων των βάρων που πραγματεύεται στο δεύτερο έργο του, ο De la Hire εισάγει μια νέα οπτική για την ερμηνεία της συμπεριφοράς του τόξου. Πρόκειται για έναν υπολογισμό σε αστοχία, βασιζόμενο σε έναν πιθανό μηχανισμό κατάρρευσης του τόξου σε τρία μέρη. Γι' αυτόν τον μηχανισμό, διατυπώνει την οριακή κατάσταση ισορροπίας.



Εικόνα 4.8 - Κατάρρευση του τόξου σε τρία μέρη, σύμφωνα με την θεωρία του De la Hire

Αξίζει να σημειωθεί η συνεισφορά του Claude Antoine Couplet (1642-1722) με τα δυο μνημόνια του στην Βασιλική Ακαδημία Επιστημών: "De la pousée des vouûtes" (1731) και το δεύτερο μέρος της (1732). Εισάγει την έννοια της τριβής ανάμεσα στα μέλη του τόξου, χωρίς να δώσει ποσοτική εκτίμηση γι' αυτήν. Ασχολείται επίσης με το πρόβλημα της στατικής των

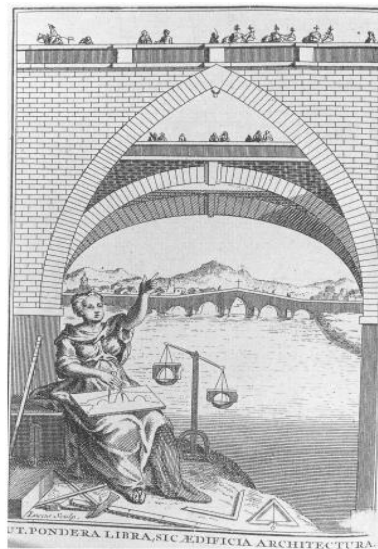
ξύλινων αψιδοτύπων. Καταλήγει σ' ένα κανόνα διαστασιολόγησης των τόξων (ήδη διατυπωμένο από τον Leonardo da Vinci) ότι δηλαδή επαρκής όρος για την ισορροπία μιας τοξωτής κατασκευής είναι "η χορδή του μισού του εξωραχίου να μην τέμνει το εσωράχιο, αλλά να βρίσκεται σε όλα τα σημεία της στο εσωτερικό του πάχους του τόξου".



Εικόνα 4.9 - Κανόνας διαστασιολόγησης Claude Antoine Couplet. Η χορδή του μισού εξωραχίου θα πρέπει να μην τέμνει το εσωράχιο

Ο Belidor στο έργο του "La science des Ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile" (1729) βασίζεται στην θεώρηση του De la Hire και δίνει απλοποιημένους τρόπους υπολογισμού του "μεγέθους των βάθρων για κάθε τύπο τόξου" απευθυνόμενος ακόμα και σ' αυτούς "που δεν ξέρουν άλγεβρα" πιστός στον εκλαϊκευτικό και τεχνικό χαρακτήρα της πραγματείας του. Για μικρά ανοίγματα ο Belidor συνιστά τον γραφικό κανόνα που αναφέραμε στην αρχή του κειμένου.

Το πρώτο βιβλίο περί γεφυρών, το οποίο απευθύνεται σε επαγγελματίες, "Traite des Ponts", γράφτηκε το 1727 από τον H. Gautier, μηχανικό του Corps des Ponts et Chaussées. Στο πρώτο του μέρος, αναφέρεται ένας κατάλογος διάσημων γεφυρών και τα υποδείγματα των Alberti και Palladio, εξηγούνται διάφοροι τεχνικοί όροι και οι κανονισμοί του "Σώματος των Μηχανικών". Περιλαμβάνονται, επίσης, υποδείγματα προϋπολογισμού και η μέθοδος του Vauban για τον υπολογισμό τοίχων αντιστήριξης. Παρ' όλο που πίστευε στην εφαρμογή των μηχανικών μεθόδων έβρισκε την θεωρία του De la Hire πολύπλοκη για τον μηχανικό της πράξης και συνιστούσε γραφικές μεθόδους για τον υπολογισμό των βάθρων κλπ.



pl. GAUTIER, *Traité des ponts* [1726], rééd. 1765, frontispice.

Εικόνα 4.10 - Το εξώφυλλο του βιβλίου του H. Gautier

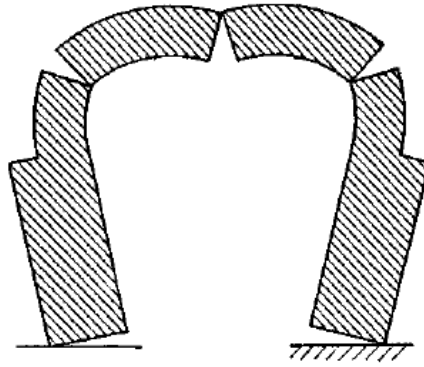
Το 1734 ο Fierté Bouguer παρουσιάζει στην Γαλλική Ακαδημία Επιστημών το πρώτο μνημόνιο που ασχολείται με τους τρούλους. Το κύριο αποτέλεσμα της δουλειάς του Bouguer είναι ότι γενίκευσε στο χώρο μια ιδιότητα των τόξων ήδη γνωστή στους επιστημονικούς κύκλους. Το 1704 ο Giacomo Bernoulli είχε αποδείξει ότι ένα τόξο με μορφή σχοινοειδούς ή αλυσσοειδούς καμπύλης ανεστραμμένο αντέχει το ίδιο βάρος του όποιο και αν είναι το πάχος του. Ήταν λογικό να υποθέσει κανείς ότι αυτή η ιδιότητα θα ίσχυε και για τρούλους που προκύπτουν από την περιστροφή περί κατακόρυφο άξονα μιας κατάλληλα διατεταγμένης καμπύλης. Η μορφή του τρούλου που συνιστά ο Bouguer είναι εκείνη ενός ομογενούς πανιού που κρέμεται από ένα οριζόντιο κύκλο. Αναζητεί και εκφράζει αναλυτικά την ιδανική καμπύλη για την δημιουργία θόλου εκ περιστροφής και αποδεικνύει ότι κάθε άλλη καμπύλη, που ξεκινώντας από την ίδια κατακόρυφο απομακρύνεται περισσότερο από τον άξονα έχοντας κατά συνέπεια λιγότερο κοίλη μορφή, μπορεί να δώσει εκ περιστροφής την επιφάνεια ενός επίσης ισορροπημένου θόλου.

Μετά το 1770 η θεωρία για τα τόξα και τους θόλους παίρνει ένα χαρακτήρα περισσότερο ακαδημαϊκό, γίνεται αντικείμενο μελέτης επιφανών μαθηματικών που συχνά φαίνονται να διασκεδάζουν, επιδεικνύοντας ατελείωτους αλγόριθμους και περίπλοκες υποθέσεις όπως το έργο του Bossut στη Γαλλία και στη συνέχεια του Mascheroni και του Salimbeni στην Ιταλία. Το κατασκευαστικό πρόβλημα και η ανάγκη πρακτικής εφαρμογής ξεχνιούνται για χάρη της λεπτόλογης αναλυτικής επεξεργασίας που εξαφανίζει το θέμα των τόξων και των θόλων αντικαθιστώντας το από το πρόβλημα των ελαστικών καμπυλών και των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων.

Σοβαρό βήμα στην κατανόηση της λειτουργίας των τόξων αποτελεί η εργασία του Charles Coulomb "Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture" που παρουσιάστηκε στην Βασιλική Ακαδημία Επιστημών της Γαλλίας το 1773. Σε αυτήν ο Coulomb, αφού εξετάζει τα τόξα των οποίων οι αρμοί δεν έχουν τριβή και συνοχή, προχωρεί στην εξέταση της "ισορροπίας των τόξων με συνυπολογισμό της τριβής και της συνοχής". Ο Coulomb όχι μόνο εμπλουτίζει το υπολογιστικό μοντέλο με παραμέτρους που προσεγγίζουν καλύτερα την φυσική και πειραματική πραγματικότητα, αλλά αλλάζει και το αντικείμενο της έρευνας: από την αναζήτηση της ιδεώδους καμπύλης σχεδιασμού στον προσδιορισμό των δυνάμεων που επενεργούν σε μια δεδομένη μορφή τόξου.

Για την έρευνά του ο Coulomb θεωρεί τέσσερις οριακές καταστάσεις θραύσης για τις οποίες συντάσσει εξισώσεις (δύο ολίσθησης των λίθων κατά μήκος του αρμού και δύο περιστροφής περί σημείο του εσωραχίου και του εξωραχίου). Η θέση της θραύσης γίνεται πρόβλημα αναζήτησης μεγίστων και ελαχίστων των εξισώσεων στις οποίες καταλήγει για τις οποίες συνιστά επίλυση με διαδοχικές δοκιμές. Η όλη ανάλυση καταρρίπτει την αντίληψη ότι η θραύση θα συμβεί σε αρμό με κλίση 45 μοιρών και χωρίς να το θεμελιώνει αναλυτικά καταλήγει ότι η θραύση ενός τόξου σε τέσσερα μέρη είναι πιθανότερη από ότι σε τρία μέρη σύμφωνα με την θεώρηση του De La Hire.

Η παρατήρηση αυτή ώθησε τον Mascheroni να εγκαταλείψει την θεώρηση του τόξου σαν σφήνας που ωθεί τα αντερείσματα της και να διατυπώσει αναλυτικές σχέσεις για τον κινηματικό μηχανισμό κατάρρευσης που αντιπροσωπεύει το παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.11 - Θραύση τόξου σε τέσσερα μέρη

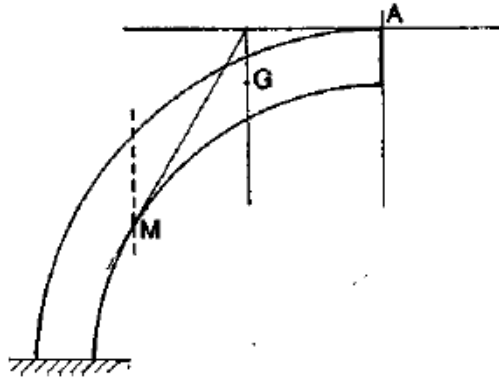
Τα πειραματικά δεδομένα του Danisy στην Ακαδημία του Montpellier είχαν καταδείξει ήδη από το 1732 πόσο προβληματική ήταν η υπόθεση της θραύσης του τόξου σε τρία μέρη σύμφωνα με την θεώρηση της σφήνας. Ωστόσο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται από τους μεγάλους μηχανικούς της εποχής όπως ο Perronet και ο Chezy οι οποίοι όμως διορθώνουν την πιθανή θέση θραύσης από τις 45° στις 60° μοίρες. Οι εργασίες του Gauthey πάνω στις βλάβες που παρουσίασε ο θόλος του Πάνθεου στο Παρίσι (1800) και οι παρατηρήσεις του Αρχιμηχανικού της "Ponts et Chaussées" Boistard θα εδραιώσουν την αντίληψη της θραύσης των τόξων από περιστροφή σε τέσσερα μέρη.

Ο μεγαλύτερος γεφυροποιός του τέλους του 18ου αιώνα ήταν ασφαλώς ο Jean Rodolphe Perronet. Ιδρυτής της Ecole des ponts et Chaussées, κατασκεύασε αρκετές γέφυρες στο Παρίσι με πιο διάσημη την γέφυρα του Neuilly. Το 1782 τύπωσε το Description des Projets όπου ανέλυε μερικά από τα έργα του. Περιέγραψε με μεγάλη λεπτομέρεια και με ακριβή σχέδια την κατασκευή της γέφυρας του Neuilly. Ο Perronet βασιζόταν βασικά στην εμπειρία την οποία θεωρούσε πιο αξιόπιστη από την γεωμετρία και έδινε μεγάλη σημασία στην συστηματοποίηση της κατασκευής. Το βιβλίο του δεν είναι μια αναλυτική πραγματεία για την κατασκευή των γεφυρών αλλά περισσότερο μια προσπάθεια διδασκαλίας μέσα από παραδείγματα. Δεν αγνοούσε τα μηχανικά προβλήματα αλλά η προτίμηση του στα χαμηλά τόξα, με δεδομένες τις μεγαλύτερες ωθήσεις που εξασκούν στα βάθρα, και η μείωση των μεσόβαθρων από το ένα πέμπτο του ανοίγματος στο ένα ένατο περίπου φαίνεται να βασίζονται σε εμπειρικές και όχι αναλυτικές σχέσεις.

Την έρευνα του Coulomb συνεχίζει ο στρατιωτικός μηχανικός Audoy και προσπαθεί να δώσει αναλυτικά σχέσεις εύχρηστες για τους αξιωματικούς του μηχανικού και του πυροβολικού της Metz (1820). Προσπαθεί να προσδιορίσει τις θέσεις θραύσης που αντιστοιχούν στο μέγιστο της οριζόντιας ώθησης στην κλείδα, στην οριακή κατάσταση ισορροπίας από κύλιση ή περιστροφή.

Στην ίδια κατεύθυνση κινείται και η έρευνα των Lamé και Clapeyron που πραγματοποιήθηκε στη Ρωσία το 1823 με την ευκαιρία της ανακατασκευής της εκκλησίας του Αγίου Ισαάκ στην Πετρούπολη. Το μοντέλο που μελετούν είναι η θραύση των κυλινδρικών θόλων σε τέσσερα μέρη μόνο από περιστροφή χωρίς ολίσθηση και προσδιορίζουν τις θέσεις θραύσης και την μέγιστη ώθηση με αποτελέσματα ανάλογα του Audoy. Καταλήγουν στην παρακάτω πρόταση - θεώρημα για την οποία δίνουν και μια μέθοδο γραφικής κατασκευής: "Το σημείο θραύσης στο εσωράχιο θα είναι τέτοιο ώστε η εφαπτόμενη του θα συναντά την οριζόντια που περνά από την κορυφή του εξωραχίου πάνω στην κατακόρυφο που άγεται από το κέντρο βάρους του ανωτέρου τμήματος ημιτόξου που ορίζει το σημείο θραύσης".





Εικόνα 4.12 - Σημείο θραύσης κατά το θεώρημα των Lamé και Clapeyron

Την θεώρηση αυτή επέκτειναν και στους τρούλους υποθέτοντας τον χωρισμό τους με κάθετους μεσημβρινούς και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι "σε ομοίους θόλους η θέση των σημείων θραύσης δεν εξαρτάται από τις απόλυτες διαστάσεις αλλά είναι συνάρτηση μόνο του λόγου μεταξύ του εσωραχίου και του εξωραχίου, πράγμα που βοήθησε στην πινακοποίηση των επιλύσεων.

Ο Emiland Marie Gauthey, Αρχιτέκτονας και επιθεωρητής του Σώματος Ponts et Chaussées ήταν θείος και δάσκαλος του Navier. Το βασικό του έργο *Traite de la Construction des Ponts* συμπληρώθηκε και εκδόθηκε από τον Navier από το 1809 ως το 1813. Στην πραγματεία του αυτή ο Gauthey κριτικάροντας τους προηγούμενους συγγραφείς, Perronet, ότι έδωσαν απλά παραδείγματα κατασκευών, προσπάθησε να δώσει τις γενικές αρχές του σχεδιασμού των γεφυρών. Πίστευε ότι τίποτα σε μια γέφυρα δεν θα έπρεπε να είναι αυθαίρετο, συμβολικό και έξω από την μαθηματική ανάλυση. Όλοι οι παράγοντες που καθορίζουν τον σχεδιασμό μιας γέφυρας πρέπει να υπόκεινται σε μαθηματικούς κανόνες. Σύμφωνα με την ανάλυση του πέντε βασικοί παράγοντες έπρεπε να λαμβάνονται υπ' όψη: 1) η εκλογή της θέσης, 2) η παροχή του ποταμού, 3) η μορφή των τόξων, 4) οι διαστάσεις των τόξων και 5) το πλάτος της γέφυρας.

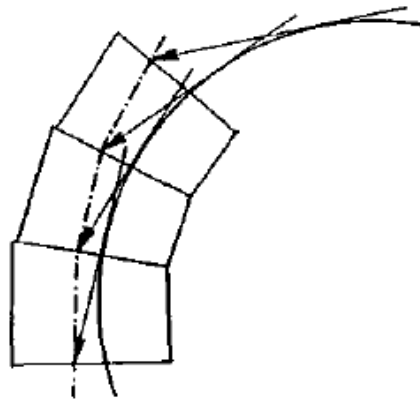
Όλοι αυτοί η παράγοντες ήταν οι μεταβλητές που έπρεπε να συντεθούν κατά ορθολογικό τρόπο στα πλαίσια ενός μαθηματικού τύπου για να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Στο πρόβλημα του καθορισμού των διαστάσεων των βάθρων, ο Cauthey υιοθέτησε την λύση του Coulomb που λάμβανε υπ' όψη του την τριβή για τον υπολογισμό της ώθησης και έδωσε μαθηματικούς τύπους που ποσοτικοποιούσαν κάθε πλευρά της κατασκευής, αποκλείοντας έτσι κάθε υποκειμενισμό στην αντιμετώπιση των προβλημάτων.

Τον 19ο αιώνα έχουμε μια σταδιακή στροφή στον τρόπο αντιμετώπισης του θέματος σαν συνέπεια της ανάπτυξης της επιστήμης της μηχανικής και ιδιαίτερα της θεωρίας της ελαστικότητας. Το θεωρητικό μοντέλο του συστήματος των στερεών και απαραμόρφωτων μελών του τόξου εγκαταλείπεται σιγά-σιγά, έχοντας δώσει ότι μπορούσε στην περιγραφή του φαινομένου, και αντικαθίσταται από την θεωρία της ελαστικής ράβδου με καμπύλο άξονα και την θεωρία των κελυφών και των μεμβρανών.

Η ασάφεια που διακρίνει τις θεωρίες που αναφέραμε παραπάνω είναι σήμερα προφανής αν σκεφτούμε το μοντέλο του αμφίπακτου ελαστικού τόξου που, ως υπερστατικός φορέας, δεν είναι δυνατόν να επιλυθεί μόνο με τις βασικές εξισώσεις ισορροπίας της στατικής. Έτσι είναι φυσικό που οι προηγούμενες θεωρίες δεν μπόρεσαν να προσδιορίσουν με σαφή τρόπο ούτε τον ακριβή μηχανισμό θραύσης -τις θέσεις που αυτή θα συμβεί για δεδομένη φόρτιση- ούτε την ακριβή θέση εφαρμογής της ώθησης στην κλείδα του τόξου.

Ο Luis Navier ασχολήθηκε σε αρκετές του εργασίες με την στατική του τόξου. Παραδείγματα αποτελούν τόσο οι σημειώσεις του πάνω στο "Science des Ingénieurs" του Belidor, όσο και στα σχόλια του στο "Traite de la construction des ponts" του Gauthey, όσο και οι δικές του παραδόσεις στην Ecole des Ponts et Chaussées που εκδόθηκαν το 1826 με τον τίτλο "Résumé des leçons sur l'application de la mécanique". Σ' αυτές ο Navier εισάγει την έννοια της τάσης που κατανέμεται σε κάθε σημείο μιας διατομής. Παίρνει υπόψη του τη θλιπτική αντοχή του υλικού και θεωρεί οριακή κατάσταση την ανάπτυξη των οριακών τάσεων που μπορεί να φέρει το υλικό, άρα, θεωρεί στις κρίσιμες διατομές τριγωνική κατανομή των θλιπτικών τάσεων. Με τον τρόπο αυτό και αγνοώντας τις διατμητικές τάσεις και την παραμόρφωση υπολογίζει την οριζόντια ώθηση που αναπτύσσεται στην κλείδα του τόξου ελαφρά μεγαλύτερη από αυτήν που προκύπτει από την θεώρηση της ισορροπίας του απολύτως στερεού και άπειρης αντοχής σώματος.

Μερικά χρόνια μετά, το 1831, εμφανίζεται το έργο του F.J.Gerstner "Handbuch der Mechanik", όπου εισάγονται για πρώτη φορά δυο έννοιες που στην συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν αρκετά συχνά στην μελέτη του τόξου: η καμπύλη της αντοχής και η καμπύλη των πιέσεων. Η πρώτη είναι το πολύγωνο που ενώνει τα σημεία εφαρμογής της πίεσης στις διάφορες διατομές του τόξου που με πολλαπλασιασμό των τομών μεταπίπτει σε καμπύλη. Η δεύτερη είναι η καμπύλη που εφάπτεται στις γραμμές επενέργειας των δυνάμεων αυτών.



Εικόνα 4.13 - Καμπύλη αντοχής και καμπύλη πιέσεων

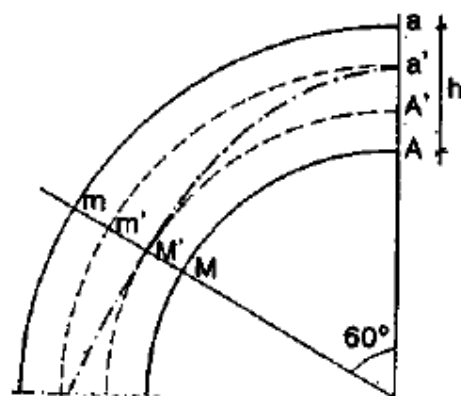
Για να υπάρχει ισορροπία θα πρέπει η καμπύλη της αντοχής να περνά από το εσωτερικό του τόξου. Αν τέμνει το εξωράχιο κάτω από μια ορισμένη γωνία η θραύση επίκειται στην αντίστοιχη θέση. Αν αντίθετα εφάπτεται σε ένα από τα όρια η περιστροφή των μελών του τόξου επίκειται και αντιστοιχεί σε μια κατάσταση ισορροπίας που μόνο άπειρης αντοχής υλικό θα μπορούσε να φέρει. Από την άλλη μεριά η γωνία με την οποία η καμπύλη των πιέσεων τέμνει τους αρμούς θα πρέπει να συσχετισθεί με την γωνία τριβής: αν απέχει πολύ από την ορθή τότε είναι πιθανή η ολίσθηση.

Ο Gerstner αντιλαμβάνεται ότι είναι δυνατόν να χαραχθούν άπειρες καμπύλες πίεσεως από διάφορα σημεία της κλείδας που να είναι εφαπτόμενες σε διάφορα σημεία του περιγράμματος και να ικανοποιούν κατά συνέπεια τις συνθήκες ισορροπίας. Το πρόβλημα είναι βέβαια ποια από όλες είναι η πραγματική. Στο ερώτημα αυτό ο Gerstner δεν απαντά σωστά εξ' αιτίας του υπερστατικού χαρακτήρα του προβλήματος. Η ασάφεια που απορρέει από την υπερστατικότητα του προβλήματος αποτέλεσε ένα παράδοξο για τους μηχανικούς της εποχής που δεν μπορούσαν να δεχθούν ότι στην περίπτωση ενός στερεού συστήματος παύει να ισχύει η βασική αρχή της φυσικής για την αμφίδρομη σχέση μεταξύ αιτίων και

αποτελέσματος. Έτσι προσπάθησαν να βρουν άλλο ένα στατικό κριτήριο για να άρουν την αβεβαιότητα. Στην αρχή η προσπάθεια στράφηκε στην αναζήτηση κάποιου στατικού κριτηρίου μεγίστων και ελαχίστων που, αν και σε λάθος κατεύθυνση, οδήγησε μετά από πολλές προσπάθειες στην εισαγωγή των ενεργειακών κριτηρίων, με το κριτήριο της ελάχιστης δυνατής ελαστικής ενέργειας που οφείλεται στον Federico Menabrea (1858).

Στο πρόβλημα του τόξου ήταν ο H. Moseley αυτός που προσπάθησε να βρει μια λύση βασισμένη πάνω στη θεωρία των μεγίστων και ελαχίστων. Το 1839 υποστηρίζει ότι απ' όλες τις δυνατές καμπύλες αντοχής που μπορούν να χαραχθούν από ένα σημείο της διατομής στη θέση της κλείδας, η πραγματική περνά από το εξωράχιο της διατομής της κλείδας και είναι εφαπτόμενη στο εσωράχιο κάνοντας ελάχιστη την τιμή της οριζόντιας ώθησης.

Στην κατεύθυνση του Moseley και των παρατηρήσεων του Navier κινείται και η εργασία του E. Mery "Sur l' équilibre des vouûtes en berceau " (1840) όπου δίνει μια πρακτική μέθοδο που χρησιμοποιείται ακόμα για μικρά τόξα. Η ώθηση κατά τον Mery υπολογίζεται με την παραδοχή ότι δεν θα αναπτυχθούν τάσεις ελκυσμού σε καμία διατομή του τόξου. Αυτό σημαίνει ότι η καμπύλη της αντοχής, που ονομάζεται πια από τον Mery καμπύλη των πιέσεων, θα πρέπει να βρίσκεται στο εσωτερικό της περιοχής που ορίζουν οι καμπύλες που ενώνουν τα διαδοχικά σημεία που τριχοτομούν τις διατομές (αυτό που σήμερα ονομάζουμε πυρήνα της διατομής). Απ' όλες τις καμπύλες πιέσεως που βρίσκονται στο "μεσαίο τρίτο " ο Mery συστήνει να υιοθετηθεί αυτή που περνά από το έξω όριο της διατομής στην κλείδα και το έσω όριο της διατομής θραύσης που για κυκλικό τόξο ο Mery την ορίζει στις 60 μοίρες από την κλείδα. Έτσι η καμπύλη των πιέσεων είναι ορισμένη, σύμφωνα με τις αρχές της "Γραφοστατικής". Αρκεί να χαραχθεί η σχοινοκαμπύλη των δυνάμεων που είναι εφαρμοσμένες στο τόξο, η οποία να περνά από τρία γνωστά σημεία.



Εικόνα 4.14 - Καμπύλη πιέσεων στο μεσαίο τρίτο της διατομής του τόξου

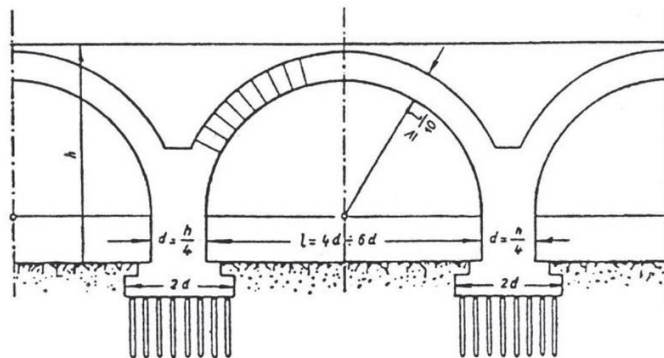
Στο σημείο αυτό εξαντλείται η σύντομη αυτή ανασκόπηση μια που στο δεύτερο μισό του 1800 μπαίνουν σε εφαρμογή σύγχρονες θεωρίες της στατικής. Το 1864 κυκλοφορεί ο πρώτος τόμος της Graphische statik του K.Culmann που δίνει σαφή γραφική λύση σε αρκετά προβλήματα ανάλυσης φορέων. Κυρίως έχουμε την ανάπτυξη της θεωρίας της ελαστικότητας που θα επιλύσει και την περίπτωση του τόξου σαν μια απλή εφαρμογή της ελαστικής δοκού με καμπύλο άξονα. Η δικαιολογημένη αντίρρηση που μπορεί να έχει κανείς, αν στην περίπτωση των λίθινων τόξων η εξομοίωση με την καμπύλη ελαστική δοκό είναι επιτρεπτή, δεν θεμελιώνεται από πολλαπλά πειράματα (Winkler 1858, Perrodil 1882, Αυστριακοί Μηχανικοί 1895,1901) που αποδεικνύουν ότι η θεωρία της ελαστικής δοκού δίνει αρκετά ακριβή αποτελέσματα και στην περίπτωση των λίθινων τόξων.

#### 4.2 – Κανόνες Σχεδιασμού κατά τον 18<sup>ο</sup> αιώνα - Η Συμβολή του Perronet

Ακολουθούν στοιχεία που αντλήθηκαν από την δημοσίευση του Santiago Huerta, “Arch bridge design in eighteenth-century France: The rule of Perronet”:

Ο σχεδιασμός λιθόδητων κατασκευών έως τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα γινόταν μέσω εμπειρικών μεθόδων, με βάση προκαθορισμένες αναλογίες των δομικών μελών, ανεξαρτήτως του μεγέθους της κατασκευής. Τον 18<sup>ο</sup> αιώνα και συγκεκριμένα το 1717, ο Henri Gautier πρότεινε πρώτος την χρήση μη αναλογικών κανόνων στον σχεδιασμό των τόξων, ωστόσο η πρόταση του ήταν αρκετά συντηρητική. Λίγα χρόνια αργότερα, ο J.R.Perronet προτείνει μέσα από την μελέτη περισσότερων από 200 υφιστάμενων γεφυρών μια μη αναλογική μέθοδο σχεδιασμού όσον αφορά τα δομικά μέλη ενός τόξου, η οποία λόγω της απλότητας και της αξιοπιστίας της καθίσταται κυρίαρχη τα επόμενα 100 χρόνια.

Πριν την ανάπτυξη της επιστήμης, ο σχεδιασμός των τόξων βασιζόταν σε εμπειρικούς κανόνες που προέκυπταν από την μελέτη υφιστάμενων γεφυρών και από την προσπάθεια κατανόησης της στατικής λειτουργίας τους. Για δεδομένο άνοιγμα, οι παράμετροι προς επιλογή ήταν το πάχος του τόξου, καθώς και τα πάχη των ακροβάθρων και των μεσοβάθρων. Από τις πρώτες προσπάθειες συστηματοποίησης των εμπειρικών δομικών κανόνων υπήρξε αυτή του Battista Alberti (“De re aedificatoria”, 1485), ο οποίος αναφέρει ότι η λυγηρότητα του τόξου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 15 στην περιοχή της κλείδας. Το 1570, ο αρχιτέκτονας Andrea Palladio προτείνει την κατασκευή τοξωτών γεφυρών με λυγηρότητα ίση με 17. Ο κανόνας του Alberti, αν και αρκετά συντηρητικός, ακολουθείται γενικώς μέχρι τον 18<sup>ο</sup> αιώνα, χωρίς βέβαια να υπάρχουν και εξαιρέσεις με πιο τολμηρές λυγηρότητες.



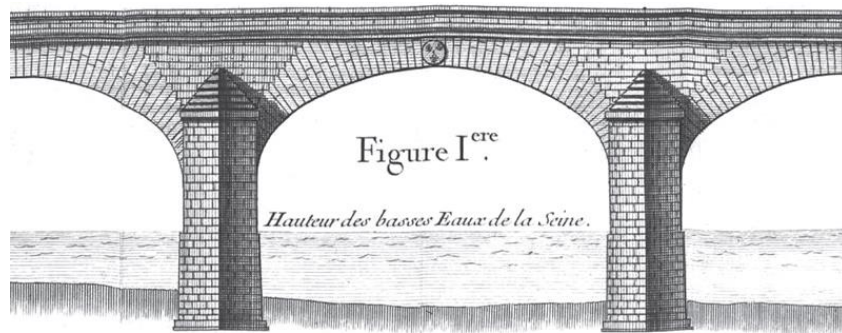
Εικόνα 4.15 - Ο κανόνας σχεδιασμού του Alberti (Straub 1952)

Το 1717, ο Henri Gautier εκδίδει την πρώτη διατριβή πάνω στις γέφυρες, όπου αναφέρει ότι η ασφάλεια των τόξων έγκειται στην γεωμετρία τους και ότι όλα τα στοιχεία των γεφυρών πρέπει να υπακούουν σε συγκεκριμένες αναλογίες αναλόγως του ανοιγμάτων τους. Για γέφυρες με ανοίγματα μεγαλύτερα των 30 ft (9.15m), προτείνει τον κανόνα 1/15 (δηλ. το πάχος του τόξου να είναι 15 φορές μικρότερο από το άνοιγμα). Ο κανόνας αυτός ωστόσο δεν εφαρμόζεται για μικρότερα ανοίγματα. Είναι έτσι η πρώτη φορά που διατυπώνεται ένας κανόνας όπου το πάχος του τόξου δεν είναι ευθέως ανάλογο του ανοιγματος. Το 1717 δημοσιεύει το “Table de proportions de toutes les parties principales des Ponts” για ημικυκλικά τόξα με ανοίγματα από 1 έως 120 πόδια (0.3 έως 36.57m), όπου για ανοίγματα μεγαλύτερα των 40 ποδιών προτείνει τον κανόνα 1/15, ενώ για μικρότερα ανοίγματα προτείνει  $t = s/24 + 1$  (σε πόδια, όπου  $s$ : άνοιγμα και  $t$ : πάχος τόξου).

Ωστόσο, λίγα χρόνια αργότερα κάνει την εμφάνισή του ο Jean Rodolphe Perronet, ο οποίος θεωρείται από τους σημαντικότερους μηχανικούς του 18<sup>ου</sup> αιώνα και του οποίου το έργο είχε

ιδιαίτερη απήχηση μέχρι τα μέσα του 19<sup>ου</sup>. Το 1748, ένα χρόνο αφότου αναλαμβάνει διευθυντής του École des Ponts et Chaussées, δημοσιεύει απομνημονεύματα του με τίτλο “Mémoire sur l'épaisseur que doivent avoir les voussoirs à la clef, dans les différentes voûtes des Ponts”, όπου αναφέρει ότι το πάχος του τόξου πρέπει να προκύπτει αναλόγως με το άνοιγμα, σύμφωνα με παραδοσιακούς παλαιούς κανόνες. Το πρόβλημα είναι να βρεθεί ένας κανόνας που θα συνδέει τις διάφορες παραμέτρους με το μέγεθος και την μορφή του τόξου. Είναι, συνεπώς, η πρώτη φορά που η μορφή του τόξου φαίνεται να επηρεάζει την εκλογή των παραμέτρων των δομικών μερών του.

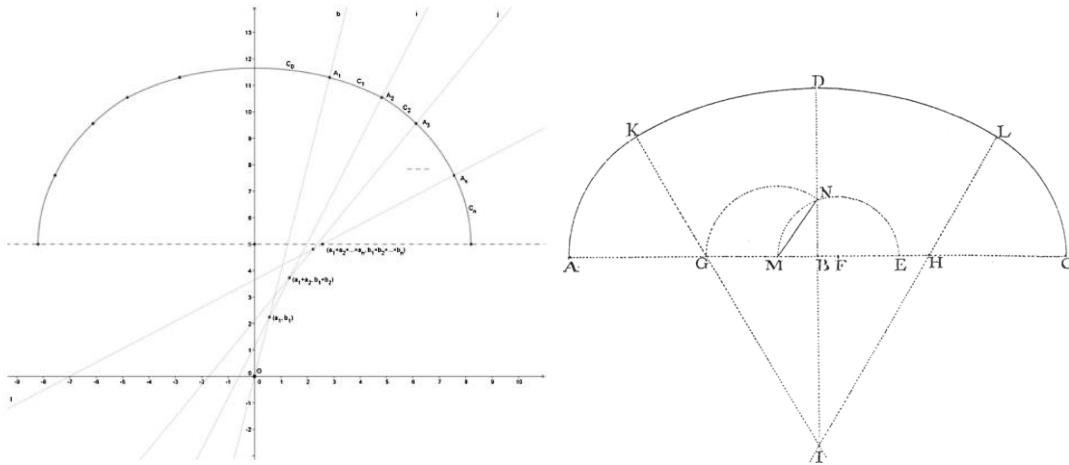
Ο Perronet παρατηρώντας ύστερα από μελέτη πλέον των διακοσίων παλαιών και νεότερων τόξων την μεγάλη διασπορά που αυτά παρουσίαζαν ως προς την αναλογία του πάχους του τόξου και του ανοίγματος, καταλήγει στις εξής προτάσεις για ημικυκλικά και καταβιβασμένα τόξα: Για ημικυκλικά προτείνει  $t=s/24+1-s/144$  (σε πόδια), με την επιρροή από την σχέση του Gautier να είναι εμφανής, διορθώνοντας τον τύπο μέσω ενός τρίτου όρου. Όσον αφορά στα καταβιβασμένα τόξα, οι υφιστάμενες περιπτώσεις που εξέτασε ο Perronet αφορούσαν παραδείγματα του πρώτου μισού του 18ου αιώνα. Η κυρίαρχη μορφή καταβιβασμένων τόξων που επικρατούσε ήταν η οβάλ χάραξη, καθώς αυτή καθίστατο ευμενέστερη για λόγους ναυσιπλοΐας στα ποτάμια. Υπάρχουν ωστόσο πολλοί τρόποι να κατασκευαστεί ένα καταβιβασμένο οβάλ τόξο.



Εικόνα 4.16 - Κεντρικό καταβιβασμένο άνοιγμα της γέφυρας Pont Royal στο Παρίσι, σχεδιασμένη το 1685 από τον J.-H. Mansard (Bilidor 1753)

Το 1726, ο Henri Pitot, δημοσίευσε μια μέθοδο κατασκευής οβάλ τόξου, η οποία έγινε κατά βάση κανόνας στην κατασκευή καταβιβασμένων τόξων τα επόμενα χρόνια. Ο Pitot πρότεινε την κατασκευή καταβιβασμένων τόξων τριών κέντρων με επίκεντρες γωνίες 60°. Η συγκεκριμένη μορφή χάραξης είναι και αυτή στην οποία αναφέρεται ο Perronet στο έργο του λίγα χρόνια αργότερα και για την οποία προτείνει την εκλογή του πάχους του τόξου ως εξής:  $t=2R/24+1-s/144$  (σε πόδια, όπου R η ακτίνα καμπυλότητας στην κλείδα).





Εικόνες 4.17-4.18 - Αριστερά: Καταβιβασμένο οβάλ τόξο  $n+1$  κέντρων, Δεξιά: Καταβιβασμένη χάραξη τριών κέντρων μετά τον Pitot (Perronet 1748)

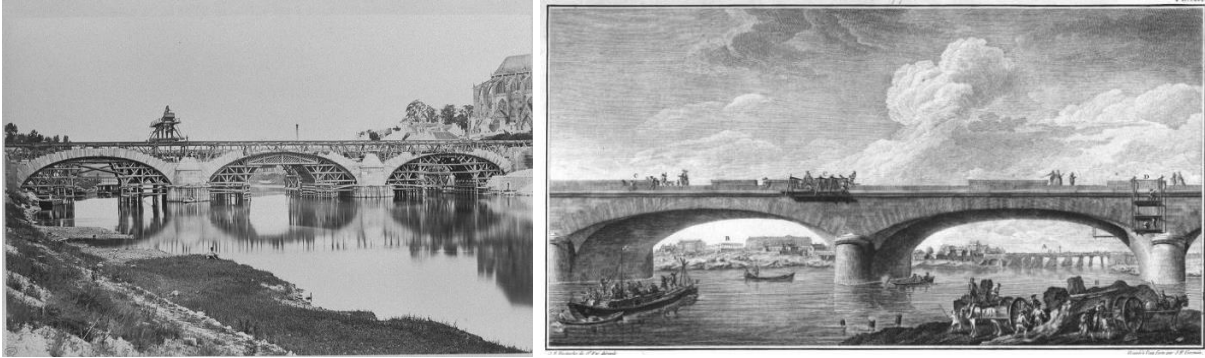
Το 1777, ο Perronet, σε σημειώσεις του, προτείνει για καταβιβασμένα τόξα τριών κέντρων (σύμφωνα με την μέθοδο του Pitot δηλαδή) πάχος τόξου  $t=s/24$ , αναγνωρίζοντας ότι οι κανόνες που είχε προηγουμένως προτείνει είναι συντηρητικοί. Τον ίδιο κανόνα προτείνει και ο Gauthey το 1800 για τόξα ανοίγματος έως 32 μέτρων, ενώ για μεγαλύτερα προτείνει  $t=32/24+(s-32)/48$ . Οι κανόνες του Perronet και του Gauthey ακολουθούνται γενικώς μέχρι το 1850.

Τα χρόνια που ακολουθούν βλέπουμε ότι οι λυγηρότητες που προτείνονται για τα τόξα τείνουν να γίνονται όλο και πιο τολμηρές. Το 1845 ο Dejarl προτείνει για ημικυκλικά τόξα  $t=0.30+s/20$  (σε μέτρα), και για καταβιβασμένα (οβάλ τριών κέντρων)  $t=0.30+s/40$  (σε μέτρα). Ενδεικτικά, από το 1850 και μετά παρατίθενται οι εξής τύποι υπολογισμού πάχους του τόξου:

Τα χρόνια που ακολουθούν βλέπουμε ότι οι λυγηρότητες που προτείνονται για τα τόξα τείνουν να γίνονται όλο και πιο τολμηρές. Το 1845 ο Dejarl προτείνει για ημικυκλικά τόξα  $t=0.30+s/20$  (σε μέτρα), και για καταβιβασμένα (οβάλ τριών κέντρων)  $t=0.30+s/40$  (σε μέτρα). Ενδεικτικά, από το 1850 και μετά παρατίθενται οι εξής τύποι υπολογισμού πάχους του τόξου:

- Lesguillier (1855) -  $t=0.1+0.2\sqrt{s}$  (σε m)
- Trautwine (1860) -  $t=0.36\sqrt{R}$  (σε ft)
- Rankine (1862) -  $t=v(0.12s)$  (σε ft)
- Dupuit (1870) -  $t=0.2\sqrt{s}$  (σε m)
- Croizette (1885) -  $t=0.15+0.15\sqrt{2R}$  (σε m)

Ακολουθούν ενδεικτικές φωτογραφίες από χαρακτηριστικές γέφυρες του Perronet στο Παρίσι. Παρατηρείται ότι πρόκειται για γέφυρες με καταβιβασμένες χαράξεις. Σημειώνεται ότι οι γέφυρες της Mantes και της Neuilly δεν σώζονται πλέον, καθώς η πρώτη καταστράφηκε κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, ενώ η δεύτερη κατεδαφίστηκε το 1936.



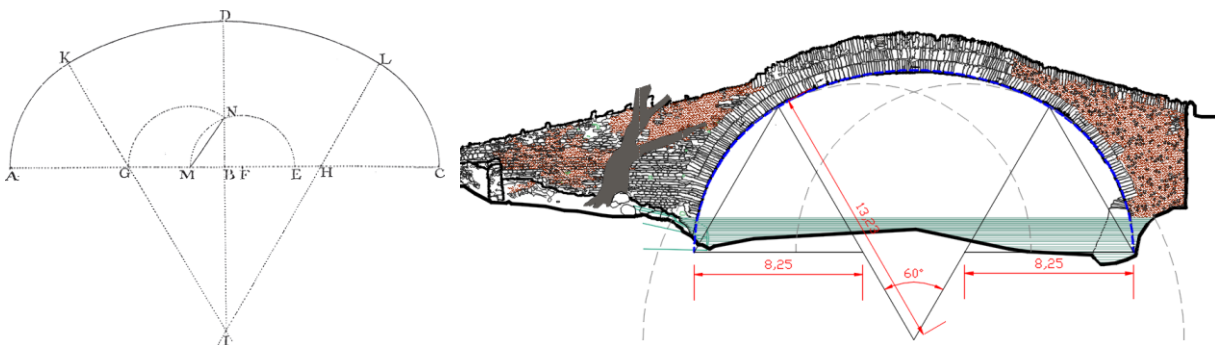
Εικόνες 4.19-4.20 - Αριστερά: Pont de Mantes (1757-1768), Δεξιά: Pont de Neuilly (1768-1774)



Εικόνες 4.21-4.22 - Αριστερά: Pont de Brunoy (1784-1787), Δεξιά: Pont de Concord (1787-1791)

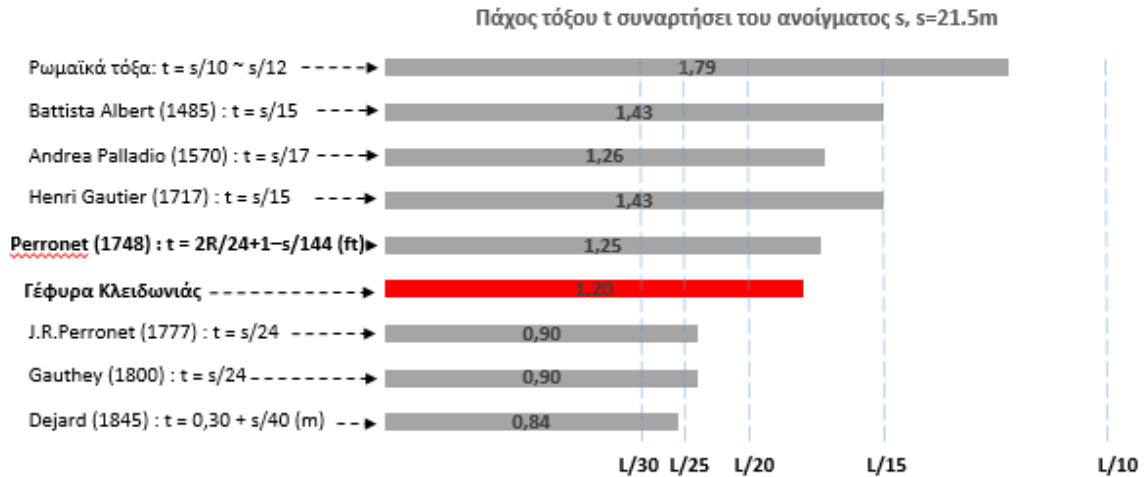
### 4.3 - Συμπεράσματα

Από τη διερεύνηση της χάραξης του τόξου της γέφυρας της Κλειδωνιάς (βλ. §2.3), προκύπτει μια καταβιβασμένη χάραξη τριών κέντρων που αποτελεί μια από τις πρώτες προσπάθειες γεφύρωσης με καταβιβασμένο τόξο στον Ελλαδικό χώρο. Η συγκεκριμένη μορφή χάραξης είναι ωστόσο αρκετά διαδεδομένη στην Ευρώπη και ιδιαίτερα στην Γαλλία, όπου εμφανίζεται πληθώρα καταβιβασμένων γεφυρών και δη χάραξης τριών κέντρων ήδη αρκετούς αιώνες πριν την κατασκευή της γέφυρας της Κλειδωνιάς. Επιπλέον, όπως επισημαίνεται στο παραπάνω υποκεφάλαιο, τα καταβιβασμένα τόξα τριών κέντρων μελετήθηκαν ιδιαίτερα από τον Γάλλο μηχανικό J.R.Perronet, ο οποίος εξέδωσε κανόνες σχεδιασμού αποκλειστικά για τόξα αυτής της μορφής στα μέσα του 18<sup>ου</sup> αιώνα.



Εικόνες 4.23-4.24 - Αριστερά: Καταβιβασμένη χάραξη τριών κέντρων μετά τον Pitot (Perronet 1748), Δεξιά: Θεωρητική χάραξη του τόξου της γέφυρας της Κλειδωνιάς

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται με χρονολογική σειρά το πάχος τόξου που θα προέκυπτε για άνοιγμα  $s=21.5m$  (όσο δηλαδή το άνοιγμα τόξου της γέφυρας της Κλειδωνιάς) σύμφωνα με τους ανάλογους κανόνες σχεδιασμού που προτάθηκαν διαχρονικά (βλ. §4.2). Είναι εμφανές ότι, καθώς περνούν τα χρόνια, οι προτεινόμενοι κανόνες σχεδιασμού οδηγούν σε μικρότερα πάχη τόξων, δηλαδή σε πιο τολμηρά τόξα με μεγαλύτερες λυγηρότητες.



Παρατηρούμε ότι το πραγματικό πάχος του τόξου της γέφυρας της Κλειδωνιάς ( $t=1.20m$ ) σχεδόν ταυτίζεται με το πάχος που προτείνει ο Perronet στους κανόνες σχεδιασμού για τα καταβιβασμένα τόξα που μελέτησε ( $t_{Per.}=1.25m$ ). Με άλλα λόγια, η λυγηρότητα του τόξου της γέφυρας είναι  $\lambda=17.2$  ενώ η λυγηρότητα που προκύπτει από την εφαρμογή του κανόνα του Perronet είναι  $\lambda_{Per}=17.9$ .

Συνεπώς, καθώς η μορφή του τόξου της γέφυρας της Κλειδωνιάς και η λυγηρότητά της ταυτίζονται με τις καταβιβασμένες χαράξεις που μελέτησε ιδιαίτερα ο Perronet και με τους κανόνες σχεδιασμού που εξέδωσε γι' αυτές αντίστοιχα, μπορούμε να εικάσουμε ότι η γέφυρα της Κλειδωνιάς έχει επηρεαστεί από τα συμβαίνοντα σε αυτόν τον τομέα στην Ευρώπη, και ιδιαίτερα στη Γαλλία.

## 5 - Μνημεία Συγκριτικής Θεώρησης - Επιλογή Εναλλακτικών Χαράξεων

Η γέφυρα της Κλειδωνιάς είναι μια από τις πολυάριθμες γέφυρες της Ηπείρου, οι οποίες αποτελούν δείγματα του πολιτισμού, της λαϊκής αρχιτεκτονικής, καθώς και της υψηλής τεχνικής γνώσης των πρωτομαστόρων της περιοχής. Η φήμη των Ηπειρώτικων γεφυριών είναι γνωστή τόσο στην Ελλάδα όσο και στα Βαλκάνια, ενώ περίπου 50 από αυτά έχουν κηρυχθεί ιστορικά διατηρητέα μνημεία. Η ύπαρξη πλήθους λίθινων γεφυρών στην ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου οφείλεται στο έντονο ανάγλυφο του τόπου, το οποίο δυσχέρανε τις μετακινήσεις και καθιστούσε αναγκαία την κατασκευή τους, καθώς και στην οικονομική επιφάνεια των διαβιούντων σε αυτήν. Η ονομασία τους συνήθως προέρχεται από το όνομα του χορηγού της κατασκευής ή της επισκευής τους. Άλλες φορές, τα ονόματα προέρχονταν από το ρέμμα που γεφύρωναν, από την περιοχή όπου ήταν κατασκευασμένα ή από τα ονόματα γειτονικών μύλων.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια ενδεικτική αναφορά σε σημαντικές λίθινες γέφυρες της Ηπείρου, ώστε να επισημανθεί ένα σύνολο λίθινων γεφυρών της εποχής, μέρος του οποίου αποτελεί και η γέφυρα της Κλειδωνιάς.

### [Το γεφύρι της Κόνιτσας](#)

Το γεφύρι της Κόνιτσας χτίστηκε το 1869 (με επιδιορθώσεις λόγω μερικής κατάρρευσης το 1870-1871), με πιθανολογούμενο επικεφαλής τον Ζιώγα Φρόντζο. Η κατασκευή του έγινε με δωρεές των κατοίκων της πόλης και κυρίως του τραπεζίτη των Ιωαννίνων Ιωάννη Ζ. Λούλη, καταγόμενου από την Αετοράχη (Κοτόρτσι) των Κατσανοχωριών, ο οποίος διέθεσε περίπου τα μισά από τα 120.000 γρόσια (πολύ μεγάλο ποσό για την εποχή) που κόστισε η κατασκευή του. Βρίσκεται στην νοτιοδυτική άκρη της πόλης, ακριβώς στην είσοδο της χαράδρας του Αώου ποταμού, τον οποίο και γεφυρώνει. Πρόκειται για ένα μονότοξο λιθόκτιστο γεφύρι που διακρίνεται για το τεράστιο τόξο του καθώς θεωρείται το υψηλότερο μονότοξο των Βαλκανίων. Συγκεκριμένα, το άνοιγμα του τόξου υπολογίζεται στα 35.60 μέτρα ενώ το ύψος του φθάνει τα 19.25 μέτρα.



Εικόνα 5.1 - Το γεφύρι της Κόνιτσας



### [Το γεφύρι του Νούτσου ή Κόκκορου](#)

Σύμφωνα με τον συγγραφέα Ι.Λαμπρίδη το γεφύρι το έκτισε ο Νούτσος Κοντοδήμος προεστός του Βραδέτου το 1750. Ο ίδιος συγγραφέας αναφέρει σε άλλο του βιβλίο ότι το έκτισε ο Καπεσοβίτης Νούτσος Καραμεσίνης το 1768. Πιθανότατα το γεφύρι κτίστηκε το 1750, κάτι που επιβεβαιώνει και ο Κώστας Λαζαρίδης από την εντοιχισμένη πλάκα που υπήρχε, και ανακατασκευάστηκε το 1768. Αργότερα το επισκεύασε ο Αλέξης Νούτσος, γιός του Ν. Καραμεσίνη και γι' αυτό και ονομάζεται από αρκετούς "γεφύρι του Κυρ Αλέξη". Το 1910 έπαθε σοβαρές ζημιές οπότε έπρεπε να γίνει συντήρηση, της οποίας τα έξοδα ανέλαβαν τα γειτονικά χωριά αλλά και ο Γρηγόρης Κόκκορος από το Κουκούλι που ήταν και ο ιδιοκτήτης του γειτονικού μύλου. Έτσι από τότε επικράτησε η ονομασία "γεφύρι Κόκκορου". Βρίσκεται στα νότια του χωριού Κουκούλι στο οποίο ανήκε διοικητικά. Γεφυρώνει τον Βοϊδομάτη, στην έξοδό του προς το φαράγγι του Βίκου. Λόγω της νευραλγικής του θέσης, εξασφάλιζε την επικοινωνία των χωριών Κουκούλι, Καπέσοβο και Βραδέτο με τα Γιάννενα, μέσω της διάβασης των Ασπραγγέλων. Το άνοιγμα του τόξου είναι περίπου 23.60 μέτρα, ενώ το ύψος του φτάνει τα 13.30 μέτρα.



Εικόνα 5.2 - Το γεφύρι του Νούτσου ή Κόκκορου

### [Το γεφύρι της Πλάκας](#)

Το γεφύρι της Πλάκας βρίσκεται στον Άραχθο ποταμό, στους πρώην Δήμους Πραμάντων και Κατσανοχωριών σε απόσταση 50 χιλιομέτρων από τα Ιωάννινα και συνδέει τα Τζουμέρκα με τα Κατσανοχώρια και κατ' επέκταση τα Ιωαννίνα με την Άρτα. Στο σημείο όπου χτίστηκε το γεφύρι της Πλάκας υπήρχε μια παλαιά γέφυρα η οποία καταστράφηκε το 1860. Το 1863 ξαναχτίστηκε από την αρχή με χορηγία 30.000 γροσίων του Πραμαντιώτη ευεργέτη Δημήτριου Αρβανιτογιάννη, αλλά κατέρρευσε σχεδόν την ημέρα των εγκαινίων. Το 1866 ξαναχτίστηκε με κύρια χορηγία του τραπεζίτη των Ιωαννίνων Ιωάννη Ζ. Λούλη, καταγομένου από την Αετορράχη (Κοτόρτσι) των Κατσανοχωριών από τον πρωτομάστορα Κώστα Μπέκα. Το κόστος του χτισίματος έφτασε τα 170.000 οθωμανικά γρόσια, ποσό που καλύφθηκε από το Λούλη και από συνδρομές κατοίκων από τις γύρω κοινότητες. Το γεφύρι της Πλάκας κατέρρευσε ξανά το 2015 και επανακατασκευάστηκε το 2019, με το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο να αναλαμβάνει την έρευνα και την αποκατάσταση. Θεωρείται το μεγαλύτερο μονότοξο γεφύρι των Βαλκανίων και το τρίτο μεγαλύτερο στην Ευρώπη. Έχει άνοιγμα τόξου 40 μέτρων και ύψος περί τα 21 μέτρα, ενώ το πλάτος του καταστρώματος είναι 3.20 μέτρα.





Εικόνα 5.3 - Το γεφύρι της Πλάκας

#### [Το γεφύρι της Άρτας](#)

Το γεφύρι της Άρτας, το πιο ξακουστό γεφύρι της Ελλάδας, είναι λιθόκτιστη γέφυρα του ποταμού Αράχθου που απέκτησε τη σημερινή του μορφή τα έτη 1602-1606. Ωστόσο τα θεμέλια του γεφυριού δείχνουν ότι στη θέση αυτή υπήρχε γέφυρα ήδη από τους κλασσικούς ή ελληνιστικούς χρόνους. Οι πληροφορίες αναφέρουν ότι τη χρηματοδότηση της κατασκευής του Γεφυριού της Άρτας έγινε από έναν Αρτινό παντοπώλη, τον Ιωάννη Θιακογιάννη ή Γυφτοφάγο, ο οποίος προφανώς είχε εμπορικές δραστηριότητες και είχε ενδιαφέρον για τη διάβαση του Αράχθου ποταμού από τα μουλάρια με τα φορτία του. Το σημερινό μήκος του πέτρινου γεφυριού της Άρτας φτάνει στα 142 μέτρα και το πλάτος του είναι 3,75 μέτρα. Αποτελείται από τέσσερις ημικυκλικές καμάρες που δεν έχουν καμία συμμετρία μεταξύ τους. Τα ανοίγματα τους είναι 24.00, 15.80, 15.40 και 16.20 μέτρα, ενώ τα ύψη τους 11.70, 9.00, 9.60 και 9.30 μέτρα.



Εικόνα 5.4 - Το γεφύρι της Άρτας

Εναλλακτικές Χαράξεις

Πέραν της υφιστάμενης χάραξης της γέφυρας της Κλειδωνιάς, δηλαδή της χάραξης τριών κέντρων, στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια εύρεσης εναλλακτικών χαράξεων οι οποίες θα μπορούσαν να έχουν υλοποιηθεί αντί της υφιστάμενης, ώστε, στο επόμενο κεφάλαιο, να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ τους υπό μια σειρά στατικών και δυναμικών φορτίσεων. Η επιλογή των εναλλακτικών χαράξεων γίνεται μέσω της παρατήρησης της χάραξης τόξων άλλων λίθινων γεφυρών στην ευρύτερη περιοχή. Συγκεκριμένα, επιλέγεται μια καταβιβασμένη χάραξη τόξου κύκλου (εναλλακτική '2' - εικ.5.12) ως θεωρητικά ευκόλως υλοποιήσιμη εναλλακτικής της υφιστάμενης καταβιβασμένης, καθώς και μια ημικυκλική (εναλλακτική '3' - εικ.5.14) και μια οξυκόρυφη (εναλλακτική '4' - εικ.5.15), ως συνηθέστερες μορφές τόξων της περιόδου.

Για τις τρεις εναλλακτικές χαράξεις χρησιμοποιήθηκε το ίδιο άνοιγμα, ύψος και πλάτος τόξου με την υφιστάμενη χάραξη τριών κέντρων, όπως βέβαια και τα υλικά και το πάχος των τυμπάνων. Για την εναλλακτική καταβιβασμένη χάραξη τόξου κύκλου (εικ.5.12) ειδικότερα χρησιμοποιείται το ίδιο βέλος του τόξου όπως στην υφιστάμενη. Προκύπτει κατ' αυτόν τον τρόπο κυκλικός τομέας γωνίας 158° και ακτίνας 11.08m. Η ημικυκλική χάραξη (εικ.5.13) πραγματοποιείται με ακτίνα 10.71m. Τέλος, όσον αφορά στην οξυκόρυφη χάραξη (εικ.5.14), αυτή προέκυψε κατ' αναλογία των διαστάσεων ως προς το άνοιγμα της γέφυρας του Μανώλη, σύμφωνα με αποτύπωση και διερεύνηση του Πολιτικού Μηχανικού Χ. Γιαννέλου. Τα τόξα που προκύπτουν είναι ακτίνας 12.00m, ενώ το βέλος ανέρχεται στα 10.12m.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια σειρά πέτρινων γεφυριών της ευρύτερης περιοχής της Ηπείρου μαζί με το άνοιγμα και την χρονολογία κατασκευής τους. Με πράσινο χρώμα σημειώνονται οι γέφυρες με χρονολογική απόκλιση περίπου 40 ετών από την γέφυρα της Κλειδωνιάς, ως γέφυρες ίδιας περίπου χρονολογικής περιόδου με αυτήν. Η παρατήρηση των γεφυρών της περιοχής σε συνδυασμό με την χάραξή τους αποτελεί ένδειξη των δημοφιλέστερων χαράξεων τόξων της εποχής και παράλληλα τεκμηριώνει τις εναλλακτικές χαράξεις που θεωρούνται στην παρούσα εργασία.

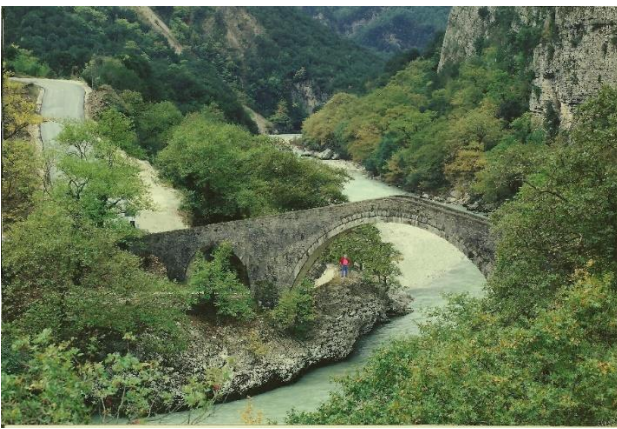
Πίνακας 5.1 - Γέφυρες στην ευρύτερη περιοχή ταξινομημένες με χρονολογική σειρά

Γέφυρα	Άνοιγμα	Χρονολογία	Γέφυρα	Άνοιγμα	Χρονολογία
Νταπολίτσας	12.30	1903	Πλακίδα	12.00	1814
Καραγιάννη	12.50	1903	Χάτσιου	17.50	1804
στον Ζαχωρίτικο	13.10	1891	στα Βουδούσια	12.20	1800
Δεβέλεγκα	-	1888	Καμπέρ Αγά	17.00	1780
Τσιπάνης	26.30	1875	Κυράς	16.00	1762
Πολιτσάς	23.50	1874	Μίσιου	18.00	1748
Κόνιτσας	35.60	1871	Βωβούσας	22.00	1748
Ρουσιτάρας	12.60	1868	Κοκκόρου	23.60	1750
Πλάκας	40.00	1866	Βίγλας	12.10	1707
Αλαμάμου	17.00	1858	Άρτας	24.00	1602
Στέλιου	12.50	1853	Κοράκου	49.50	1515
Μαύρης Πέτρας	20.80	1853	Βρατσίστα	23.00	-
Κυρ Αλέξη	14.10	1848	Μεσοπύργου	19.00	-
Πετσιώνη	18.20	1830	Ξηροποτάμου	16.10	-
Κούρτιας	19.00	1828			





Εικόνες 5.5-5.6 - Αριστερά: Γέφυρα Αλαμάνου (1858) – Καταβιβασμένη χάραξη, Δεξιά: Γέφυρα Κόνιτσας (1871) - Ημικυκλική χάραξη

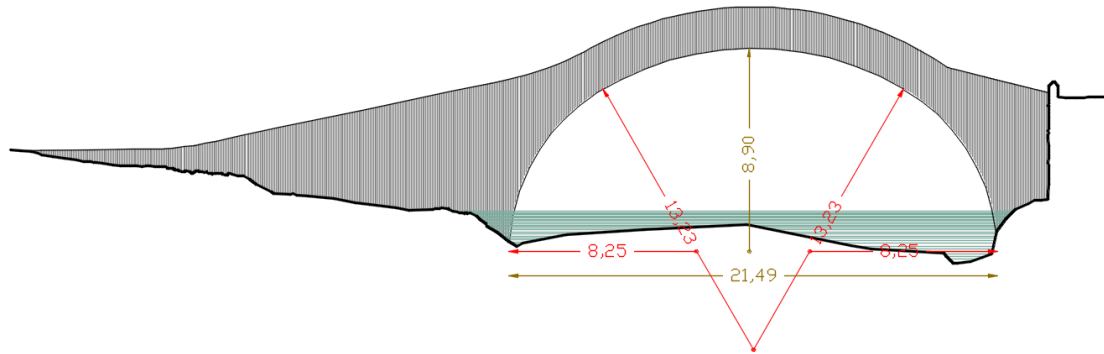


Εικόνες 5.7-5.8 - Αριστερά: Γέφυρα Πολιτσάς (1874) - Ημικυκλική χάραξη, Δεξιά: Γέφυρα Βωβούσας (1748) - Ημικυκλική χάραξη

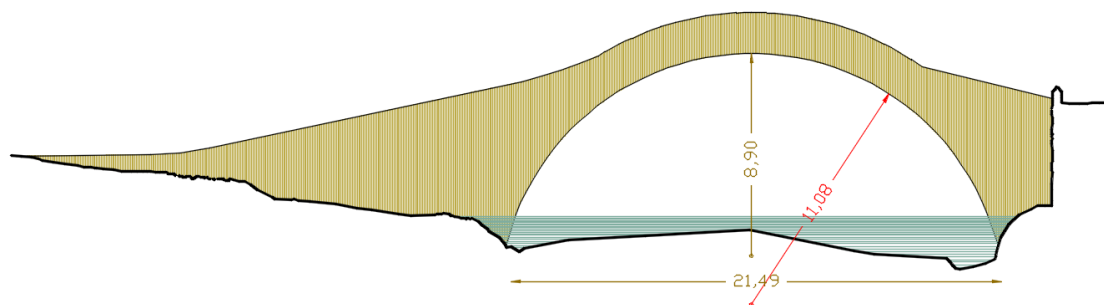


Εικόνες 5.9-5.10 - Αριστερά: Γέφυρα Καμπέρ Αγά (1780) - Οξυκόρυφη χάραξη, Δεξιά: Γέφυρα Μανώλη (1659) - Οξυκόρυφη χάραξη

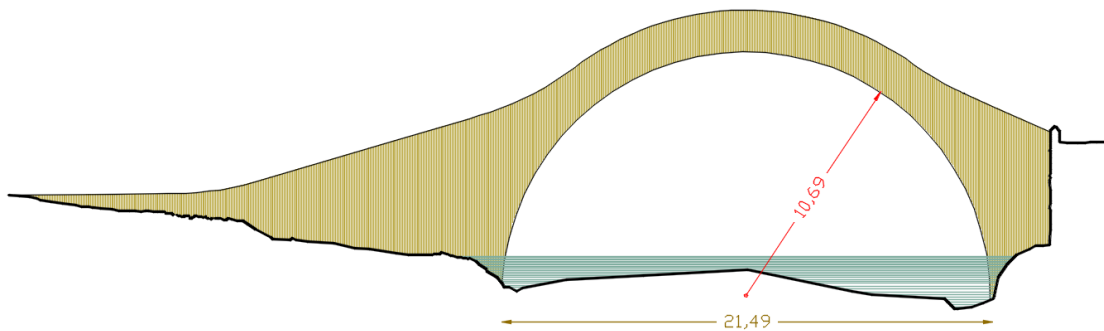
Παρακάτω παρουσιάζονται η υφιστάμενη και οι τρεις θεωρούμενες εναλλακτικές χαράξεις και η γεωμετρία τους, όπως προσομοιώνονται στη συνέχεια στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.



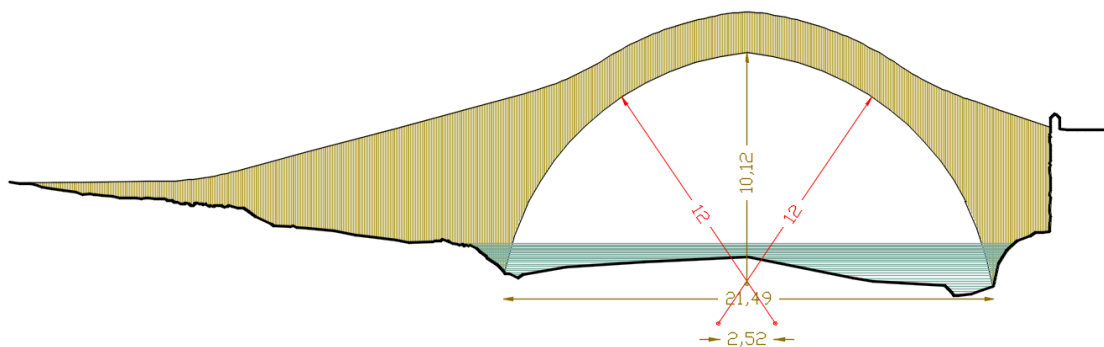
Εικόνα 5.11 - Εναλλακτική χάραξη '1' – Καταβιβασμένη χάραξη τριών κέντρων (πραγματική)



Εικόνα 5.12 - Εναλλακτική χάραξη '2' – Καταβιβασμένη χάραξη τόξου κύκλου



Εικόνα 5.13 - Εναλλακτική χάραξη '3' – Ημικυκλική χάραξη



Εικόνα 5.14 - Εναλλακτική χάραξη '4' – Οξυκόρυφη χάραξη

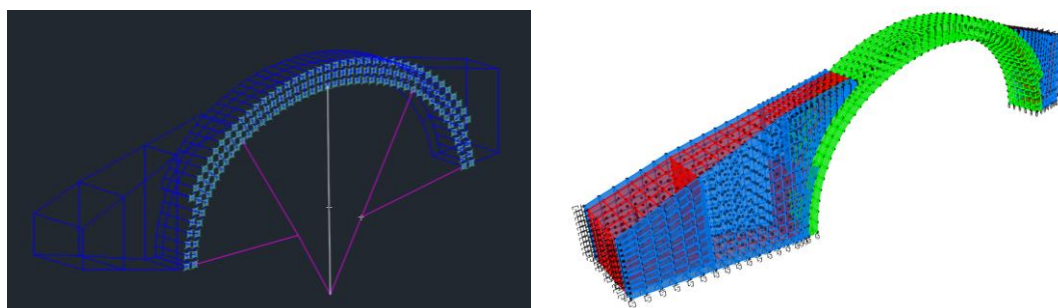


## 6 - Μεθοδολογία και Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία της προσομοίωσης στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων και τεκμηριώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πραγματοποιούμενων αναλύσεων. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της δομοστατικής συμπεριφοράς των τεσσάρων εναλλακτικών χαράξεων που θεωρήθηκαν παραπάνω και η συγκριτική προσέγγιση των αποτελεσμάτων τους, ώστε να καταγραφεί πιθανή υπεροχή συγκεκριμένης χάραξης έναντι των υπολοίπων για την κάθε θεωρούμενη φόρτιση.

### Προσομοίωση

Η προσομοίωση της γέφυρας και των τριών εναλλακτικών χαράξεων αυτής γίνεται στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων SAP2000 (εικ.6.3-6.6) και ABAQUS (εικ.6.17). Η εισαγωγή σε δεύτερο λογισμικό (εν προκειμένω το ABAQUS) γίνεται λόγω της δυνατότητας εισαγωγής μη-γραμμικών νόμων υλικών σε αυτό. Η γεωμετρία της κάθε παραλλαγής χάραξης του τόξου δημιουργείται αρχικά στο λογισμικό σχεδίασης AutoCad (εικ.6.1) και στην συνέχεια εξάγεται στο SAP2000 και ABAQUS αντίστοιχα. Για τις ανάγκες των προσομοιωμάτων επιλέχθηκαν πεπερασμένα στοιχεία τριών διαστάσεων (3D Solid Elements). Και για τις τέσσερις διαφορετικές παραλλαγές ορίζονται τρία υλικά διαφορετικού μέτρου ελαστικότητας (τόξο-τύμπανα-γέμισμα), ώστε να εντοπίζεται η επιρροή του εναλλακτικού τρόπου δόμησης (εικ.6.2). Το ίδιο βάρος της τοιχοποιίας λαμβάνεται ίσο με 24 KN/m<sup>3</sup>. Για τις προσομοίωση των συνθηκών στήριξης δημιουργήθηκαν στο SAP2000 στοιχεία με δυσκαμψία μόνο σε θλίψη (GAP elements), με μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερο των 10<sup>5</sup> KN/m<sup>2</sup> που παραπέμπει σε βράχο.



Εικόνες 6.1-6.2 - Αριστερά: Η γεωμετρία της Γέφυρας της Κλειδωνιάς σε περιβάλλον Autocad πριν την εξαγωγή, Δεξιά: Υπολογιστικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας με διαφοροποίηση των υλικών (SAP2000)

Καθώς δεν κατέστη δυνατή η δειγματοληψία δομικών υλικών της γέφυρας για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών (λόγω της απαγόρευσης μετακινήσεων από τις αρχές Νοεμβρίου 2020), η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των τριών υλικών που ορίστηκαν έχουν ληφθεί κατ' αντιστοιχία άλλων λίθινων γεφυρών της περιοχής για τις οποίες έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες τεκμηρίωσης υλικών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα αντοχής από τις μελέτες για το γεφύρι της Πλάκας (Εργαστήριο Ω.Σ. ΕΜΠ) και την γέφυρα του Κοράκου (Χούσος-Τσέλιος, 2018).



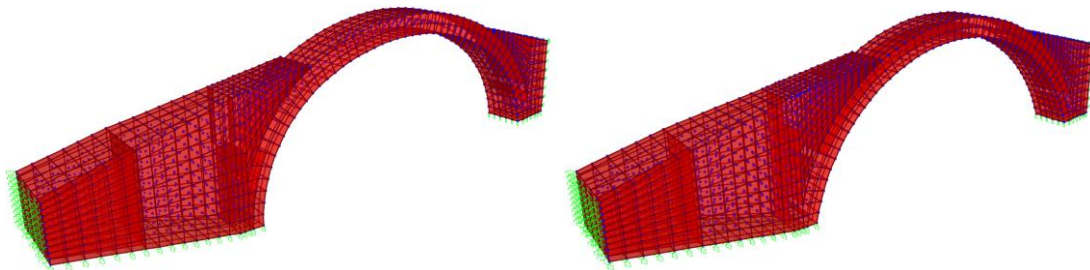
Πίνακας 6.1 - Αντοχές υλικών γεφυρών Πλάκας και Κοράκου

	Πλάκας			Κοράκου		
	Τόξο	Τύμπανα	Κονίαμα	Τόξο	Τύμπανα	Κονίαμα
$f_c$ (MPa)	5.01	3.26	-	5.96	3.04	-
$f_t$ (MPa)	-	-	0.40	-	-	0.27

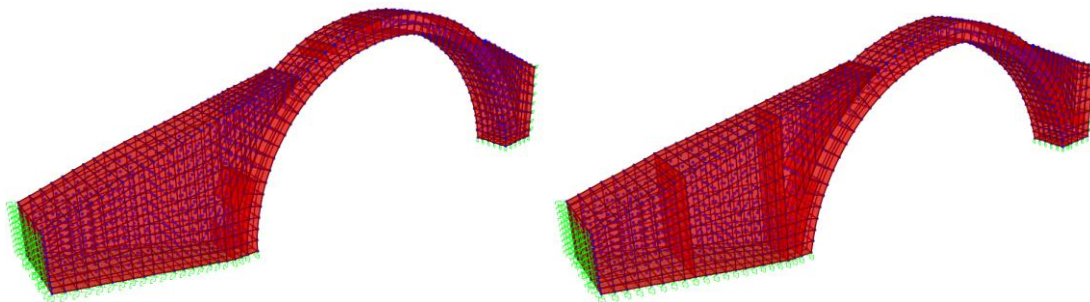
Πίνακας 6.2 - Θεωρούμενες αντοχές και μέτρα ελαστικότητας γέφυρας Κλειδωνιάς

	Υλικά			
	Τόξο	Τύμπανα	Γέμισμα	Κονίαμα
$f_c$ (MPa)	<b>5.00</b>	<b>3.00</b>	<b>1.00</b>	-
E (MPa)	<b>5000</b>	<b>3000</b>	<b>1000</b>	-
$f_t$ (MPa)	-	-	-	<b>0.40</b>

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα προσομοιώματα των τεσσάρων εναλλακτικών χαράξεων στο SAP2000. Κατά την προσομοίωση δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση κυρίως στο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων των τόξων. Όπως φαίνεται και παρακάτω, και στις τέσσερις εναλλακτικές χαράξεις τα τόξα αποτελούνται από ορθογώνια παραλληλεπίπεδα στοιχεία με λόγο πλευρών μικρότερο του 1.5. Επιπλέον, η κανονική μορφή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων των τόξων είναι απαραίτητη έτσι ώστε να γίνεται ορθή επιλογή των κόμβων κάθε θεωρούμενης διατομής, προκειμένου να εξαχθούν στη συνέχεια τα ακριβή αποτελέσματα των εντατικών μεγεθών κατά τη διαδικασία ολοκλήρωσης των τάσεων.



Εικόνες 6.3-6.4 - Αριστερά: Χάραξη τριών κέντρων, Δεξιά: Καταβιβασμένη χάραξη τόξου κύκλου (εικόνες SAP2000)



Εικόνες 6.5-6.6 - Αριστερά: Ημικυκλική χάραξη, Δεξιά: Οξυκόρυφη χάραξη (εικόνες SAP2000)

### Πραγματοποιούμενες Αναλύσεις

Συγκεντρωτικά πραγματοποιούνται οι ακόλουθες αναλύσεις:

Στατικές Αναλύσεις: Οι στατικές αναλύσεις πραγματοποιούνται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων SAP2000 ως nonlinear static cases, με την μη γραμμικότητα να έγκειται στα στοιχεία επαφής (GAP elements) τα οποία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση πιθανής ανασήκωσης του φορέα από οποιονδήποτε συνδυασμό στατικών αναλύσεων. Συγκεκριμένα, για κάθε μια παραλλαγή στην χάραξη που μελετάται στην παρούσα εργασία, πραγματοποιούνται οι εξής αναλύσεις:

- Ίδιο βάρος, το οποίο λαμβάνεται αυτόματα από το λογισμικό μέσω του καθορισμού του ειδικού βάρους των υλικών και της γεωμετρίας της κατασκευής
- Κινητό φορτίο, ασκούμενο σε δύο θέσεις(εικόνες 6.7-6.8), το οποίο προσομοιάζει τα φορτία κυκλοφορίας της γέφυρας (φορτίο ανθρωποσυνοστισμού)
- Ισοδύναμη Στατική Ανάλυση με ομοιόμορφο φορτίο στις δυο κύριες διευθύνσεις (διαμήκη και εγκάρσια)

Δυναμικές Αναλύσεις: Οι δυναμικές αναλύσεις πραγματοποιούνται στο SAP2000 ως linear static cases καθώς στην εξαγωγή των ιδιομορφών δεν υπάρχει δυνατότητα να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα των στοιχείων θεμελίωσης όπως στις στατικές αναλύσεις. Για κάθε μια παραλλαγή στην χάραξη του τόξου πραγματοποιούνται οι εξής αναλύσεις:

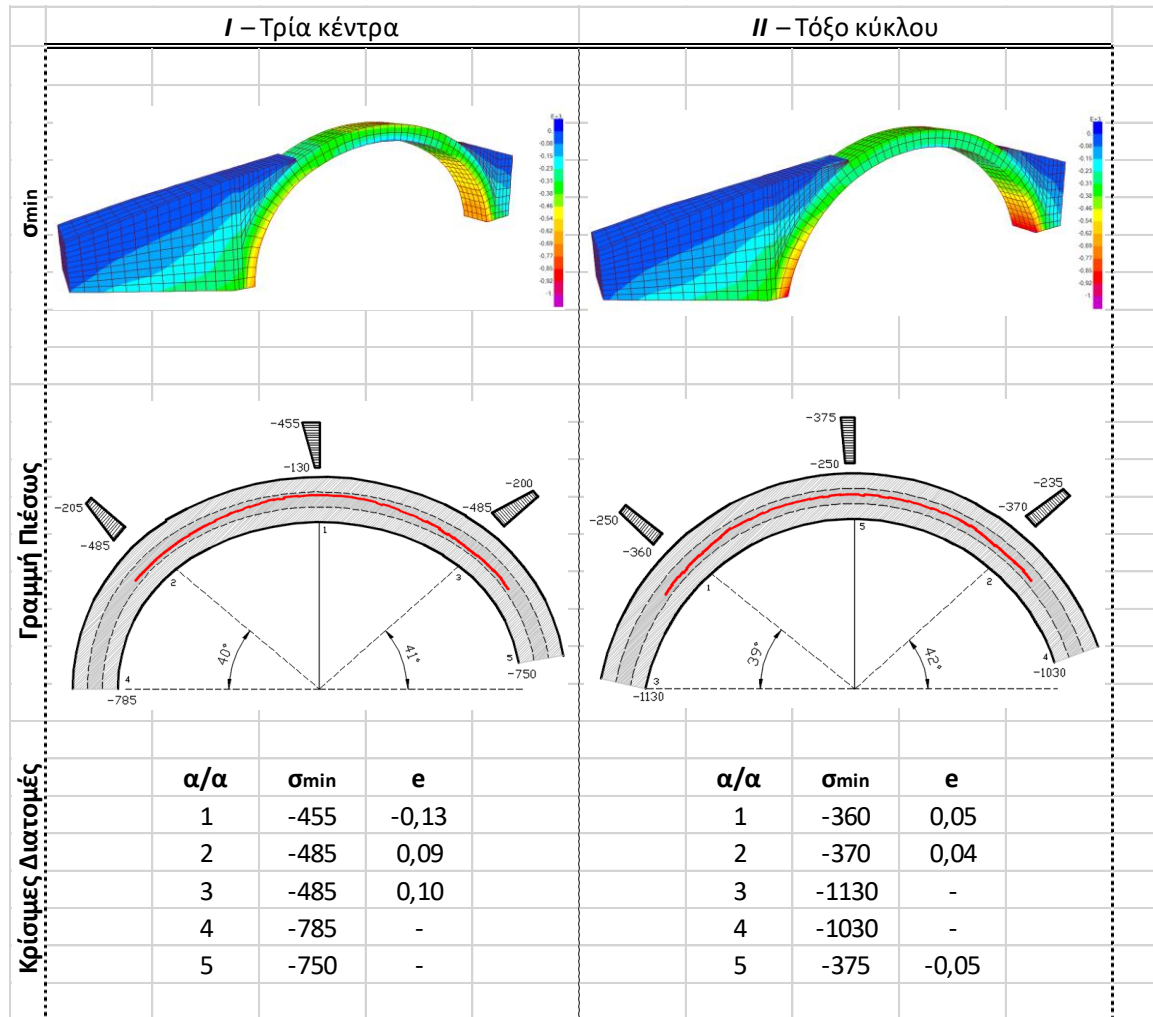
- Ιδιομορφική Ανάλυση
- Ανάλυση Φάσματος Απόκρισης, σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα του EC8

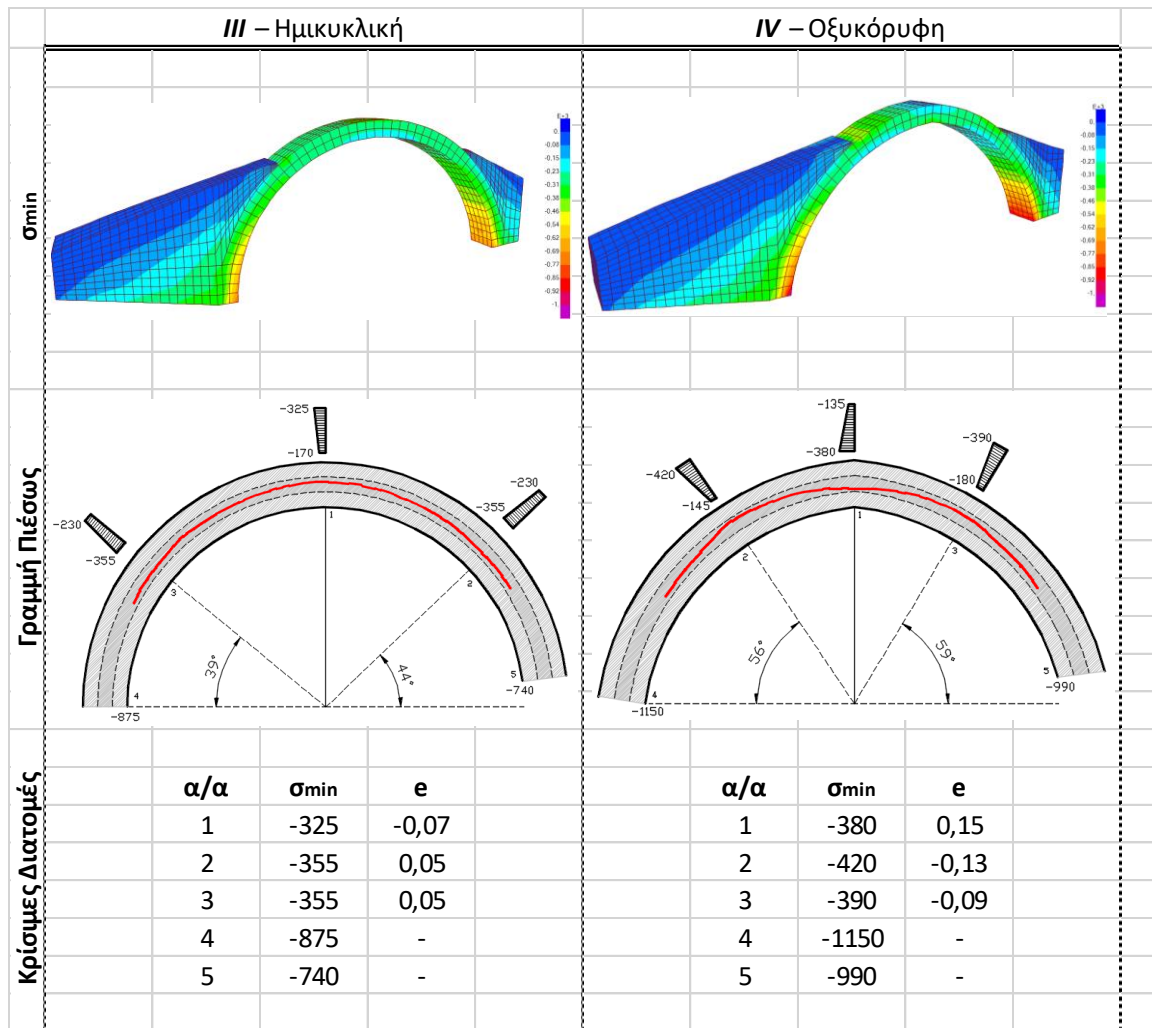
Τέλος, πραγματοποιείται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστρίας. Για την συγκεκριμένη ανάλυση επιλέγεται η σεισμική διέγερση της Λευκάδας του 2003, ενώ γίνονται τόσο μονοαξονικές (εγκάρσια σεισμική διεύθυνση), όσο και διαξονικές (εγκάρσια και διαμήκης σεισμική διεύθυνση) αναλύσεις, προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή της προσθήκης της διαμήκους σεισμικής συνιστώσας στα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων για όλες τις εναλλακτικές χαράξεις που θεωρούνται στην παρούσα διπλωματική. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε όρους μέγιστων τάσεων. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι γραμμές πίεσεως όλων των φορτίσεων για το σύνολο των εναλλακτικών χαράξεων. Πάνω σε αυτές είναι σημειωμένα με διακεκομμένες γραμμές τα όρια του πυρήνα (δηλ. η περιοχή εντός της οποίας ευρισκόμενη η γραμμή πίεσεως δεν παρουσιάζεται εφελκυσμός στην διατομή), καθώς και οι κρίσιμες διατομές μαζί με την επίκεντρη γωνιά στην οποία αυτές εμφανίζονται και τις μέγιστες κύριες τάσεις των ακραίων ινών σε αυτές. Για την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της κάθε ανάλυσης μεταξύ των παραλλαγών που μελετώνται στην παρούσα εργασία, έχει γίνει η εξής σύμβαση για τα τόξα των γωνιών που αναφέρονται παρακάτω: ως αφετηρία έναρξης μετρήσεων των γωνιών ορίζεται σε όλες τις παραλλαγές το ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ της επιφάνειας γενέσεως του Νότιου βάρθρου της εκάστοτε εναλλακτικής και του μέσου του ανοίγματος, ανεξαρτήτως του εκάστοτε κέντρου χαράξεως του τόξου.

### 6.1 - Φόρτιση με το Ίδιο Βάρος

Το ίδιο βάρος αποτελεί το κρίσιμότερο από τα κατακόρυφα φορτία. Υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό, λαμβάνοντας υπόψη το ειδικό βάρος που έχει εισαχθεί για την τοιχοποιία, ίσο με  $24 \text{ kN/m}^3$ , στο σύνολο του φορέα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται για τις τέσσερις εναλλακτικές χαράξεις οι κύριες θλιπτικές τάσεις, καθώς και οι γραμμές πιέσεως. Τέλος, παρουσιάζεται ο πίνακας των κρίσιμων διατομών με την εκκεντρότητα που προκύπτει στην αντίστοιχη διατομή. Οι κύριες εφελκυστικές τάσεις είναι είτε μηδενικές, είτε πολύ μικρές και γ' αυτόν τον λόγο δεν παρουσιάζονται.

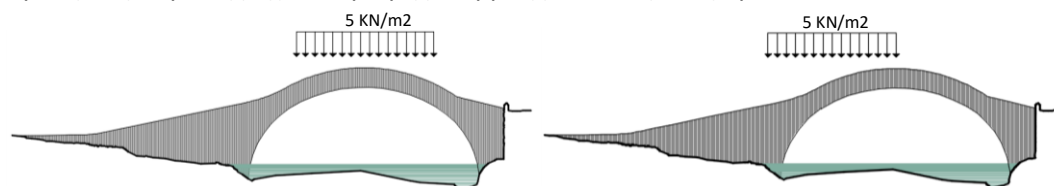




Από τις αναλύσεις υπό το ίδιο βάρος προκύπτει ότι η γραμμή πίεσης σε όλες τις εναλλακτικές χαράξεις ευρίσκεται εντός πυρήνα, δηλαδή δεν αναπτύσσεται σε καμία περίπτωση εφελκυσμός στο τόξο. Παρατηρείται ότι καλύτερη προσαρμογή μεταξύ άξονα τόξου και γραμμής πίεσεων παρουσιάζουν οι χαράξεις που αποτελούν τόξα κύκλων (εναλλακτικές χαράξεις II και III). Συγκεκριμένα, οι εκκεντρότητες των γραμμών πίεσης στην κλείδα για τις περιπτώσεις II και III είναι 0.05 και 0.07m αντίστοιχα, έναντι αυτών των περιπτώσεων I και IV που είναι 0.13 και 0.15m αντίστοιχα, δηλαδή συγκριτικά αυξημένες. Οι κρίσιμες διατομές, πλην της κλείδας που είναι σε κάθε περίπτωση κρίσιμη, στις πρώτες τρεις περιπτώσεις εμφανίζονται σε γωνίες 40° έως 45°, ενώ αντίθετα στην περίπτωση IV της οξυκόρυφης χάραξης, οι κρίσιμες διατομές εμφανίζονται στις 55°~60°. Τέλος, στην περίπτωση IV παρατηρείται μια πλήρης αναστροφή της γραμμής πίεσης στις κρίσιμες περιοχές σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις με την εκκεντρότητα να παρουσιάζει αντίθετο πρόσημο.

## 6.2 - Προσθήκη των Κινητών Φορτίων

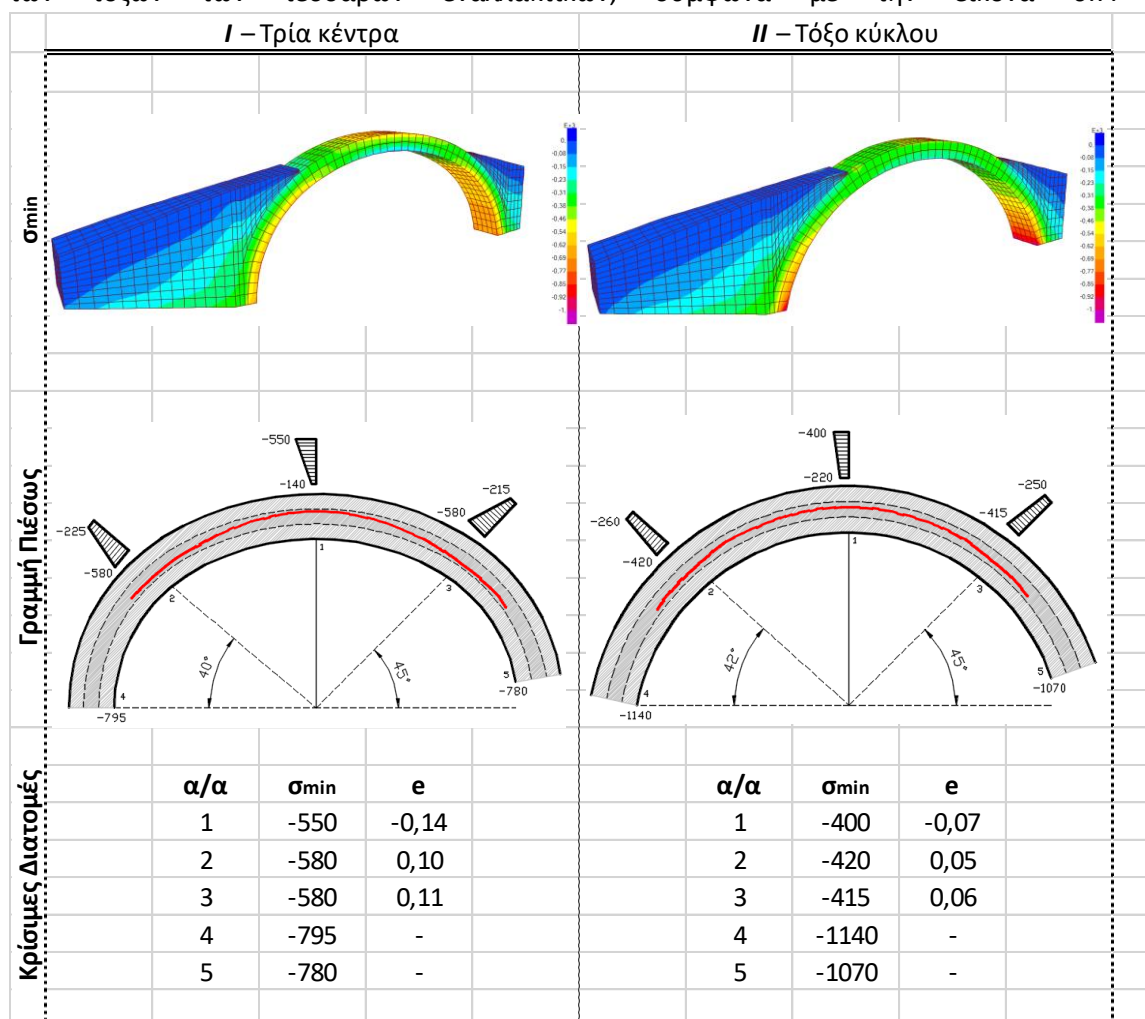
Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων του ίδιου βάρους μαζί με την προσθήκη των κινητών φορτίων. Το κινητό φορτίο λαμβάνεται ίσο με το φορτίο ανθρωποσυνωστισμού σύμφωνα με τον EN 1991-2 για πεζογέφυρες,  $q=5\text{KN/m}^2$ . Το φορτίο αυτό λαμβάνεται υπ' όψη σε δύο εναλλακτικές θέσεις επί του καταστρώματος, συγκεκριμένα είτε στο μεσαίο τμήμα (Live\_1, εικ.6.7), είτε στο πρώτο ήμισυ του εκάστοτε τόξου (Live\_2, εικ.6.8). Σημειώνεται ότι, όπως αναμένεται, η επίδραση του φορτίου ανθρωποσυνωστισμού είναι σημαντικά μικρότερη αυτής του ίδιου βάρους. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν τον συνδυασμό του ίδιου βάρους με το εκάστοτε κινητό. Και σε αυτήν την περίπτωση οι κύριες εφελκυστικές τάσεις που προκύπτουν είναι αμελητέες λόγω της σχετικά μικρής επιρροής του κινητού φορτίου.



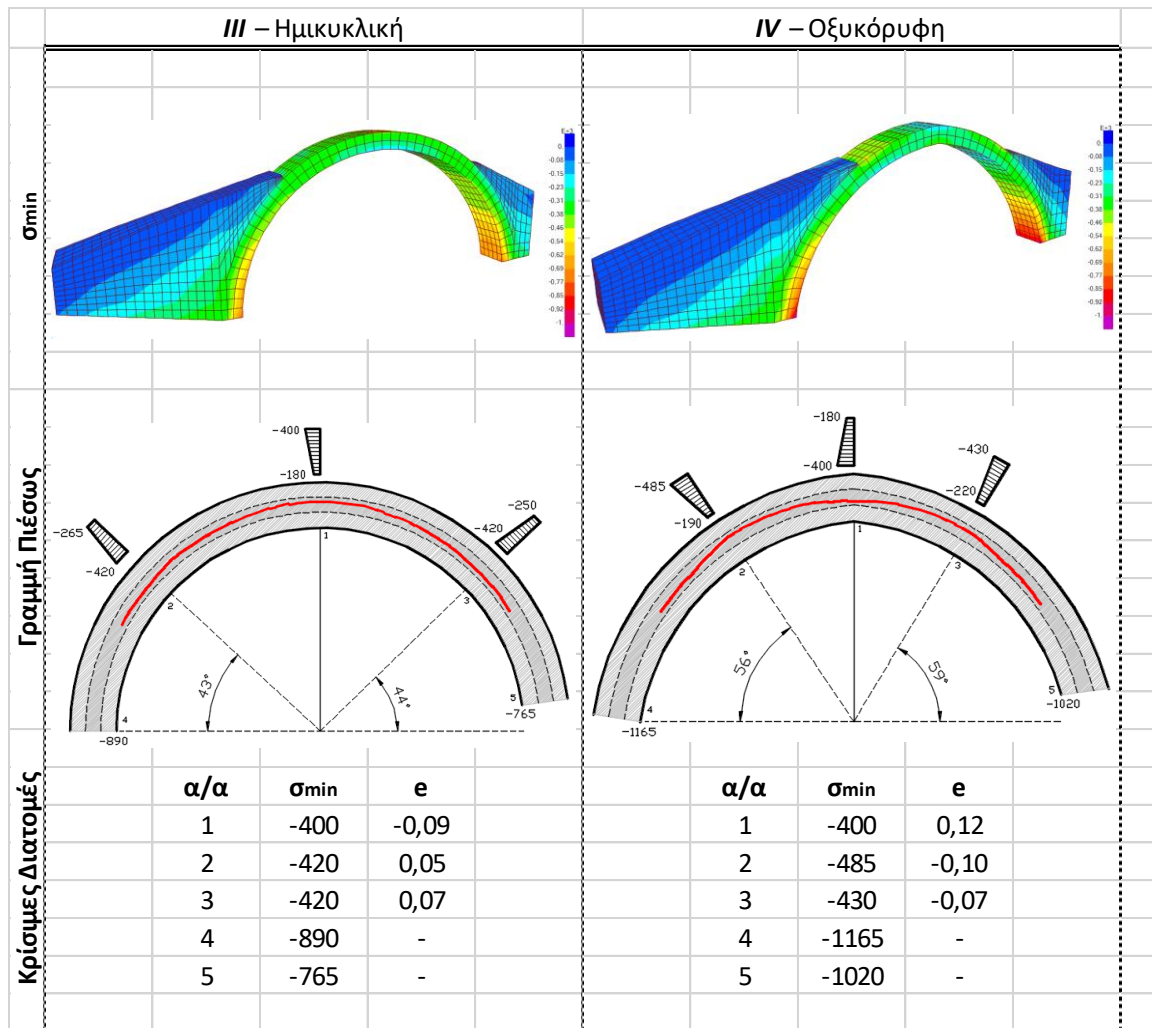
Εικόνες 6.7-6.8 - Θέσεις κινητού φορτίου '1' (αριστερά) και '2' (δεξιά)

### 6.2.1 - Κινητό Φορτίο '1'

Ως κινητό φορτίο '1' ορίζεται το ομοιόμορφο φορτίο μεγέθους  $5\text{KN/m}^2$  στα μεσαία τμήματα των τόξων των τεσσάρων εναλλακτικών, σύμφωνα με την εικόνα 6.7.





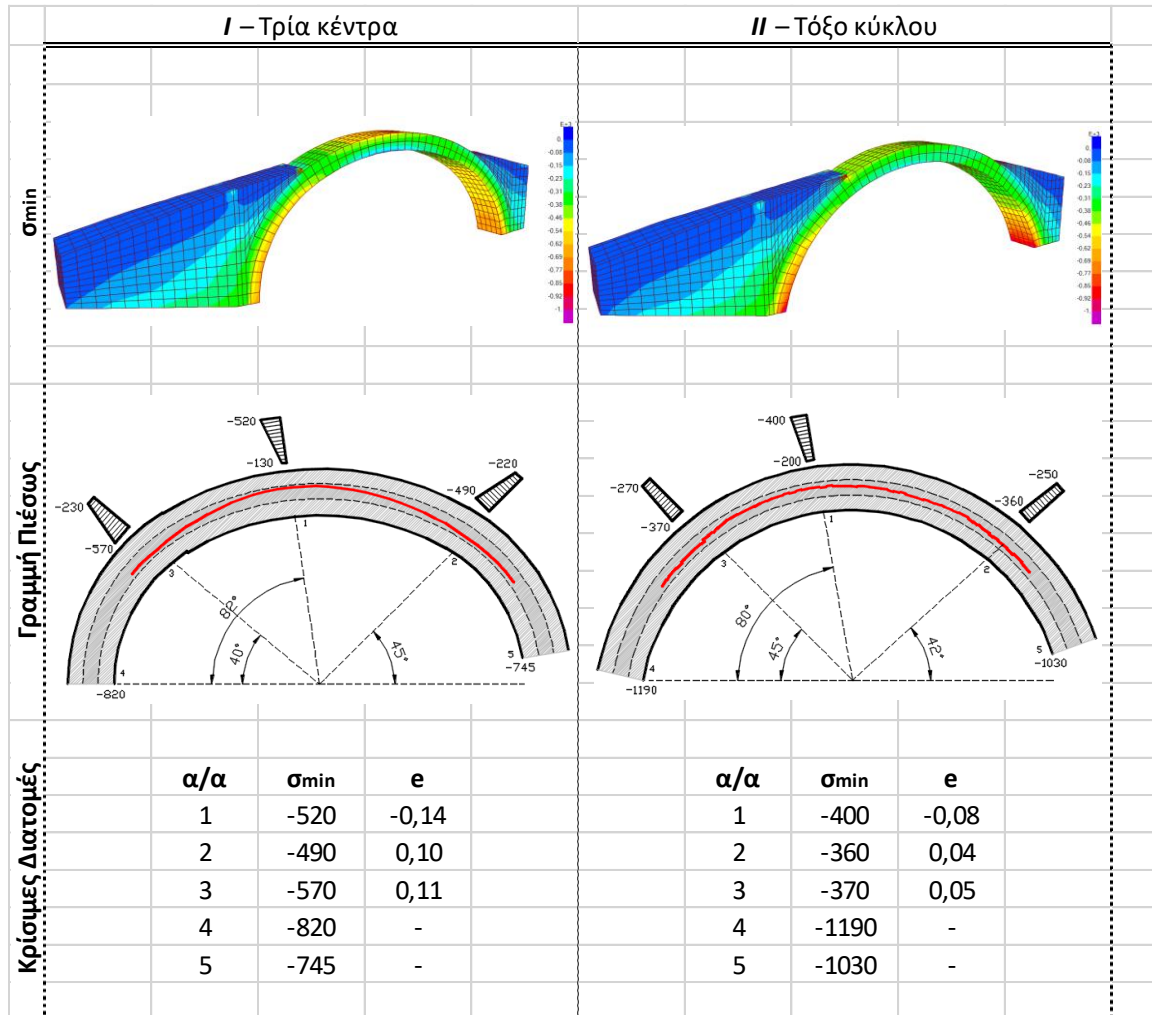


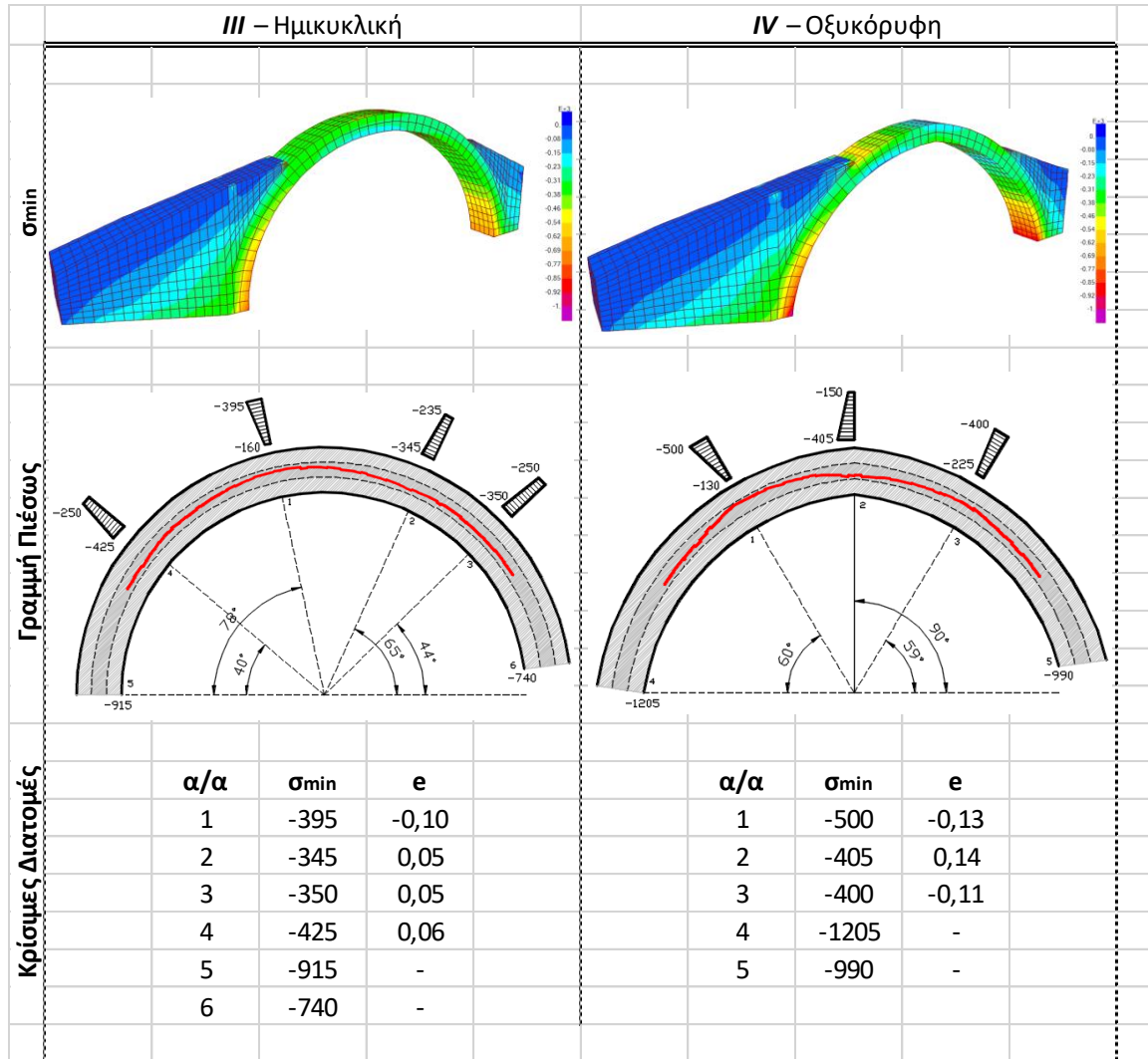
Από τον συνδυασμό του ίδιου βάρους με το κινητό φορτίο '1' προκύπτει ότι όλες οι γραμμές πίεσης βρίσκονται εντός πυρήνα, ενώ η επιρροή του κινητού φορτίου είναι μικρή. Συγκεκριμένα, οι κρίσιμες διατομές που εμφανίζονται στην φόρτιση λόγω ίδιου βάρους παραμένουν σε κάθε περίπτωση οι ίδιες και σε αυτήν την φόρτιση, εμφανίζοντας για τις περιπτώσεις I, II και III μια μικρή επιδείνωση της εκκεντρότητας της τάξης των 1~2cm στην περιοχή της κλείδας.

Αντιθέτως, για την περίπτωση IV φαίνεται ότι το κινητό φορτίο '1' μειώνει της εκκεντρότητα των κρίσιμων περιοχών κατά περίπου 3cm, γεγονός που καθιστά τη συγκεκριμένη φόρτιση ευμενή για την συγκεκριμένη εναλλακτική χάραξη. Για την οξυκόρυφη δηλαδή χάραξη, η εκκεντρότητα της γραμμής πίεσεως από το ίδιο βάρος δρα ως μια "φυσική προένταση" για τα επιβαλλόμενα κινητά φορτία στο μέσον του ανοίγματος, καθιστώντας την ως την καταλληλότερη εκ των τεσσάρων εξεταζόμενων για την παραλαβή φορτίων αυτής της μορφής.

6.2.2 - Κινητό Φορτίο '2'

Ως κινητό φορτίο '2' ορίζεται το ομοιόμορφο φορτίο μεγέθους 5KN/m<sup>2</sup> στο πρώτο ήμισυ των τόξων των τεσσάρων εναλλακτικών, σύμφωνα με την εικόνα 6.8.





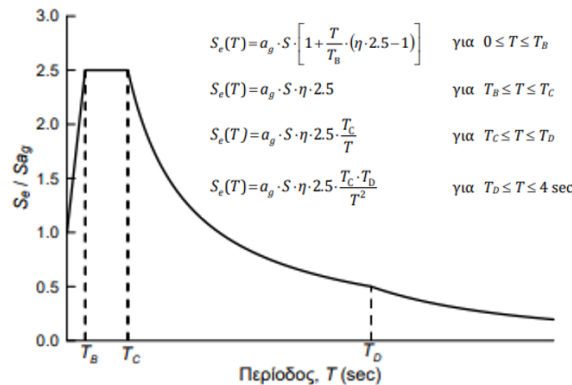
Από τον συνδυασμό του ίδιου βάρους με το κινητό φορτίο '2' προκύπτει ότι όλες οι γραμμές πίεσης βρίσκονται εντός πυρήνα, ενώ η επιρροή του κινητού φορτίου είναι μικρή. Οι κρίσιμες διατομές στην περιοχή της κλείδας εμφανίζονται στις 80° περίπου για τις εναλλακτικές χαράξεις I, II και III, ενώ για την εναλλακτική χάραξη IV συνεχίζει να είναι κρίσιμη η διατομή της κλείδας λόγω της μορφής της γραμμής πίεσης από το ίδιο βάρος. Γενικώς, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η επιρροή των κινητών φορτίων στα λίθινα γεφύρια είναι σχετικώς μικρή, συνεπώς κύρια στατική φόρτιση αυτών είναι το ίδιο βάρος τους.

### 6.3 - Σεισμική Φόρτιση

Η γέφυρα βρίσκεται εντός του Δήμου Κόνιτσας του Νομού Ιωαννίνων, για τον οποίο, σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα του Ευρωκώδικα 8, ισχύουν:

- Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας : I
- Σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού :  $a_g=0.16g$

Για τις οριζόντιες συνιστώσες του σεισμού χρησιμοποιείται το φάσμα σχεδιασμού τύπου I



Εικόνα 6.9 - Φάσμα σχεδιασμού Ευρωκώδικα

- $S_e(T)$ : το ελαστικό φάσμα απόκρισης
- $T$ : η ιδιοπερίοδος της κατασκευής
- $a_g$ : η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού
- $S$ : ο συντελεστής εδάφους
- $\eta$ : ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης ( $\eta=1$  για  $\zeta=5\%$ )

Για τους υπό εξέταση φορείς λαμβάνονται επίσης:

- Συντελεστής σπουδαιότητας:  $\gamma_1 = 1.00$
- Συντελεστής θεμελίωσης:  $\theta = 1.00$
- Κατηγορία εδάφους: B ( $T_B = 0.15$ ,  $T_C = 0.50$ ,  $T_D = 2.50$  sec)
- Συντελεστής σεισμικής συμπεριφοράς:  $q = 1.00$  (ελαστική συμπεριφορά)

#### 6.3.1 - Ιδιομορφική Ανάλυση

Η σεισμική διερεύνηση των τεσσάρων παραλλαγών της γέφυρας της Κλειδωνιάς ξεκινάει με την ιδιομορφική ανάλυση καθεμιάς από αυτές. Στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται οι ιδιομορφές και τα ποσοστά συμμετοχής τους στις τρεις κύριες διευθύνσεις και για κάθε εξεταζόμενη χάραξη (πίνακας 6.3). Ιδιαίτερα στην διαμήκη (διεύθυνση x) και την κατακόρυφη διεύθυνση (διεύθυνση z), η συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών είναι σημαντική. Στην εγκάρσια διεύθυνση, η οποία είναι και η πιο κρίσιμη σε ενδεχόμενο σεισμό, δεσπόζουσα είναι σε όλες τις περιπτώσεις η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή (καθαρά μεταφορική για την εγκάρσια) με ποσοστό άνω του 30% (εικόνα 6.10). Συγκεκριμένα, για τα πιο χθαμαλά τόξα (χάραξη τριών κέντρων και τόξου κύκλου) η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή έχει τιμή 0.227sec, ενώ για την ημικυκλική και οξυκόρυφη χάραξη 0.270sec και 0.248sec αντίστοιχα. Η παραπάνω διαπίστωση εξηγείται από την διαφορά του κέντρου βάρους της κατασκευής που οφείλεται στην χάραξη του κάθε τόξου. Ειδικότερα, δύο καταβιβασμένες παραλλαγές, λόγω του κατά 2 σχεδόν μέτρα μικρότερου βέλους των τόξων τους σε σχέση με την ημικυκλική χάραξη, έχουν κέντρο βάρους περίπου 50 εκατοστά χαμηλότερα από την ημικυκλική, γεγονός που τις καθιστά πιο δύσκαμπτες, συνεπώς και με μικρότερη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο. Επιπλέον, η δεύτερη δεσπόζουσα ιδιομορφή κατά την εγκάρσια διεύθυνση σε όλες τις παραλλαγές σχετίζεται με την ανεξάρτητη κίνηση του τόξου σε σχέση με τα βάθρα, δηλαδή η εγκάρσια



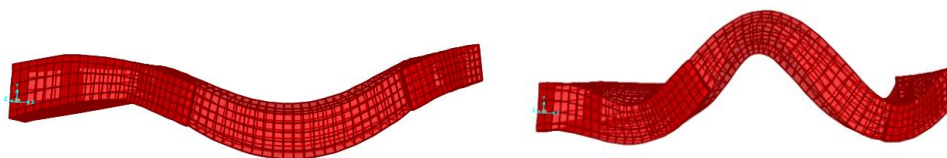
ταλάντωση του τόξου και των βάθρων έχει διαφορά φάσης T/2 (εικόνα 6.11). Το άθροισμα των συμμετοχών των δύο κύριων ιδιομορφών στην εγκάρσια διεύθυνση σε κάθε περίπτωση είναι περί του 60%.

Πίνακας 6.3 - Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης

I - 3 κέντρα						II - Τόξο Κύκλου					
α/α	T(sec)	f (Hz)	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	α/α	T(sec)	f (Hz)	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>
1	<b>0,227</b>	4,40	0,000	<b>0,308</b>	0,000	1	<b>0,227</b>	4,41	0,000	<b>0,324</b>	0,000
2	0,107	9,33	0,013	0,032	0,001	2	0,109	9,14	0,007	0,029	0,000
3	0,098	10,20	<b>0,139</b>	0,001	0,002	3	0,094	10,67	<b>0,179</b>	0,000	0,000
4	0,086	11,64	0,000	0,000	0,121	4	0,076	13,11	0,003	0,003	0,133
5	0,069	14,40	0,001	<b>0,276</b>	0,002	5	0,070	14,19	0,000	<b>0,268</b>	0,005
6	0,057	17,43	0,051	0,002	<b>0,165</b>	6	<b>0,059</b>	16,91	0,035	0,002	<b>0,169</b>
7	0,053	18,80	0,000	0,008	0,001	7	0,054	18,46	0,000	0,007	0,001
8	<b>0,046</b>	21,60	<b>0,192</b>	0,000	0,001	8	<b>0,045</b>	22,36	<b>0,282</b>	0,001	0,000
9	0,046	21,77	0,109	0,009	0,000	9	0,044	22,98	0,003	0,006	0,000
10	0,040	24,90	0,000	0,061	0,000	10	0,040	24,71	0,000	0,059	0,000
11	0,038	26,26	<b>0,103</b>	0,000	0,007	11	0,039	25,60	<b>0,124</b>	0,000	0,006
12	0,034	29,36	0,004	0,000	0,074	12	0,035	28,65	0,000	0,062	0,001
13	0,033	29,98	0,000	0,054	0,002	13	0,033	29,99	0,000	0,001	0,102
14	0,032	31,45	0,001	0,008	0,001	14	0,032	30,99	0,001	0,005	0,001
15	0,029	34,96	0,000	0,050	0,000	15	0,029	34,23	0,000	0,041	0,000
16	0,028	35,92	0,064	0,001	0,001	16	0,028	36,21	0,048	0,002	0,067
17	<b>0,027</b>	37,26	0,002	0,002	<b>0,260</b>	17	0,027	36,92	0,006	0,001	<b>0,157</b>
18	0,026	37,87	0,002	0,013	0,016	18	0,027	37,37	0,002	0,016	0,010
19	0,024	41,79	0,000	0,002	0,002	19	0,024	41,44	0,000	0,005	0,004
20	0,023	42,82	0,002	0,000	0,062	20	0,023	42,65	0,004	0,000	0,076
		SumUi	0,685	0,829	0,719			SumUi	0,695	0,834	0,732

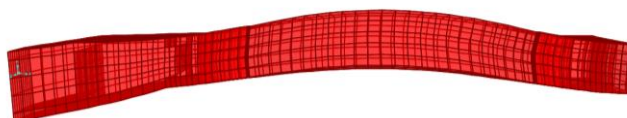
III - Ημικυκλική						IV - Οξυκόρυφη					
α/α	T(sec)	f (Hz)	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	α/α	T(sec)	f (Hz)	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>
1	<b>0,270</b>	3,70	0,000	<b>0,314</b>	0,000	1	<b>0,248</b>	4,02	0,000	<b>0,324</b>	0,000
2	0,126	7,96	0,024	0,032	0,000	2	0,118	8,50	0,007	0,036	0,000
3	0,117	8,58	<b>0,184</b>	0,002	0,000	3	0,100	10,04	<b>0,194</b>	0,000	0,002
4	0,082	12,13	0,023	0,043	0,031	4	0,075	13,29	0,001	<b>0,253</b>	0,002
5	0,079	12,72	0,002	<b>0,226</b>	0,010	5	0,070	14,33	0,018	0,011	0,125
6	<b>0,063</b>	15,79	0,016	0,000	<b>0,283</b>	6	<b>0,063</b>	15,75	0,023	0,002	<b>0,185</b>
7	0,058	17,27	0,010	0,015	0,001	7	0,057	17,45	0,000	0,011	0,001
8	<b>0,054</b>	18,54	<b>0,287</b>	0,003	0,000	8	<b>0,046</b>	21,65	<b>0,251</b>	0,001	0,003
9	0,046	21,86	0,000	0,009	0,000	9	0,043	23,12	0,000	0,003	0,000
10	0,044	22,89	0,001	0,044	0,000	10	0,042	24,01	0,000	0,055	0,000
11	0,042	23,97	<b>0,148</b>	0,001	0,000	11	<b>0,041</b>	24,37	0,142	0,000	0,006
12	0,039	25,33	0,001	0,000	0,042	12	0,037	27,34	0,000	0,077	0,001
13	0,036	27,97	0,000	0,090	0,000	13	0,035	28,71	0,000	0,001	0,120
14	0,035	28,88	0,003	0,000	0,000	14	0,034	29,76	0,001	0,005	0,000
15	0,032	31,55	0,070	0,000	0,009	15	0,030	33,61	0,000	0,038	0,001
16	0,031	32,65	0,000	0,029	0,000	16	0,029	34,56	0,056	0,000	0,036
17	0,029	34,56	0,012	0,000	<b>0,222</b>	17	0,028	36,01	0,002	0,006	0,060
18	0,029	34,77	0,001	0,012	0,055	18	0,028	36,19	0,000	0,001	<b>0,125</b>
19	0,026	38,30	0,002	0,000	0,062	19	0,025	40,27	0,000	0,007	0,004
20	0,026	39,22	0,000	0,002	0,000	20	0,024	41,31	0,002	0,001	0,069
		SumUi	0,784	0,822	0,717			SumUi	0,697	0,832	0,737



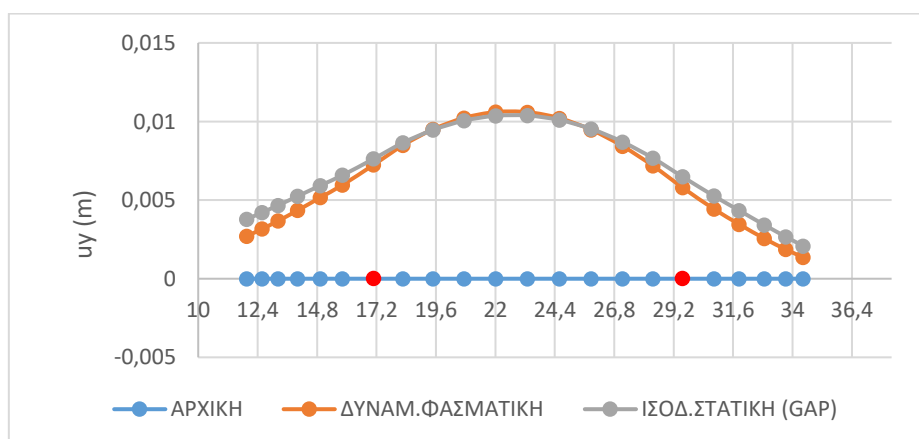
Εικόνες 6.10-6.11 - Αριστερά: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή χάραξης τριών κέντρων, Δεξιά: 5<sup>η</sup> ιδιομορφή χάραξης τριών κέντρων

### 6.3.2 - Δυναμική Φασματική Ανάλυση

Η δυναμική φασματική ανάλυση σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα του Ευρωκώδικα-8 πραγματοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί η σεισμική μετατόπιση, σύμφωνα με την οποία στην συνέχεια θα προσδιοριστεί η κατάλληλη επιτάχυνση της ισοδύναμης στατικής ανάλυσης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων στην εγκάρσια διεύθυνση, καθώς στην διαμήκη η σεισμική καταπόνηση φαίνεται να μην είναι κρίσιμη λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας της γέφυρας σε αυτήν την διεύθυνση. Η εγκυρότητα της μεθόδου ελέγχεται μέσω της σύγκρισης των μετατοπίσεων ακμής της δυναμικής φασματικής και της ισοδύναμης στατικής ανάλυσης (εικ.6.13). Από την σύγκριση προκύπτει ότι οι μετατοπίσεις ακμής ύστερα από κανονικοποίηση της παραμόρφωσης κλείδας της ισοδύναμης στατικής ως προς αυτήν της δυναμικής φασματικής είναι σχεδόν ταυτόσημες, ιδίως στην περιοχή του καθαρού τόξου (περιοχή μεταξύ των κόκκινων κουκίδων), συνεπώς τα αποτελέσματα της ισοδύναμης στατικής ανάλυσης είναι επαρκώς ακριβή. Η παραπάνω διαπίστωση γίνεται για όλες τις εναλλακτικές περιπτώσεις χάραξης του τόξου, συνεπώς παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της χάραξης των τριών κέντρων όσον αφορά στην παραμορφωμένη εικόνα της δυναμικής φασματικής ανάλυσης (εικ.6.12) και στη σύγκριση των παραμορφώσεων των δύο μεθόδων ανάλυσης (εικ.6.13).



Εικόνα 6.12 - Παραμόρφωση δυναμικής φασματικής ανάλυσης στην εγκάρσια διεύθυνση (εικόνα SAP2000 – scale: 200)



Εικόνα 6.13 - Κάτοψη παραμορφωμένης ακμής - Σύγκριση παραμορφώσεων δυναμικής φασματικής και ισοδύναμης στατικής μεθόδου

Οι εγκάρσιες παραμορφώσεις στο σημείο της κλείδας των τεσσάρων εναλλακτικών χαράξεων για την συγκεκριμένη ανάλυση φαίνονται στον πίνακα της επόμενης παραγράφου.

### 6.3.3 - Ισοδύναμη Στατική Ανάλυση

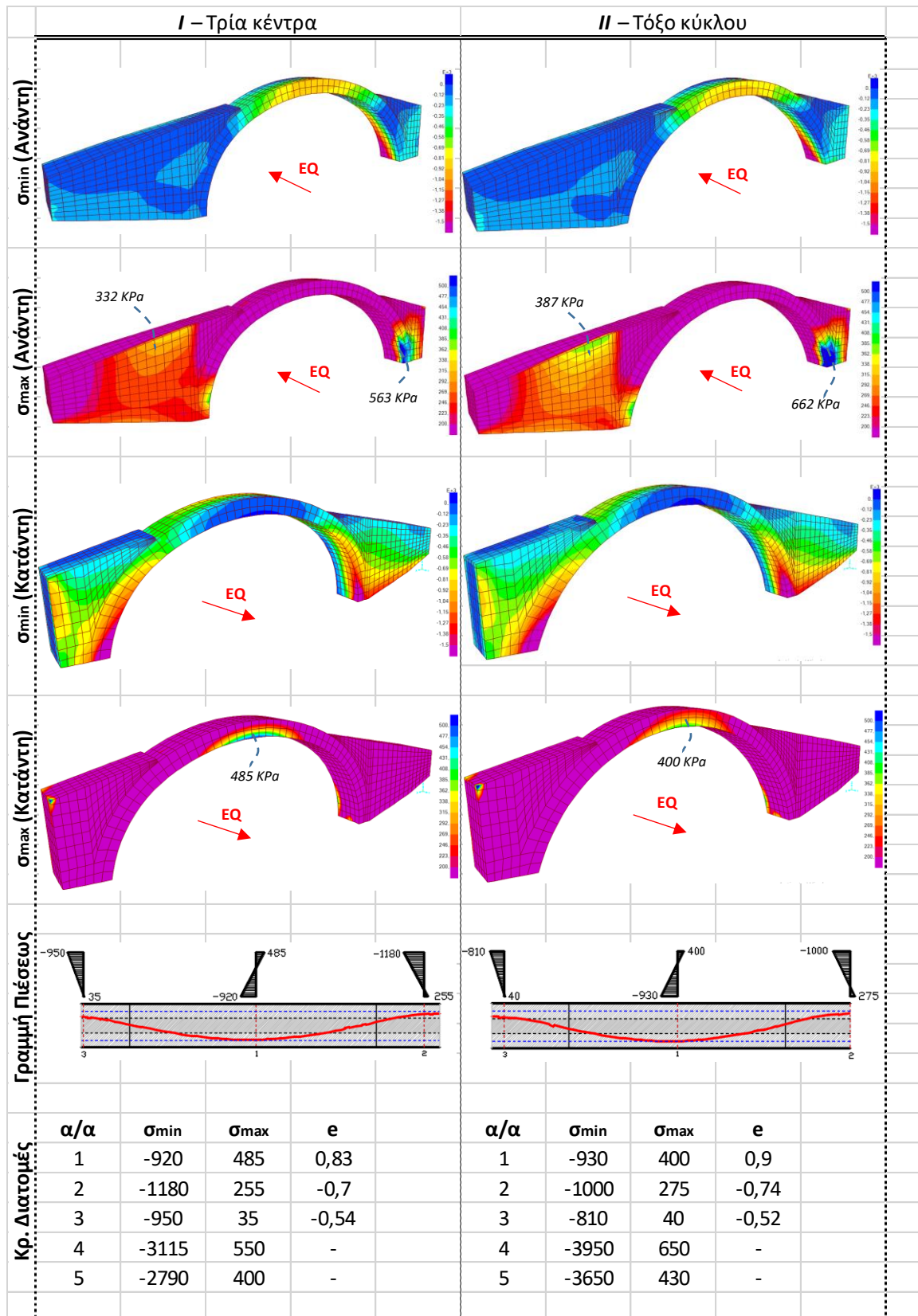
#### Εγκάρσιος Σεισμός

Η ισοδύναμη στατική ανάλυση πραγματοποιείται με ομοιόμορφη επιτάχυνση ώστε να προκύπτει η ίδια παραμόρφωση στην κλείδα με την δυναμική φασματική ανάλυση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις για κάθε εναλλακτική χάραξη, καθώς και οι επιταχύνσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην ισοδύναμη στατική ανάλυση μαζί με τις τέμνουσες βάσεις που προκύπτουν και για τις δύο μεθόδους. Σημειώνεται ότι, καθώς η γέφυρα δεν είναι συμμετρική σε όψη και κάτοψη, τα αποτελέσματα ανά κατεύθυνση παρουσιάζουν μικρές διαφορές όσον αφορά στις τιμές των μεγεθών. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατεύθυνσης που κατά της αναλύσεις προέκυψε δυσμενέστερη.

Πίνακας 6.4 - Αποτελέσματα δυναμικής φασματικής και ισοδύναμης στατικής ανάλυσης

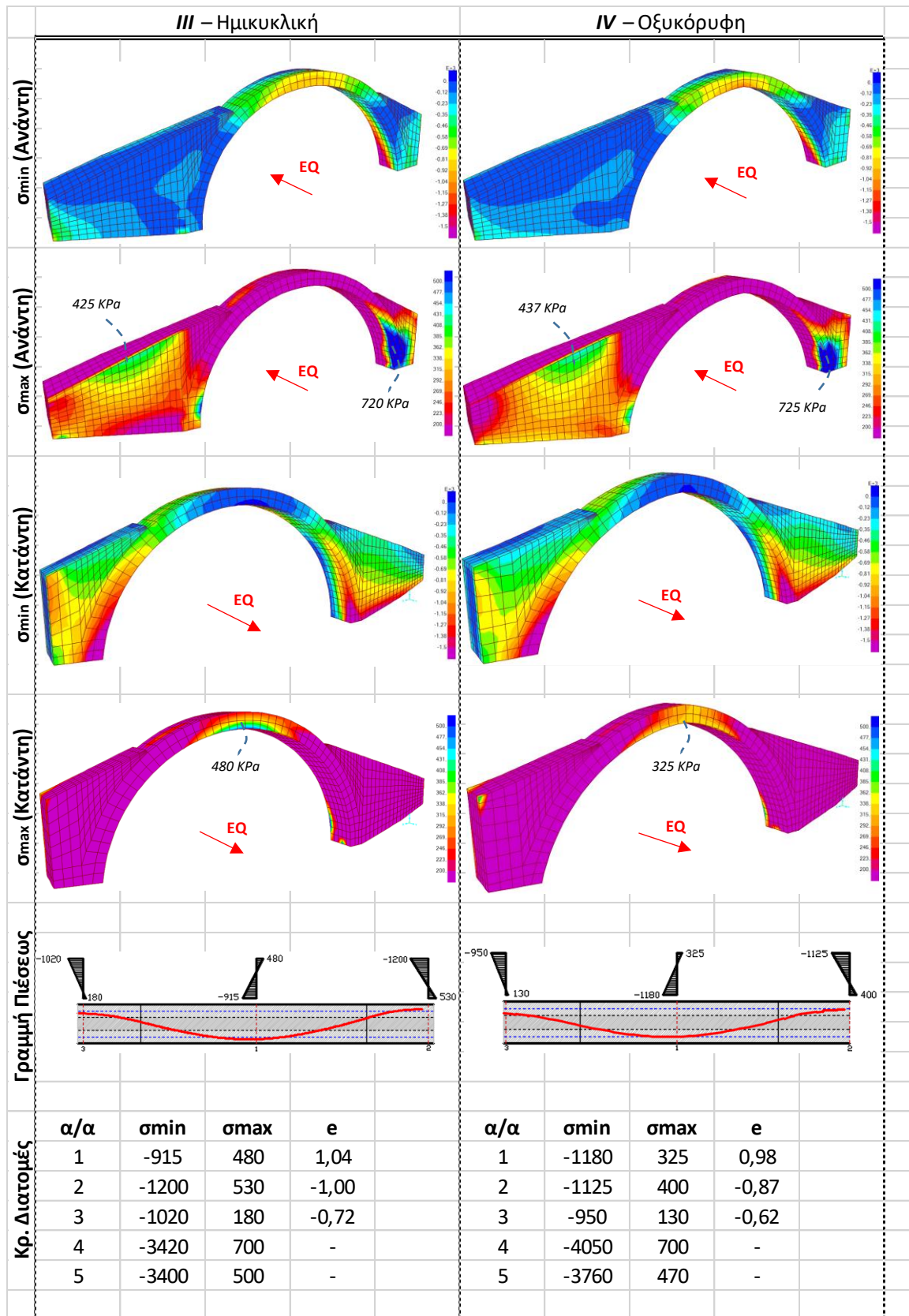
	Δυναμική Φασματική			Ισοδύναμη Στατική		
	PGA (g)	$\delta_{trans}$ (cm)	$F_y$ (KN)	SA (g)	$\delta_{trans}$ (cm)	$F_y$ (KN)
<i>I</i> – Τρία κέντρα	0.16	<b>1.05</b>	460	<b>0.4</b>	1.05	475
<i>II</i> – Τόξο κύκλου	0.16	<b>1.08</b>	477	<b>0.4</b>	1.09	477
<i>III</i> – Ημικυκλική	0.16	<b>1.52</b>	490	<b>0.4</b>	1.51	601
<i>IV</i> – Οξυκόρυφη	0.16	<b>1.34</b>	536	<b>0.4</b>	1.32	535

Στη συνέχεια, πάνω στα διαγράμματα είναι σημειωμένη η κατεύθυνση στην οποία αφορούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης, καθώς και η μέγιστη τιμή των τάσεων που προκύπτει από το λογισμικό στις περιοχές συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων. Επίσης, στα διαγράμματα των γραμμών πίεσεως σημειώνονται με δύο επιπλέον παράλληλες διακεκομμένες γραμμές (εξωτερικές των γραμμών του πυρήνα της διατομής) τα όρια της διατομής που αντιστοιχούν σε εκκεντρότητα  $L/3$ , δηλαδή τα όρια έξω από τα οποία ευρισκόμενη η γραμμή πίεσεως σημαίνει εφελκυσμός στο μεγαλύτερο μέρος της διατομής.



\* Οι κρίσιμες διατομές '4' και '5' αναφέρονται στη Βόρεια και Νότια βάση του τόξου αντίστοιχα.

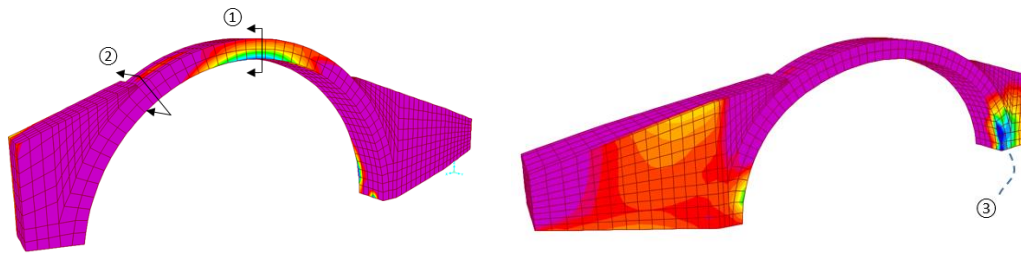




\* Οι κρίσιμες διατομές '4' και '5' αναφέρονται στη Βόρεια και Νότια βάση του τόξου αντίστοιχα.

Έλεγχοι Διατομών

Προκειμένου να τεκμηριωθεί η επάρκεια των τεσσάρων εναλλακτικών χαράξεων έναντι εγκάρσιων σεισμικών φορτίων γίνεται έλεγχος έναντι κάμψης στη διατομή '1' και διάτμησης στη διατομή '2' (εικ.6.14-6.15). Ο έλεγχος κάμψης γίνεται σύμφωνα με την σχέση 7.2<sup>α</sup> του ΚΑΔΕΤ ( $M_{rd}=N_{sd}(1-1.15v_{sd})L/2$ ) που αφορά σε εντός επιπέδου κάμψη, ενώ ο έλεγχος διάτμησης με τη σχέση 6.4 του ΚΑΔΕΤ ( $f_v=f_{v0}+\mu\sigma$ , όπου  $f_{v0}=300$  KPa και  $\mu=0.4$ ). Τέλος, για την περιοχή '3' υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρηγμάτωσης με εφελκυστική αντοχή  $f_{ct}=400$  KPa. Τονίζεται ότι οι εφελκυστικές ρηγματώσεις δεν σημαίνουν κατάρρευση ή αστοχία, καθώς οδηγούν σε διαφοροποίηση των αδρανειακών χαρακτηριστικών και ανακατανομή των εντατικών μεγεθών.



Εικόνες 6.14-6.15 - Περιοχές ελέγχου

Πίνακας 6.5 - Έλεγχος κάμψης διατομής '1'

	N <sub>ed</sub> (KN)	M <sub>ed</sub> (KNm)	M <sub>rd</sub> (KNm)	SF
<i>I</i> – Τρία κέντρα	-942.88	-804.64	1164.12	<b>1.44</b>
<i>II</i> – Τόξο κύκλου	-884.06	-791.48	1096.48	<b>1.38</b>
<i>III</i> – Ημικυκλική	-801.28	-829.32	1000.17	<b>1.21</b>
<i>IV</i> – Οξυκόρυφη	-785.38	-770.84	989.68	<b>1.26</b>

Πίνακας 6.6 - Έλεγχος διάτμησης διατομής '2'

	N <sub>ed</sub> (KN)	V <sub>ed</sub> (KN)	f <sub>vk</sub> (KPa)	V <sub>rd</sub> (KN)	SF
<i>I</i> – Τρία κέντρα	-1063.84	229.83	433.81	1379.53	<b>6.00</b>
<i>II</i> – Τόξο κύκλου	-981.82	216.58	423.49	1346.73	<b>6.22</b>
<i>III</i> – Ημικυκλική	-950.51	250.38	419.56	1334.20	<b>5.33</b>
<i>IV</i> – Οξυκόρυφη	-898.71	219.21	413.05	1313.48	<b>5.99</b>

Πίνακας 6.7 - Συντελεστής ασφαλείας έναντι ρηγμάτωσης περιοχής '3'

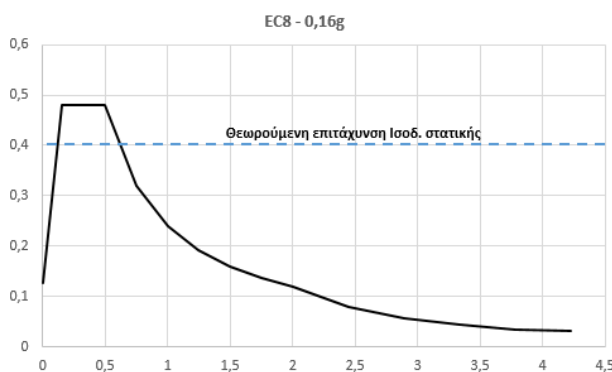
	f <sub>ot,max</sub>	SF
<i>I</i> – Τρία κέντρα	563	<b>0.71</b>
<i>II</i> – Τόξο κύκλου	662	<b>0.61</b>
<i>III</i> – Ημικυκλική	720	<b>0.56</b>
<i>IV</i> – Οξυκόρυφη	725	<b>0.55</b>

Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι, για τον εγκάρσιο σεισμό, όλες οι γραμμές πίεσης βρίσκονται εκτός του πυρήνα στην διατομή της κλείδας. Επιπλέον, η εκκεντρότητα στη διατομή της κλείδας ξεπερνά το συμβατικό όριο του  $L/3$  σε όλες τις εναλλακτικές χαράξεις πλην της εναλλακτικής I (χάραξη τριών κέντρων), όπου η εκκεντρότητα είναι ελαφρώς μειωμένη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Επιπλέον, για την εναλλακτική χάραξη III (ημικυκλική χάραξη), αυξημένη παρουσιάζεται και η εκκεντρότητα της κρίσιμης διατομής '2' στις  $30^\circ$ , όπου επίσης ξεπερνάει το όριο του  $L/3$ .

Από τους ελέγχους εντατικών μεγεθών προκύπτει χαρακτηριστική επάρκεια έναντι διάτμησης σε όλες τις περιπτώσεις (συντελεστής ασφαλείας μεγαλύτερος του 5), όπως επίσης επάρκεια παρατηρείται και στον έλεγχο κάμψης στην κρίσιμη διατομή της κλείδας. Ο συντελεστής ασφαλείας στην προκειμένη περίπτωση παρουσιάζεται αυξημένος στις εναλλακτικές χαράξεις I και II έναντι των υπολοίπων λόγω της ευμενούς επιρροής της μεγαλύτερης αξονικής δύναμης που εμφανίζεται στις καταβιβασμένες χαράξεις. Μπορούμε να συμπεράνουμε λοιπόν ότι, έναντι σεισμικών φορτίων, καλύτερη συμπεριφορά έχουν οι καταβιβασμένες εναλλακτικές χαράξεις I και II που έχουν θεωρηθεί στην παρούσα διπλωματική, και ιδίως η χάραξη τριών κέντρων.

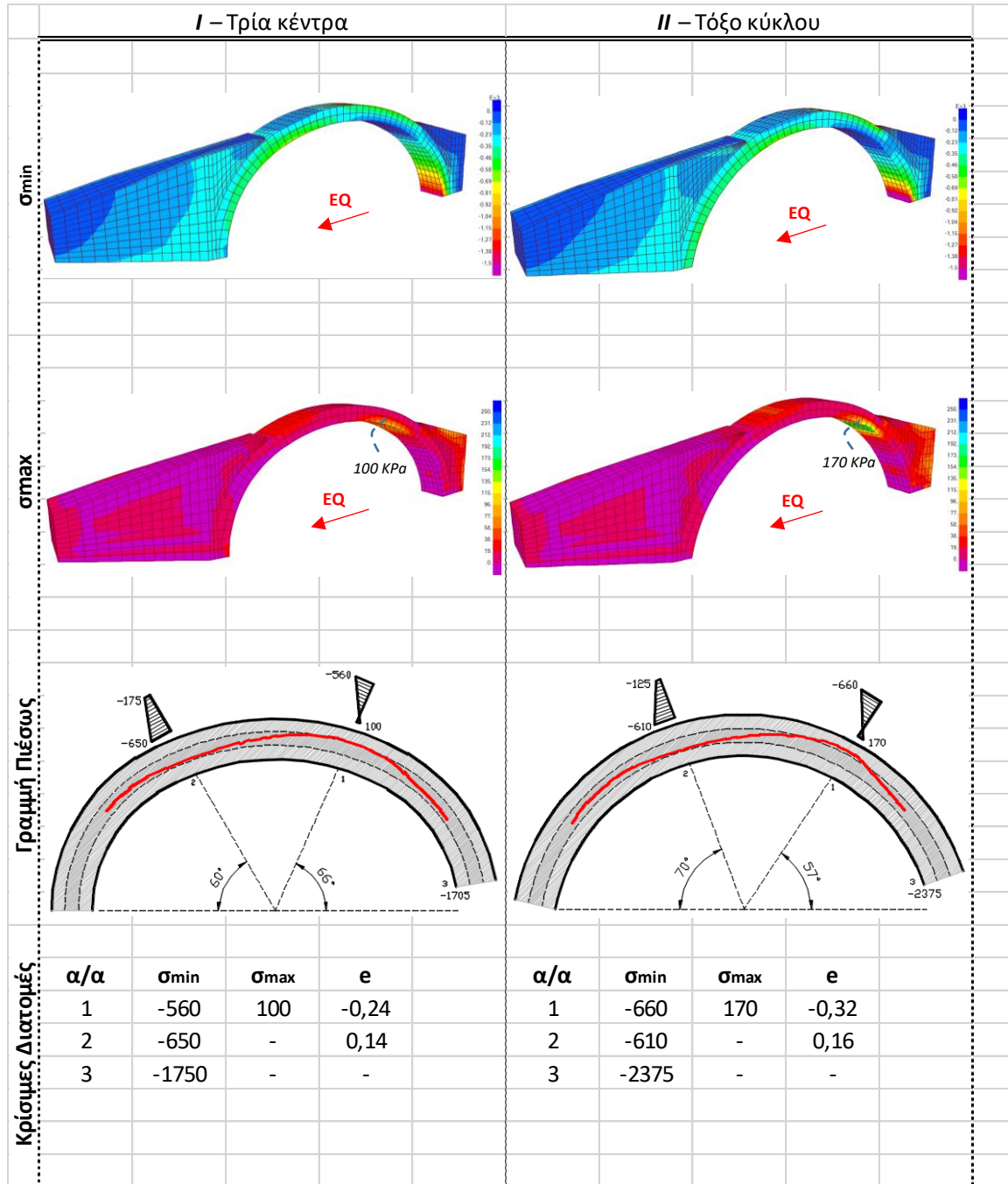
#### Διαμήκης Σεισμός

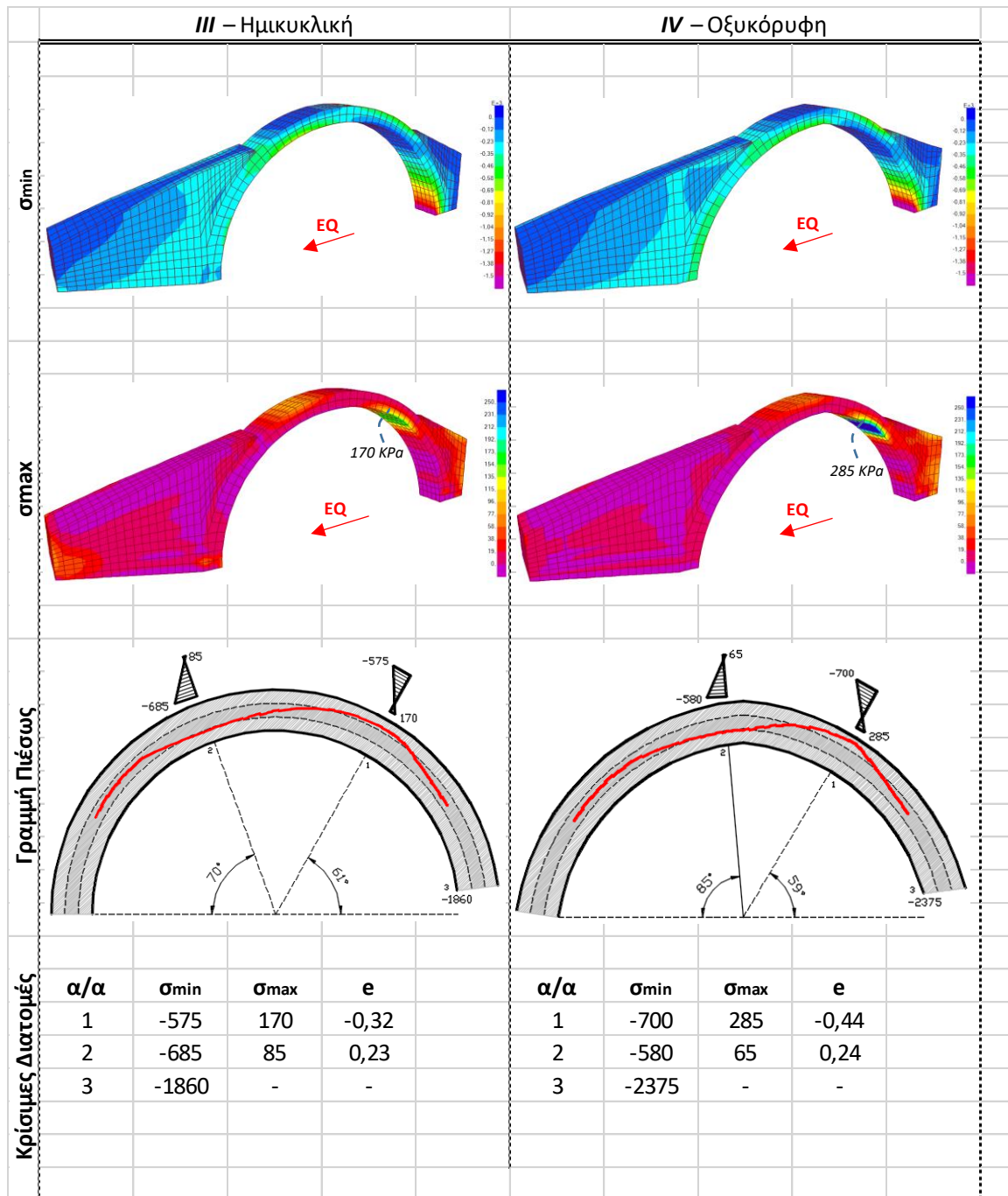
Στην διαμήκη διεύθυνση πραγματοποιείται ισοδύναμη στατική ανάλυση με επιτάχυνση 0.4g για όλες τις περιπτώσεις (εικ.6.16). Η επιτάχυνση που επιλέγεται δίνει σαφώς δυσμενή αποτελέσματα, καθώς από την ιδιομορφική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε φαίνεται ότι η συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών σε αυτήν την σεισμική διεύθυνση είναι σημαντική στη συνολική ιδιομορφική απόκριση (πίνακας 6.8), συνεπώς οι φασματικές επιταχύνσεις των συμμετεχόντων ανώτερων ιδιομορφών είναι αρκετά μικρότερες από την θεωρούμενη της μεθόδου. Όπως και στον εγκάρσιο σεισμό, τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν στην δυσμενέστερη εκ των δύο κατευθύνσεων της διαμήκου σεισμικής διεύθυνσης.



	$\alpha/\alpha$	T (sec)	$U_x$ (%)
Ιδιομορφή	8	0.46	19.2
	3	0.98	13.9
	9	0.46	10.9
	11	0.38	10.3
	24	0.19	7.8

Αριστερά: Εικόνα 6.16 - Θεωρούμενη επιτάχυνση ισοδύναμης στατικής στην διαμήκη διεύθυνση, Δεξιά: Πίνακας 6.8 - Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης στην διαμήκη διεύθυνση





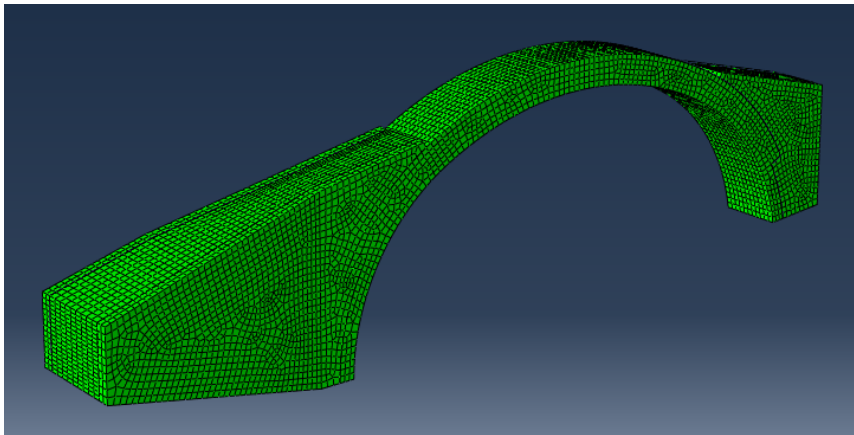
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης της διαμήκουσ σεισμικής διεύθυνσης προκύπτει ότι σε όλες τις περιπτώσεις η γραμμή πίεσως βρίσκεται εκτός πυρήνα στην κρίσιμη διατομή '1'. Επιπλέον, για την εναλλακτική χάραξη IV, δηλαδή την οξυκόρυφη χάραξη, η γραμμή πίεσως βρίσκεται εκτός και του συμβατικού ορίου που ορίζει η εκκεντρότητα  $e_{t/3}=0.40m$ . Την μικρότερη εκκεντρότητα στην κρίσιμη διατομή '1', και συνεπώς την καλύτερη συμπεριφορά έναντι της συγκεκριμένης φόρτισης, παρουσιάζει η καταβιβασμένη χάραξη τριών κέντρων (εναλλακτική I), όπου  $e_1=-0.24m$ . Επιπλέον, για τις περιπτώσεις III και IV η γραμμή πίεσως στην κρίσιμη διατομή '2' φαίνεται να ξεπερνάει επίσης τα όρια του πυρήνα. Η κρίσιμη διατομή '2' στην οξυκόρυφη χάραξη εμφανίζεται πολύ κοντά στην διατομή της κλείδας λόγω της μορφής της γραμμής πίεσως από τα ίδια βάρη. Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι τα καταβιβασμένα γεφύρια, και ιδίως αυτό με χάραξη τριών κέντρων, παρουσιάζουν εμφανή υπεροχή έναντι των εναλλακτικών III και IV για την συγκεκριμένη σεισμική φόρτιση.



#### 6.4 - Αναλύσεις Χρονοϊστορίας

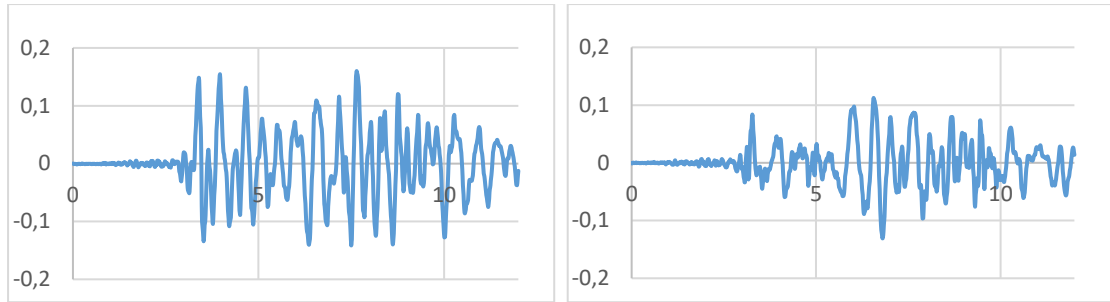
Οι αναλύσεις χρονοϊστορίας γίνονται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, καθώς δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής μη γραμμικού νόμου υλικού σε τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (εικ.6.21). Για τις συγκεκριμένες αναλύσεις έγινε προσπάθεια εύρεσης χρονοϊστοριών από σεισμούς με επίκεντρο κοντά στην γέφυρα της Κλειδωνιάς, όπως για παράδειγμα ο σεισμός της Κόνιτσας του 1996. Δυστυχώς ωστόσο, δεν φαίνεται να υπάρχουν διαθέσιμες στις αντίστοιχες Ελληνικές και Ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένες τέτοιες καταγραφές. Για τις ανάγκες των αναλύσεων επιλέγονται ενδεικτικά τα επιταχυνσιογραφήματα του σεισμού της Λευκάδας του 2003 με κατάλληλο συντελεστή μεγέθυνσης ώστε η μέγιστη επιτάχυνση εδάφους της εγκάρσιας συνιστώσας του σεισμού να είναι 0.16g, όμοια με την εδαφική επιτάχυνση της περιοχής σύμφωνα με την ζώνη σεισμικότητας στην οποία βρίσκεται.

Για τις μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας παραλείφθηκε η προσομοίωση της εναλλακτικής II (χάραξη τόξου κύκλου), αφενός καθώς από τις ελαστικές αναλύσεις δεν παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές σε σχέση με την περίπτωση I (χάραξη τριών κέντρων), αφετέρου για οικονομία χρόνου και υπολογιστικών πόρων, καθώς η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο (άνω των 6 ωρών ανά ανάλυση) και χώρο στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή (άνω των 10GB ανά ανάλυση). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ενδεικτικά το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων την εναλλακτική χάραξης I (χάραξη τριών κέντρων) στο λογισμικό Abaqus.

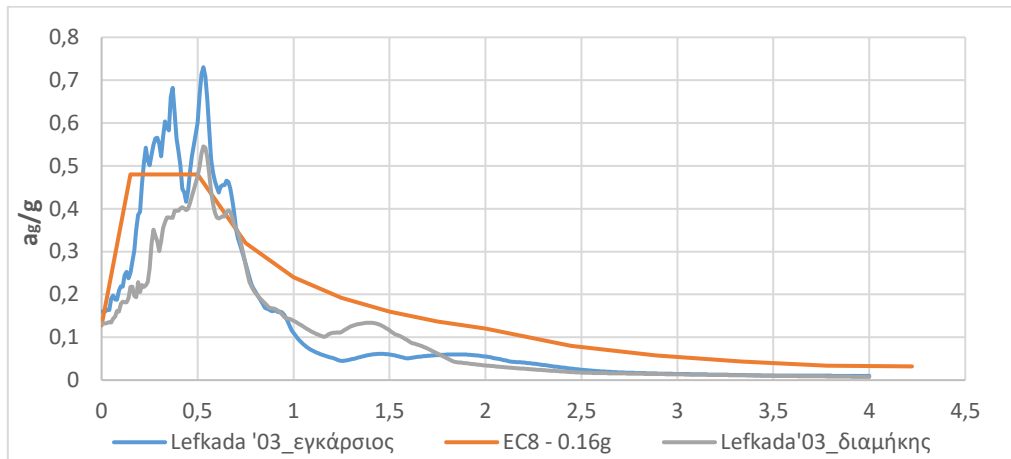


Εικόνα 6.17 - Προσομοίωμα γέφυρας χάραξης τριών κέντρων (εναλλακτική I) στο Abaqus

Στα επόμενα, παρουσιάζονται τα επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις και αφορούν στα πρώτα 12 δευτερόλεπτα της καταγραφής του σεισμού της Λευκάδας (εικ.6.18-6.19). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα φάσματά τους συγκριτικά με το φάσμα επιταχύνσεων του Ευρωκώδικα 8 για εδαφική επιτάχυνση 0.16g (εικ.6.20). Παρατηρείται ότι το φάσμα του εγκάρσιου σεισμού της Λευκάδας βρίσκεται πάνω από το αντίστοιχο του Ευρωκώδικα για τις δεσπόζουσες ιδιοπεριόδους των τριών εναλλακτικών χαράξεων (περί των 0.2sec), συνεπώς αναμένονται ελαφρώς δυσμενέστερα αποτελέσματα από αυτά της δυναμικής φασματικής και της ισοδύναμης στατικής ανάλυσης που έχουν προηγηθεί στην παράγραφο 6.3.



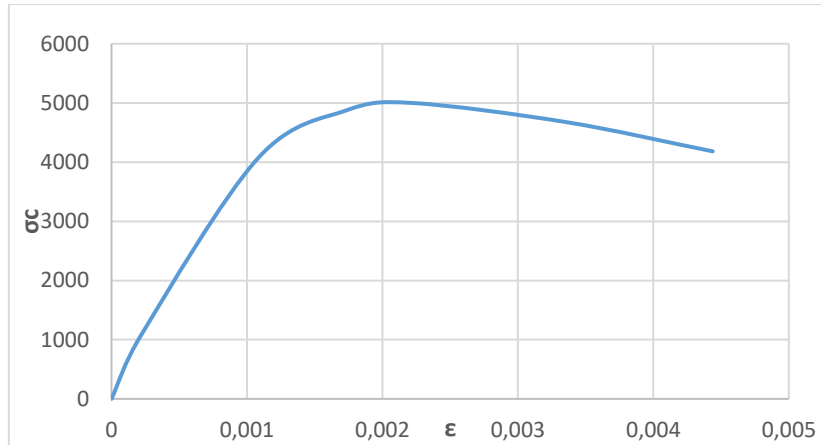
Εικόνες 6.18-6.19 - Επιταχυνσιογραφήματα εγκάρσιας (αριστερά) και διαμήκουσ (δεξιά) συνιστώσας σεισμού Λευκάδας



Εικόνα 6.20 - Φάσματα επιταχύνσεων συνιστωσών σεισμού Λευκάδας

Όσον αφορά στους νόμους των υλικών οι οποίοι εισήχθησαν στο λογισμικό, επιλέχθηκαν νόμοι σκυροδέματος υπό εφελκυσμό και θλίψη με κατάλληλη προσαρμογή της εκάστοτε δυσκαμψίας και αντοχής, ώστε να συνάδουν με τις θεωρούμενες δυσκαμψίες των ελαστικών αναλύσεων (βλ. §6-Προσομοίωση). Συγκεκριμένα, οι νόμοι των υλικών σε θλίψη εισήχθησαν στο Abaqus αυτούσιοι όπως θεωρούνται στο SAP2000 έτσι ώστε να υπάρχει αντιστοιχία των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών που χρησιμοποιούνται στα δύο λογισμικά. Ενδεικτικά, στην εικόνα 6.21 παρακάτω παρουσιάζεται ο νόμος του υλικού των τόξων σε θλίψη όπως εισήχθη στο λογισμικό Abaqus.

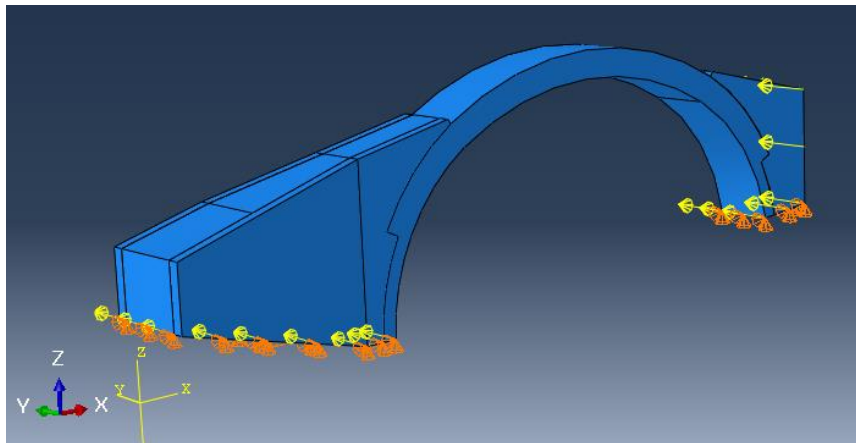
Για την τοιχοποιία, είναι αποδεκτό να εφαρμόζεται η μέθοδος κατανεμημένων ρωγμών όπου θεωρείται ένα συνεχές ομογενές υλικό και να υιοθετούνται καταστατικά προσομοιώματα πλαστικότητας ισότροπης συμπεριφοράς όπως στην περίπτωση του σκυροδέματος. Με αυτό τον τρόπο η ορθότροπη συμπεριφορά της τοιχοποιίας δε λαμβάνεται υπόψη. Στο λογισμικό ABAQUS παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης του υλικού CONCRETE DAMAGED PLASTICITY (CDP), το οποίο είναι ένα συνεχές μοντέλο βλάβης του σκυροδέματος που βασίζεται στην πλαστικότητα (continuum, plasticity-based, damage model for concrete). Το προσομοίωμα αυτό είναι κατάλληλο για εφαρμογές που παρουσιάζεται βλάβη του υλικού υπό συνθήκες φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης όπως είναι η σεισμική φόρτιση.



Εικόνα 6.21 - Νόμος υλικού τοιχοποιίας των τόξων σε θλίψη όπως εισάγεται στο λογισμικό Abaqus

#### 6.4.1 - Εγκάρσια σεισμική διεύθυνση

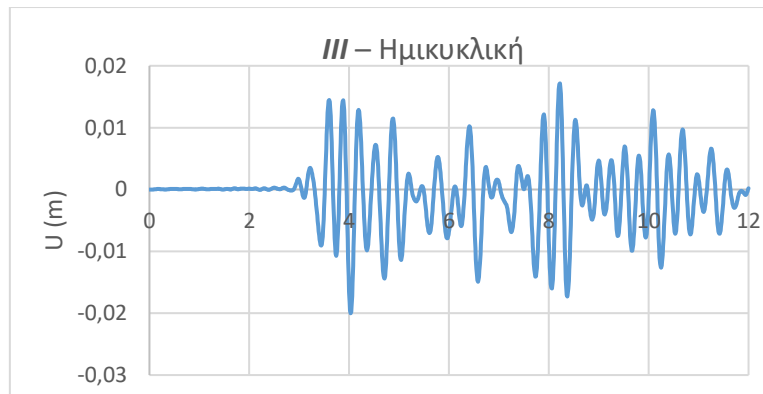
Αρχικά εισάγεται μόνο η εγκάρσια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης της Λευκάδας (εικ.6.22). Στη συνέχεια παρουσιάζεται για τις παραλλαγές I, III και IV η εγκάρσια παραμόρφωση της κλείδας σε μορφή χρονοϊστορίας (εικ.6.23-6.25). Τα αποτελέσματα των μέγιστων παραμορφώσεων που προκύπτουν ανά περίπτωση παρατίθενται στη συνέχεια σε μορφή πίνακα (πίνακας 6.9). Στον πίνακα παρουσιάζεται επίσης και η μέγιστη εγκάρσια παραμόρφωση που προέκυψε από την δυναμική φασματική ανάλυση προς σύγκριση των μεθόδων. Η αυξημένη τιμή των παραμορφώσεων της μη γραμμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας (της τάξης του 30%~40%) οφείλεται κατά ένα μέρος στη χρονοϊστορία του σεισμού της Λευκάδας, το φάσμα του οποίου υπερβαίνει αυτό του Ευρωκώδικα στις κρίσιμες ιδιοπεριόδους.



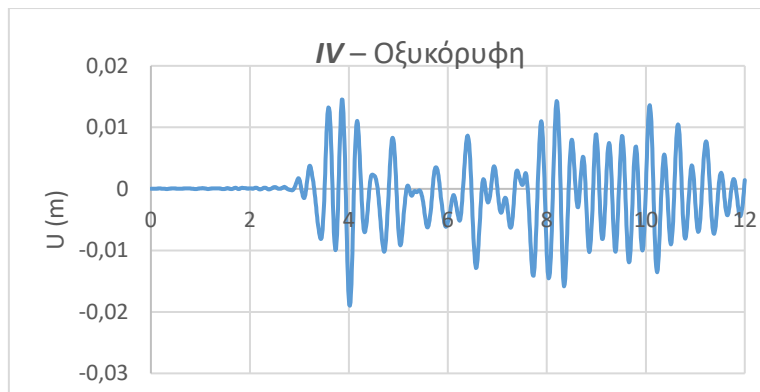
Εικόνα 6.22 - Συνοριακές συνθήκες μονοαξονικής διέγερσης (εικόνα Abaqus)



Εικόνες 6.23 - Χρονοϊστορία εγκάρσια παραμόρφωσης κλείδας χάραξης τριών κέντρων



Εικόνες 6.24 - Χρονοϊστορία εγκάρσια παραμόρφωσης κλείδας ημικυκλικής χάραξης



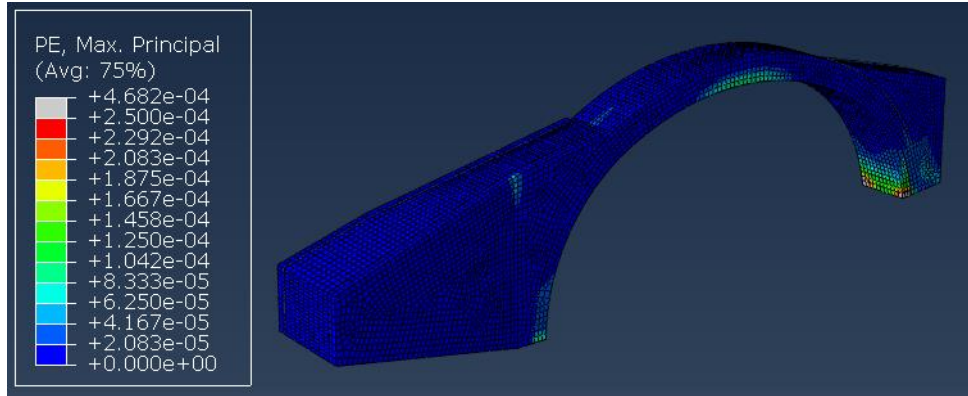
Εικόνες 6.25 - Χρονοϊστορία εγκάρσια παραμόρφωσης κλείδας οξυκόρυφης χάραξης

Πίνακας 6.9 - Μέγιστη εγκάρσια παραμόρφωση στην κλείδα

	<i>I</i> – Τρία κέντρα	<i>III</i> – Ημικυκλική	<i>IV</i> – Οξυκόρυφη
Λευκάδα '03 (cm)	<b>1.34</b>	<b>1.95</b>	<b>1.90</b>
RSA - 0.16g (cm)	1.05	1.52	1.34

Στη συνέχεια παρατίθενται οι εικόνες των περιοχών που έχουν υποστεί πλαστικές παραμορφώσεις, άρα αναμένεται η ανάπτυξη ρωγμών. Οι ρωγμές οφείλονται στην υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας, καθώς δεν παρατηρείται σε καμία εκ των εναλλακτικών υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής. Για την διατομή της κλείδας πραγματοποιείται, στους πίνακες που ακολουθούν, συνδυαστικός έλεγχος εκκεντρότητας ( $e=(e_3/L)^2+(e_2/t)^2<0.5^2$ ).

**I – Τρία κέντρα**

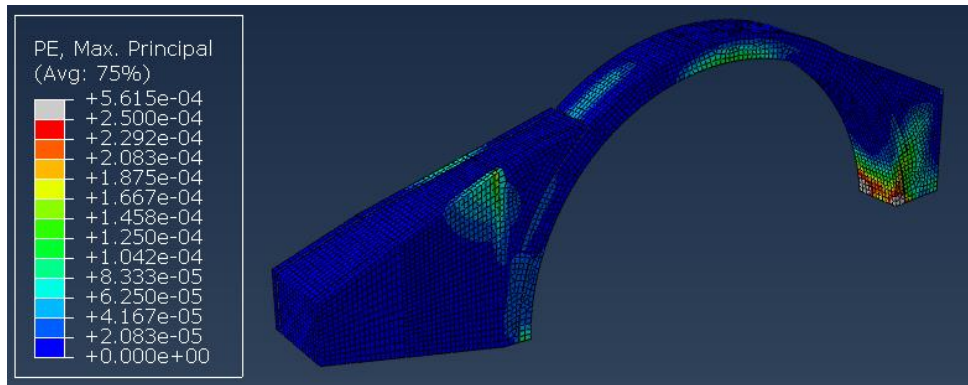


Εικόνα 6.26 - Περιοχές δημιουργίας πλαστικών παραμορφώσεων (εικόνα Abaqus)

Πίνακας 6.10 - Έλεγχος εκκεντρότητας εναλλακτικής I

Λευκάδα '03		
Αξονική	N (KN)	-853
Ροπή εντός επιπέδου	M <sub>2</sub> (KNm)	135
Εκκεντρότητα εντός επιπέδου	e <sub>2</sub> =M <sub>2</sub> /N (m)	0.16
Ροπή εκτός επιπέδου	M <sub>3</sub> (KNm)	1089
Εκκεντρότητα εκτός επιπέδου	e <sub>3</sub> =M <sub>3</sub> /N (m)	1.28
Συνδυαστικός έλεγχος εκκεντρότητας	e=(e <sub>3</sub> /L) <sup>2</sup> +(e <sub>2</sub> /t) <sup>2</sup>	0.249
Συντ. ασφαλείας ελέγχου εκκεντρότητας	SF=(0.5) <sup>2</sup> /e	<b>1.01</b>

**III – Ημικυκλική**



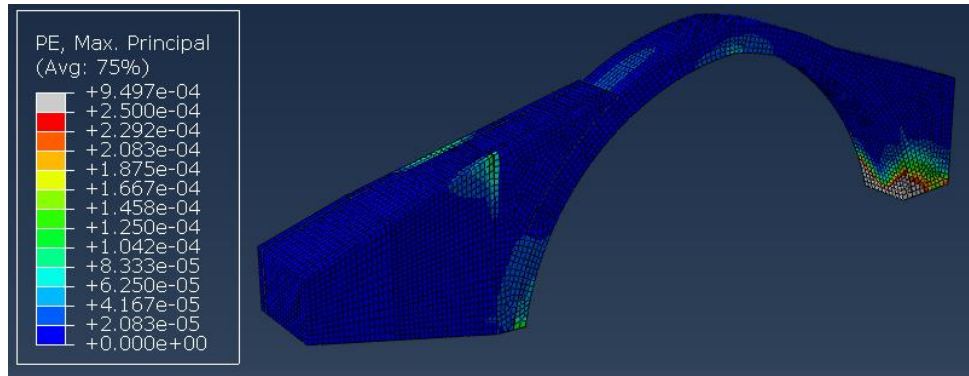
Εικόνα 6.27 - Περιοχές δημιουργίας πλαστικών παραμορφώσεων (εικόνα Abaqus)

Πίνακας 6.11 - Έλεγχος εκκεντρότητας εναλλακτικής III

Λευκάδα '03		
Αξονική	N (KN)	-731
Ροπή εντός επιπέδου	M <sub>2</sub> (KNm)	86
Εκκεντρότητα εντός επιπέδου	e <sub>2</sub> =M <sub>2</sub> /N (m)	0.12
Ροπή εκτός επιπέδου	M <sub>3</sub> (KNm)	1188
Εκκεντρότητα εκτός επιπέδου	e <sub>3</sub> =M <sub>3</sub> /N (m)	1.62
Συνδυαστικός έλεγχος εκκεντρότητας	e=(e <sub>3</sub> /L) <sup>2</sup> +(e <sub>2</sub> /t) <sup>2</sup>	0.385
Συντ. ασφαλείας ελέγχου εκκεντρότητας	SF=(0.5) <sup>2</sup> /e	<b>0.65</b>



**IV – Οξυκόρυφη**



Εικόνα 6.28 - Περιοχές δημιουργίας πλαστικών παραμορφώσεων (εικόνα Abaqus)

Πίνακας 6.12 - Έλεγχος εκκεντρότητας εναλλακτικής IV

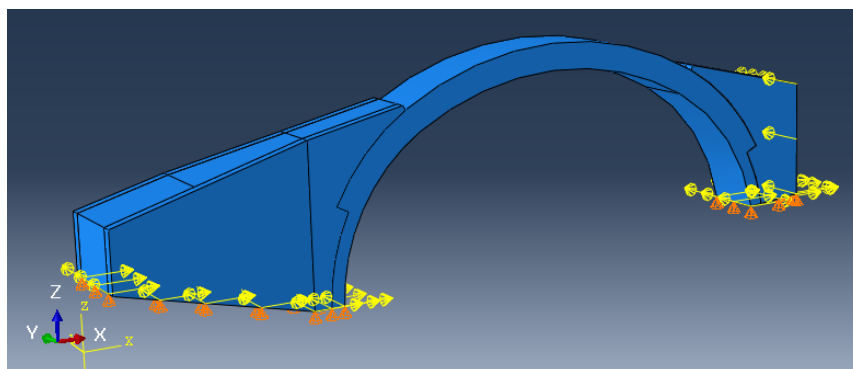
		Λευκάδα '03
Αξονική	N (KN)	-753
Ροπή εντός επιπέδου	M <sub>2</sub> (KNm)	75
Εκκεντρότητα εντός επιπέδου	e <sub>2</sub> =M <sub>2</sub> /N (m)	0.10
Ροπή εκτός επιπέδου	M <sub>3</sub> (KNm)	1076
Εκκεντρότητα εκτός επιπέδου	e <sub>3</sub> =M <sub>3</sub> /N (m)	1.43
Συνδυαστικός έλεγχος εκκεντρότητας	e=(e <sub>3</sub> /L) <sup>2</sup> +(e <sub>2</sub> /t) <sup>2</sup>	0.297
Συντ. ασφαλείας ελέγχου εκκεντρότητας	SF=(0.5) <sup>2</sup> /e	<b>0.84</b>

Όπως και στις ελαστικές αναλύσεις, κρίσιμες περιοχές όπου αναμένονται εφελκυστικές ρηγματώσεις για όλες τις εναλλακτικές προκύπτουν η περιοχή της κλείδας, οι βάσεις των βάρων (κυρίως του βόρειου), καθώς και τα τύμπανα, κυρίως στην εναλλακτική χάραξη III (εικόνα 6.26), όπου το κέντρο βάρους βρίσκεται ψηλότερα. Επίσης, για τις εναλλακτικές III και IV παρατηρείται συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων στο εξωράχιο στις περιοχές μετάβασης από τις προσβάσεις στο καθαρό τόξο (εικ.6.26-6.27). Η συγκέντρωση αυτή οφείλεται στις διατμητικές τάσεις στην περιοχή, σε συνδυασμό με την διαφορά του μέτρου ελαστικότητας του γεμίσματος και των τυμπάνων, δεν αποτελεί ωστόσο μηχανισμό αστοχίας καθώς παρουσιάζεται χαρακτηριστική επάρκεια στις συγκεκριμένες διατομές από τον έλεγχο έναντι διάτμησης (βλ. §6.3.3).

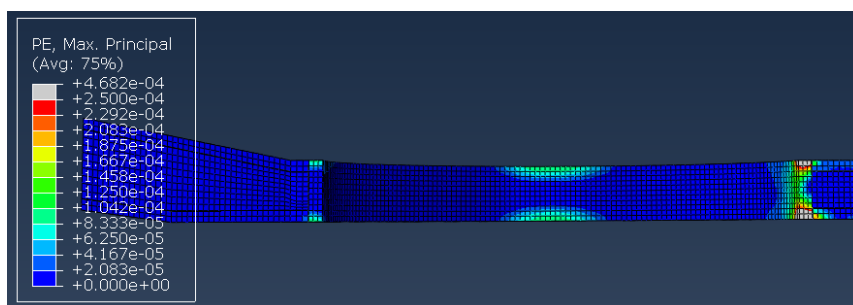
Από τον συνδυαστικό έλεγχο εκκεντρότητας στην διατομή της κλείδας προκύπτει οριακή επάρκεια της εναλλακτικής I (χάραξη τριών κέντρων) και ανεπάρκεια για τις εναλλακτικές III και IV. Η επάρκεια της χάραξης τριών κέντρων οφείλεται κυρίως στην αυξημένη αξονική δύναμη (χαρακτηριστικό των καταβιβασμένων χαράξεων) η οποία έχει ευεργετικό ρόλο στους ελέγχους. Συνεπώς, ο παραπάνω έλεγχος καταδεικνύει μια σχετική υπεροχή της χάραξης τριών κέντρων έναντι ιδιαίτερα της ημικυκλικής, αλλά και της οξυκόρυφης, για τα εγκάρσια σεισμικά φορτία.

### 6.4.2 - Διερεύνηση επιρροής διαμήκουσ συνιστώσας

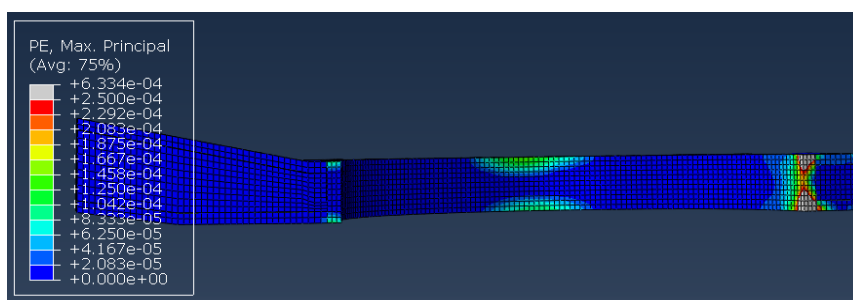
Τέλος, για την χάραξη I των τριών κέντρων πραγματοποιείται ανάλυση χρονοϊστορίας προσθέτοντας τη διαμήκη συνιστώσα του σεισμού της Λευκάδας προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή της σε σχέση με την ανάλυση της παραγράφου 6.4.1 που αφορά μόνο την εγκάρσια σεισμική διεύθυνση (εικ.6.29) Παρακάτω παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα των αναλύσεων για τις δυο δυσμενέστερες διακριτές χρονικές ( $t_1=3.99\text{sec}$  και  $t_2=9.25\text{sec}$ ), καθώς και εικόνες των περιοχών του τόξου για κάθε ανάλυση που έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση.



Εικόνα 6.29 - Συνοριακές συνθήκες διαξονικής διέγερσης (εικόνα Abaqus)



Εικόνα 6.30 - Άνοψη, περιοχές δημιουργίας πλαστικών παραμορφώσεων - Ανάλυση εγκάρσιας σεισμικής συνιστώσας (εικόνα Abaqus)



Εικόνα 6.31 - Άνοψη, περιοχές δημιουργίας πλαστικών παραμορφώσεων - Προσθήκη διαμήκουσ σεισμικής συνιστώσας (εικόνα Abaqus)

Πίνακας 6.13 - Επιρροή διαμήκουσ συνιστώσας τη χρονική στιγμή **t=3.99sec**

		Μονοαξονικό	Διαξονικό
Αξονική	N (KN)	-853	-853
Ροπή εντός επιπέδου	M2 (KNm)	135	130
Εκκεντρότητα εντός επιπέδου	$e2=M2/N$ (m)	0.16	0.15
Ροπή εκτός επιπέδου	M3 (KNm)	1089	1092
Εκκεντρότητα εκτός επιπέδου	$e3=M3/N$ (m)	1.28	1.28
Συνδυαστικός έλεγχος εκκεντρότητας	$e=(e3/L)^2+(e2/t)^2$	0.249	0.249
Συντ. ασφαλείας ελέγχου εκκεντρότητας	$SF=(0.5)^2/e$	<b>1.01</b>	<b>1.01</b>

Πίνακας 6.14 - Επιρροή διαμήκουσ συνιστώσας τη χρονική στιγμή **t=9.25sec**

		Μονοαξονικό	Διαξονικό
Αξονική	N (KN)	-837	-828
Ροπή εντός επιπέδου	M2 (KNm)	146	203
Εκκεντρότητα εντός επιπέδου	$e2=M2/N$ (m)	0.17	0.25
Ροπή εκτός επιπέδου	M3 (KNm)	1040	1042
Εκκεντρότητα εκτός επιπέδου	$e3=M3/N$ (m)	1.24	1.26
Συνδυαστικός έλεγχος εκκεντρότητας	$e=(e3/L)^2+(e2/t)^2$	0.241	0.267
Συντ. ασφαλείας ελέγχου εκκεντρότητας	$SF=(0.5)^2/e$	<b>1.04</b>	<b>0.94</b>

Κατά τη χρονική στιγμή  $t=9.25sec$ , με την προσθήκη της διαμήκουσ σεισμικής συνιστώσας στην ανάλυση, προκύπτει ανεπάρκεια από τον συνδυαστικό έλεγχο εκκεντρότητας. Όπως είναι αναμενόμενο, η προσθήκη της συνιστώσας αυτής προκαλεί αύξηση της εντός επιπέδου ροπής  $M_2$  της τάξης του 40%. Η αύξηση αυτή οδηγεί κατά τον συνδυαστικό έλεγχο εκκεντρότητας σε μείωση του συντελεστή ασφαλείας κατά 10% (από 1.04 σε 0.94 - Πίνακας 6.14). Αντίστοιχη είναι και η εικόνα που προκύπτει από τη σύγκριση των περιοχών δημιουργίας πλαστικών παραμορφώσεων, όπου στην περίπτωση της διαξονικής σεισμικής διέγερσης η περιοχή δημιουργίας βλαβών στην περιοχή της κλείδας είναι ελαφρώς διευρυμένη (εικ.6.28-6.29).



## 7 - Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία μπορούν να οργανωθούν σε δύο επίπεδα. Το πρώτο αφορά στα μορφολογικά χαρακτηριστικά της γέφυρας της Κλειδωνιάς και στις επιρροές οι οποίες ενδεχομένως ασκήθηκαν σε αυτά από την γεφυροποιία στην Ευρώπη. Το δεύτερο αφορά στα συγκριτικά αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τις τέσσερις εναλλακτικές χαράξεις που θεωρούνται.

Όσον αφορά στα μορφολογικά χαρακτηριστικά, η διερεύνηση ξεκινάει με την προσπάθεια εύρεσης της γεωμετρικής χάραξης του τόξου. Η διαδικασία της διερεύνησης της χάραξης παρουσιάζει σημαντικό βαθμό δυσκολίας αρχικά, λόγω της πληθώρας των σημείων της αποτύπωσης, από τα οποία πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία. Επιπλέον, καθότι από τρία τυχαία σημεία της αποτύπωσης του τόξου προκύπτει κύκλος διαφορετικού κέντρου και ακτίνας, καθίσταται δύσκολη η επιλογή των κατάλληλων σημείων του εσωραχίου που ανήκουν σε περιφέρεια τόξου κύκλου. Τέλος, η διερεύνηση οφείλει να γίνει έχοντας υπόψιν τις παραμορφώσεις που έχει υποστεί διαχρονικά η κατασκευή, είτε αυτές οφείλονται στο ιστορικό φορτίσεων, είτε στον ερπυσμό, είτε σε κατασκευαστικές ατέλειες, γεγονός που προσθέτει έναν ακόμα βαθμό δυσκολίας στην διαδικασία της διερεύνησης.

Όπως είδαμε στην παράγραφο 3.3, για το τόξο της γέφυρας της Κλειδωνιάς προκύπτει μια καταβιβασμένη χάραξη τριών κέντρων με επίκεντρες γωνίες 60 μοιρών (εικ.3.19). Αυτή αποτελεί μια νεωτεριστική μορφή που ξεφεύγει από τις συνήθεις χαράξεις που εμφανίζονται στον Ελλαδικό χώρο κατά την περίοδο. Μελετώντας τους κανόνες σχεδιασμού στην Ευρώπη κατά τον 18<sup>ο</sup> αιώνα, συμπεραίνουμε ότι ο σχεδιασμός της γέφυρας της Κλειδωνιάς είναι σαφώς επηρεασμένος από τα Ευρωπαϊκά τεκταινόμενα της περιόδου αυτής, έστω κι' αν είναι κατασκευασμένη έναν αιώνα αργότερα. Στο συμπέρασμα αυτό καταλήγουμε καθώς φαίνεται ότι η γέφυρα έχει παρόμοια χάραξη με τις καταβιβασμένες γέφυρες που μελέτησε στο έργο του ο Γάλλος μηχανικός J.R.Perronet, καθώς και λυγηρότητα τόξου που σχεδόν ταυτίζεται με τους κανόνες σχεδιασμού που εξέδωσε για τις συγκεκριμένες χαράξεις.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα των αναλύσεων, η σύγκριση ξεκινά με την ανάλυση του ίδιου βάρους. Για την συγκεκριμένη φόρτιση συμπεραίνουμε ότι καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι εναλλακτικές II και III, δηλαδή αυτές των οποίων οι χαράξεις των τόξων ανήκουν σε περιφέρεια κύκλου, και χειρότερη η εναλλακτική IV (οξυκόρυφη χάραξη). Ωστόσο, η προσθήκη του κινητού φορτίου '1' έχει ευμενή επιρροή στην οξυκόρυφη χάραξη, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές, λόγω της μορφής της γραμμής πρέσσης από το ίδιο βάρος. Η επιρροή και των δύο θεωρούμενων κινητών φορτίων σε όλες τις περιπτώσεις είναι σχετικώς μικρή, συνεπώς κύρια στατική φόρτιση είναι το ίδιο βάρος. Για τα σεισμικά φορτία καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, και στις δύο διευθύνσεις, καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι καταβιβασμένες χαράξεις, δηλαδή οι εναλλακτικές I και II και ιδιαίτερως η χάραξη τριών κέντρων. Ιδίως στην εγκάρσια σεισμική διεύθυνση η μεγαλύτερη δυσκαμψία και αξονική δύναμη των καταβιβασμένων χαράξεων δρουν ευεργετικά στην σύγκριση έναντι των υπολοίπων εναλλακτικών.

Η υπεροχή της καταβιβασμένης χάραξης τριών κέντρων έναντι εγκάρσιων σεισμικών φορτίων επιβεβαιώνεται και στις αναλύσεις χρονοϊστορίας όπου ο συντελεστής ασφαλείας του συνδυαστικού ελέγχου εκκεντρότητας στη διατομή της κλείδας προκύπτει αυξημένος κατά 50% και 20% από την ημικυκλική και την οξυκόρυφη χάραξη αντίστοιχα. Τέλος, με την



προσθήκη της διαμήκουσ σεισμικής συνιστώσας στην ανάλυση χρονοϊστορίας προκύπτει μείωση του συντελεστή ασφαλείας της τάξης του 10% σε σχέση με την θεώρηση μονοαξονικού σεισμού.

## Παράρτημα

### Α. Επίσκεψη στις γέφυρες του Ν. Ιωαννίνων

Την περίοδο από 13/5/21 έως 16/6/21 πραγματοποιήθηκε ταξίδι στο Νομό Ιωαννίνων. Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες των γεφυρών στις οποίες έγινε επίσκεψη, καθώς και πίνακας με το πάχος των τόξων αυτών όπως επιτόπου μετρήθηκε.

#### Γέφυρα Κόνιτσας



#### Γέφυρα Κλειδωνιάς





Γέφυρα Κοκκόρου ή Νούτσου



Γέφυρα Πλακίδα ή Καλογερίκο





Γέφυρα Κατετάν Αρκούδα



Γέφυρα Καμπέρ Αγά





[Γέφυρα Πλάκας](#)



[Γέφυρα Πολιτσάς](#)





Γεφύρι της Άρτας



Πίνακας Α1 - Λυγηρότητες τόξων γεφυρών

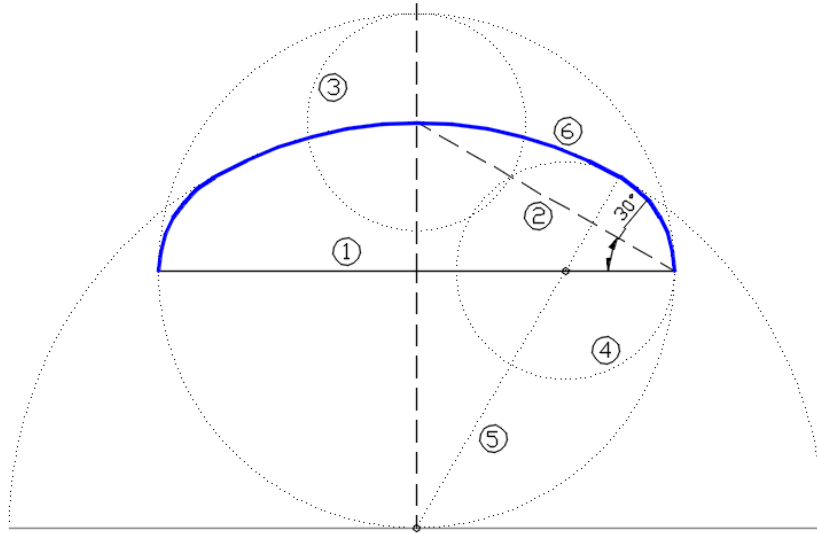
Γέφυρα	Άνοιγμα τόξου*, s (m)	Πάχος τόξου**, t (m)	Λυγηρότητα, λ=s/t
Κόνιτσας	35.60	1.40	25.4
Κλειδωνιάς	21.49	1.20	17.9
Κόκκορη	23.60	1.10	21.5
Πλακίδα	15.00	0.70	21.4
Καπετάν Αρκούδα	9.60	0.50	19.2
Καμπέρ Αγά	17.00	1.00	17.0
Πλάκας	40.00	1.55	25.8
Άρτας	24.00	-	-

\* Το άνοιγμα των τόξων προκύπτει από στοιχεία στο διαδίκτυο, πλην της γέφυρας της Κλειδωνιάς

\*\* Το πάχος των τόξων προέκυψε από επιτόπου μετρήσεις κατά την επίσκεψη στην αντίστοιχη γέφυρα

## Β. Γεωμετρική μέθοδος κατασκευής τόξου τριών κέντρων

Στη συνέχεια ακολουθεί μια εναλλακτική μέθοδος σχεδιασμού καταβιβασμένου τόξου τριών κέντρων σε σχέση με αυτήν παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.1. Σημειώνεται ότι με την παρακάτω μέθοδο προκύπτει, για άνοιγμα  $s=21.49\text{m}$ , τόξο με αρκετά μικρότερο βέλος από αυτό της γέφυρας της Κλειδωνιάς.

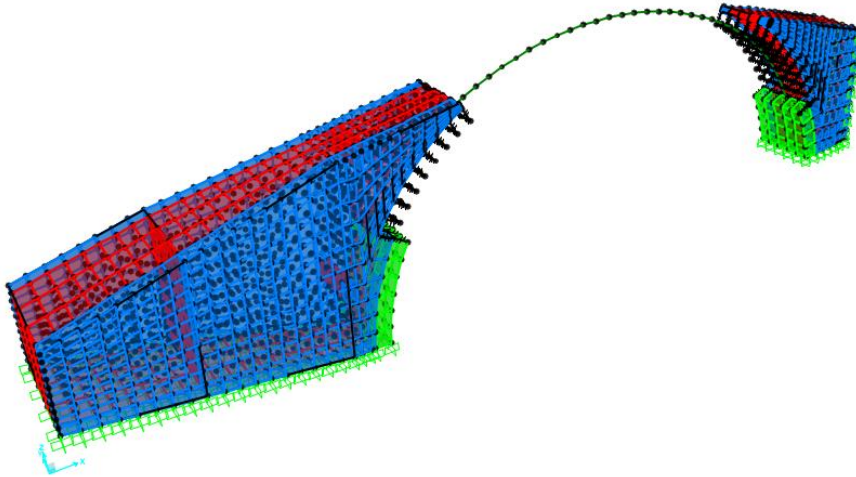


Εικόνα Β1 - Γεωμετρική μέθοδος κατασκευής τόξου τριών κέντρων

- ① - Επιλογή ανοίγματος και χάραξη μεσοκαθέτου
- ② - Χάραξη ευθείας γωνίας  $30^\circ$
- ③ - Χάραξη κύκλου με κέντρο το σημείο τομής της ευθείας '2' και της μεσοκαθέτου και ακτίνας όση η απόσταση του σημείου αυτού από τον κύκλο ίσης διαμέτρου με το άνοιγμα
- ④ - Χάραξη κύκλου ίσης ακτίνας με αυτόν του βήματος '3'
- ⑤ - Χάραξη ευθείας κάθετης στην ευθεία '2' που περνάει από το κέντρο του κύκλου '4'
- ⑥ - Χάραξη κύκλου με κέντρο το σημείο τομής της ευθείας '5' και της μεσοκαθέτου και ακτίνας ίσης με το αντίστοιχο ευθύγραμμο τμήμα

### Γ. Προσομοίωση του τόξου με γραμμικά στοιχεία

Πέραν των προσομοιώσεων με χωρικά στοιχεία (solid elements), προσομοίωση του τόξου σε όλες της εναλλακτικές έγινε και με γραμμικά στοιχεία (beam elements) προκειμένου η μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού να προσεγγιστεί με fiber hinges. Ωστόσο, επιλέχθηκε εν τέλει η προσομοίωση στο Abaqus, όπου δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής μη γραμμικού νόμου υλικού σε χωρικά στοιχεία, πράγμα το οποίο δεν ισχύει στο SAP2000.



Εικόνα Γ1 - Προσομοίωση του τόξου με γραμμικά στοιχεία στο SAP2000

Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά για την εναλλακτική I (χάραξη τριών κέντρων) συγκριτικός πίνακας των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους προσομοίωσης για τη διατομή της κλείδας.

Πίνακας Γ1 - Σύγκριση εντατικών μεγεθών μεταξύ των μεθόδων

	Ίδιο Βάρος		Εγκάρσιος Σεισμός	
Beam elements	N (KN)	-904	N (KN)	-954
	M <sub>3</sub> (KNm)	125	M <sub>2</sub> (KNm)	780
	e <sub>3</sub>	<b>0.138</b>	e <sub>2</sub>	<b>0.818</b>
Solid elements	N (KN)	-912	N (KN)	-941
	M <sub>3</sub> (KNm)	118	M <sub>2</sub> (KNm)	805
	e <sub>3</sub>	<b>0.129</b>	e <sub>2</sub>	<b>0.855</b>





## Βιβλιογραφία

- [1] Βιντζηλαίου Ελισάβετ, “Σημειώσεις για το μάθημα Μηχανική της Τοιχοποιίας”, εκδόσεις ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2005
- [2] Γιαννέλος Δ. Χρήστος , “Πέτρινη Τοξωτή Γέφυρα Β. Κηφισού στη θέση «Νερούτσου Μύλος”, Μεταπτυχιακή Εργασία ΔΠΜΣ “Προστασία Μνημείων”, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2014
- [3] Διεπιστημονική ομάδα ΕΜΠ, “Το γεφύρι της πλάκας - Το έργο του ΕΜΠ για την αποκατάστασή του”, ΕΜΠ, 2016
- [4] “Ελληνική Γεώσφαιρα - Γεωδιαδρομές στην Ελλάδα: Βίκος-Αώος”, περιοδική έκδοση ΙΓΜΕ, τεύχος 8, Δεκέμβριος 2009
- [5] “Κανονισμός για Ενίσχυση και Δομητικές Επεμβάσεις Τοιχοποιίας” (ΚΑΔΕΤ) Σχέδιο ‘1’, ΟΑΣΠ, Μάρτιος 2019
- [6] Καπρινιώτη Πανωραία, Τσέλιος Παρασκευάς, Παϊδας, αφίσα από την ομιλία με τίτλο: “Το πέτρινο γεφύρι της Κλειδωνιάς ή Κλειδωνιαβίστας: Προσέγγιση στη δομή και τη λειτουργία του στον χώρο και στον χρόνο” του συνεδρίου “Το αρχαιολογικό έργο στη Βορειοδυτική Ελλάδα και στα νησιά του Ιονίου”, Ιωάννινα 2017
- [7] Καραντώνη Φιλίτσα, “Κατασκευές από Τοιχοποιία”, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2012
- [8] Κυνηγού Α. Μαρία, “Αποτίμηση και Αποκατάσταση Διατηρητέου Κτιρίου Φέρουσας Τοιχοποιίας Μέσω Ανελαστικών Αναλύσεων”, Μεταπτυχιακή Εργασία ΔΠΜΣ “Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών”, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2018
- [9] Λεονταρίτης Άρης-Δημήτριος - “Υδρολογική Μελέτη του Οικοσυστήματος Αώου-Βοϊδομάτη”, Μεταπτυχιακή Εργασία ΔΠΜΣ “ Περιβάλλον και Ανάπτυξη Ορεινών Περιοχών” ΕΜΠ, Αθήνα 2014
- [10] Ντόκος Ν. Δημήτριος, “Νεοτεκτονική - Γεωμορφολογική μελέτη της Ηπείρου (Βορειοδυτική Ελλάδα) και Σύνταξη Νεοτεκτονικού Χάρτη με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ, Αθήνα 2017
- [11] Παπαζάχος Βασίλειος - Παπαζάχου Κατερίνα, “Οι σεισμοί της Ελλάδας”, εκδόσεις Ζήτη, έτη έκδοσης: 1989, 1999, Θεσσαλονίκη 2003
- [12] Παπακώστα-Σινίκη Νίτσα, “Πέτρινα Γεφύρια Ιωαννίνων”, Νομαρχιακή Διοίκηση Ιωαννίνων, 2002
- [13] Σιαμόπουλος Κωνσταντίνος, “Υγεία και γράμματα στην Ήπειρο του 19ου αιώνα: Ο ρόλος της ευποιίας”, Ομιλία του Ομότιμου Καθηγητή της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων και Αποφοίτου της Ζωσιμαίας Σχολής Κώστα Σιαμόπουλου στην εναρκτήρια συνεδρία του Πανελληνίου Συνεδρίου των Νοσηλευτών Νεφρολογίας που πραγματοποιήθηκε στα Γιάννενα τον Μάιο 2016
- [14] Σταυρίδης Θ. Λεωνίδα, “Στατική των Δομικών Φορέων” Μέρος Α', εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2008
- [15] Φλώρος Ιωάννης, “Η παιδεία στα Ιωάννινα κατά της Τουρκοκρατία (18<sup>ος</sup> αιώνας - Αρχές 20<sup>ου</sup> αιώνα”, Johannesburg 2005

- [16] Χατζηδάκης Άρης, Εύδου Ζωή, “Τα λίθινα γεφύρια του νομού Ρεθύμνου : αναδρομή στην ιστορία τους και την ιστορία των λίθινων κατασκευών”, ΤΕΕ/ΤΔΚ 2003
- [17] Χούσος Ιούλιος, Τσέλιος Γεώργιος - “Τεκμηρίωση και μελέτη της γέφυρας Κοράκου, καθώς και διατύπωση προτάσεων για την αναστήλωσή της”, Μεταπτυχιακή Εργασία ΔΠΜΣ “Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών”, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2018
- [18] Ψυχάρης Ν. Γιάννης, “Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας Τεύχη 1 & 2”, Αθήνα 2016
- [19] Dimitris Galanakis, Panagiotis Paschos, Theodora Rondoyanni, Charalambos Georgiou, “Neotectonic Activity of Konitsa Area and the 1996 Earthquakes”, Athens 2007
- [20] EN 1998-1 (Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός, Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια), CEN (European Committee for Standardisation), 2004
- [21] EN 1998-1 - Παράρτημα Προσωρινών Συστάσεων, ΕΛΟΤ, 2008
- [22] Karnik V, “Seismicity of the European area”, Holland, 1971
- [23] María del Carmen Gómez-Colladoa, Vicenta Calvo Rosellób, Esther Capilla Tamborero, “Mathematical modeling of oval arches. A study of the George V and Neuilly Bridges”, Elsevier Masson SAS, 2018
- [24] Papazachos, B. C, Comninakis, P.E., Hatzidimitriou, P. M., Kiriakidis, E. G., Kiratzi, A. A., Panagiotopoulos, D. G., Papadimitriou, E. E., Papaioannou, Ch. A., Pavlidis, S. P. and Tzanis, E. P., “Atlas of isoseismal of earthquakes in Greece 1902–1981”, Thessaloniki, 1982
- [25] Papazachos Basil C., Papaioannou Christos , Papazachos Konstantinos, Savvaidis Alexandros, “Atlas of isoseismal maps for strong shallow earthquakes in Greece and surrounding area (426BC - 1995)”, Ziti Publications, Thessaloniki 1997
- [26] Rouqueville F.-C.-H.-L., “Ταξίδι στην Ελλάδα” - ΤΑ ΗΠΕΙΡΩΤΙΚΑ, Τόμος Ι, εκδόσεις Ε.Η.Μ., Ιωάννινα 1994
- [27] Santiago Huerta, “Arch bridge design in eighteenth-century France: The rule of Perronet”, University Politicnica de Madrid, Madrid, Spain
- [28] Abaqus documentation, <https://abaqus-docs.mit.edu>
- [29] <http://petrinagefiria.com>
- [30] <https://izagori.gr>
- [31] <https://el.wikipedia.org>