



5 & 6 ΜΑΡΤΙΟΥ 2020

3^ο Επιστημονικό Forum για τη Μείωση της
ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΑΠΟ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ
στην Ελλάδα

3rd Scientific Forum for
DISASTER RISK REDUCTION
in Greece



Έρευνα για την Ορθολογική Εκτίμηση Σεισμικών Φορτίων Μνημείων Πολιτιστικής Κληρονομιάς

*Σαλονικιός Ν. Θωμάς, Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής, ΙΤΣΑΚ – ΟΑΣΠ
Επιστημονικός Συντονιστής*

Θεοδουλίδης Νίκος, Δρ Σεισμολόγος, Διευθυντής Ερευνών, ΙΤΣΑΚ – ΟΑΣΠ

1. Introduction
2. Theory of the problem
3. Proposals
4. Case studies
 - 4.1 Matsoloulos Watermill, Trikala, Greece
 - 4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece
 - 4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece
5. Conclusions

1. Introduction

2. Theory of the problem

3. Proposals

4. Case studies

4.1 Matsoulouos Watermill, Trikala, Greece

4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece

4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece

5. Conclusions

1. Εισαγωγή

Το φέρων σύστημα των μνημείων είναι το αποτέλεσμα:

- α) Της τεχνολογικής γνώσης κατά την περίοδο κατασκευής του,
- β) Των μεταγενέστερων επεμβάσεων κατά την διάρκεια των αιώνων,
- γ) Των σύγχρονων επεμβάσεων.

Σύμφωνα με τις διεθνείς πρακτικές, πριν και μετά τις επεμβάσεις στα μνημεία, ενδείκνυται η μέτρηση και ο υπολογισμός των ιδιομορφών του φέροντος συστήματος, μέσω της μετεπεξεργασίας της μετρηθείσας απόκρισής τους σε περιβαλλοντικές διεγέρσεις.

Αυτά τα χαρακτηριστικά αναπαριστούν τις ιδιομορφικές μεταβλητές του μνημείου κατά την περίοδο ενοργάνωσης και μέτρησης. Αποτελούν τιμές αναφοράς για σύγκριση με τις μελλοντικές ιδιότητες μετά την ολοκλήρωση των επεμβάσεων στον φέροντα οργανισμό.

1. Introduction
2. Theory of the problem
3. Proposals
4. Case studies
 - 4.1 Matsoloulos Watermill, Trikala, Greece
 - 4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece
 - 4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece
5. Conclusions

1. Introduction

2. Theory of the problem

3. Proposals

4. Case studies

4.1 Matsouloulos Watermill, Trikala, Greece

4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece

4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece

5. Conclusions

2. Η βασική θεωρία του προβλήματος

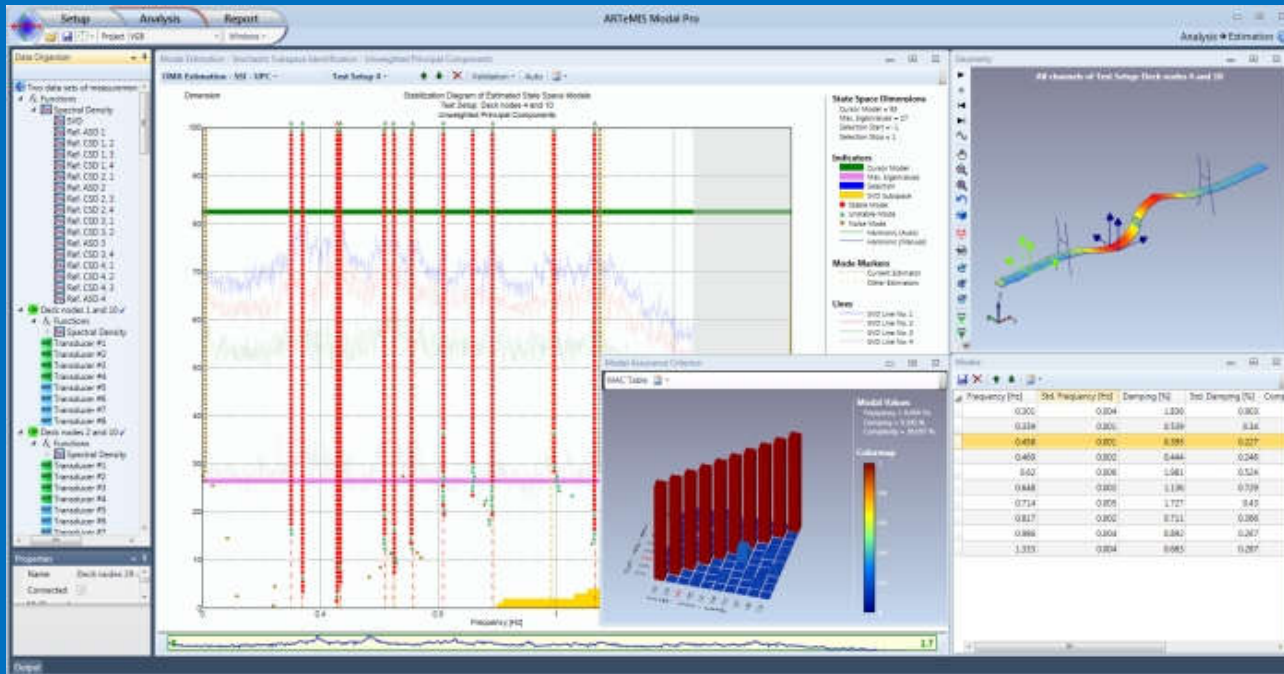
Οι μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για την δομική αποτίμηση των μνημείων, προέκυψαν από τον σχεδιασμό σύγχρονων πολυορόφων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα και/ή από δομικό χάλυβα.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των μνημείων από φέρουσα τοιχοποιία και των σύγχρονων κτιρίων είναι η κατανομή της μάζας στους τοίχους.

Τα προηγμένα λογισμικά παρέχουν λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα μέσω της ακριβούς θεώρησης της κατανομής της μάζας στα φέροντα στοιχεία. Η μάζα η οποία ενεργοποιείται από τις κύριες ιδιομορφές είναι το 60 με 70% της συνολικής μάζας. Καθώς η υπόλοιπη μάζα ενεργοποιείται στις ανώτερες ιδιομορφές, θεωρείται ότι η ακριβής κατανομή της μάζας λαμβάνεται υπόψη με την θεώρηση κατάλληλου αριθμού ιδιομορφών μέχρι την ενεργοποίηση του 90% της συνολικής μάζας.

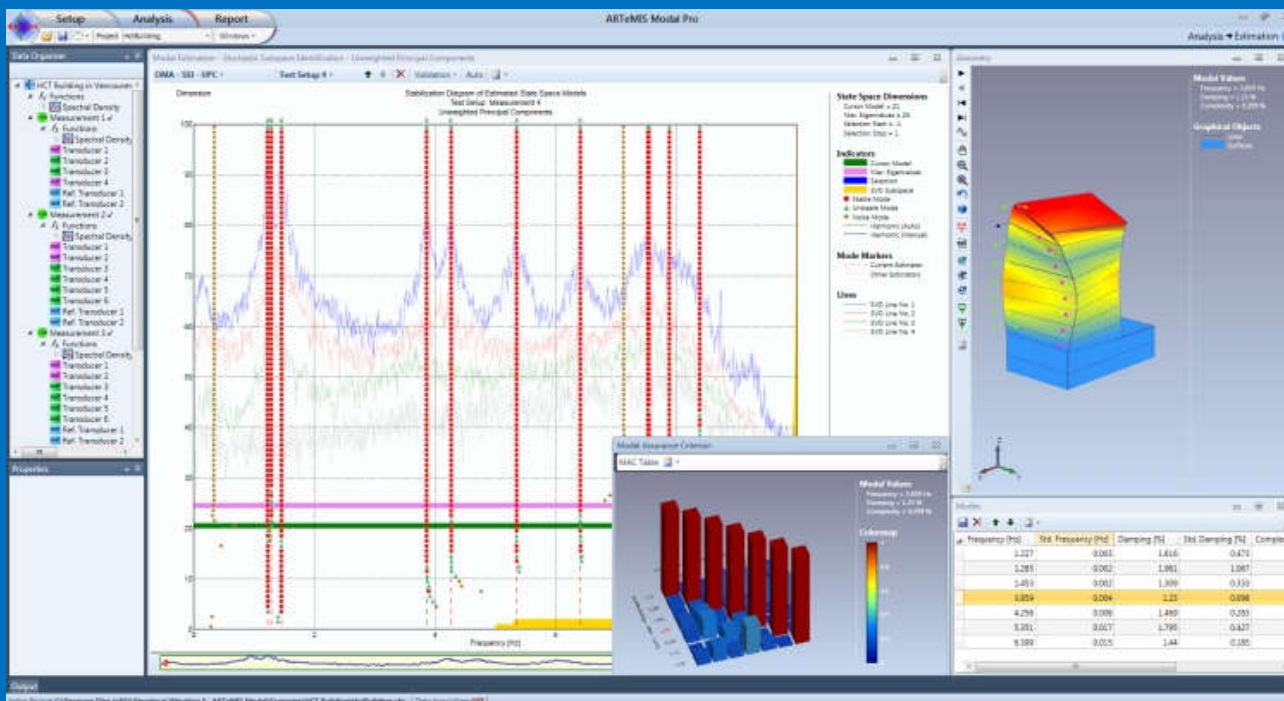
Η ροπή αδράνειας του φέροντος συστήματος λαμβάνεται επίσης υπόψη μέσω της ακριβούς προσομοίωσης της γεωμετρίας των διατομών και γενικών διαστάσεων των φερόντων στοιχείων.

ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ: Το μέτρο ελαστικότητας των λιθοδομών είναι η κύρια παράμετρος η οποία πρέπει να προσδιοριστεί.



The general problem for the estimation of eigenvalues and eigenmodes is solved by advanced software.

The cost of carriage and installation of the accelerometric network and cables is usually high. Also, the calculation cost is a high time-consuming process.

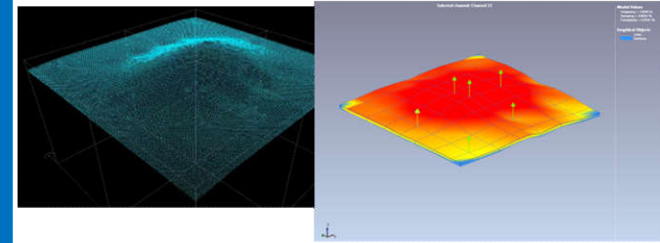


The advanced software do not include special subroutines for monuments.



NIARCHOS CANOPY, Athens, Greece, 2016

NIARCHOS CANOPY –
VERTICAL EIGENMODES



Analysis | Estimation, SSI – UPC

Frequency [Hz]	Std. Frequency [Hz]	Damping [%]	Std. Damping [%]	Complexity [%]
2.858	0.0169	4.6032	0.2378	0.9541

<u>Eigenfrequency</u>	Direction	FE model	FFT	Artemis	Artemis		
Number	Axis	Eig/cies Hz	Eig/cies Hz	Eig/cies Hz	Damping	4th	
1 st	Along Y'Y	1.192	1.128	1.126	0.3-0.8%		
2 nd	Along X'X	1.269	1.160	1.167	0.6-1.1%		
3 rd	Around Z'Z	1.739	1.623	1.631	0.3-1.1%		5 th 6 th
4 th	Along Z'Z	2.646	2.459	2.858 2.592	4.6%		
5 th 6 th	Along Z'Z	3.597, 3.636	3.646	3.633 3.628	1.6 – 3.1%		
7 th	Along Z'Z	4.926	4.821	5.911	1.0 - 1.7%		8 th
8 th	Along Z'Z	6.329	6.000	8.326	3.2%-4.1%		

1. Introduction
2. Theory of the problem
3. Proposals
4. Case studies
 - 4.1 Matsoloulos Watermill, Trikala, Greece
 - 4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece
 - 4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece
5. Conclusions

1. Introduction

2. Theory of the problem

3. Proposals

4. Case studies

4.1 Matsoulouos Watermill, Trikala, Greece

4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece

4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece

5. Conclusions

3. Προτάσεις

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία το μέτρο ελαστικότητας των τοιχοποιιών στα μνημεία ποικίλει μεταξύ $(500 \div 1000) \cdot f_w$ (f_w : η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας). Επιπροσθέτως η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας σχετίζεται με την θλιπτική αντοχή των λίθων ή πλίνθων και με την θλιπτική αντοχή του κονιάματος δόμησης και εμπεριέχει σημαντικές αβεβαιότητες. Για τον λόγο χρησιμοποιείται συντελεστής ασφάλειας “2.7” για τον καθορισμό της αντοχής σχεδιασμού της τοιχοποιίας από την μέση αντοχή.

Η εγκατάσταση τοπικών δικτύων επιταχυνσιομέτρων συνεισφέρει στον υπολογισμό των κυρίων ιδιοσυχνοτήτων ω_i . Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η καταγεγραμμένη απόκριση του μνημείου σε περιβαλλοντικές διεγέρσεις.

Από τις ιδιοσυχνότητες προκύπτει η αντίστοιχη δυσκαμψία σύμφωνα με την παρακάτω απλοποιημένη εξίσωση:

$$\omega_i = [(k/m)\lambda_i]^{1/2}, \quad k = f(EI)$$

a) Η ροπής αδράνειας (I), ως γεωμετρικό μέγεθος προσομοιώνεται με ακρίβειας για περιβαλλοντικές διεγέρσεις, b) Για μικρές διεγέρσεις, όπως είναι οι περιβαλλοντικές, η συνδεσμολογία μεταξύ των δομικών μελών προσομοιώνεται επίσης ακριβώς) Το μέτρο ελαστικότητας των δομικών στοιχείων είναι μία παράμετρος προς καθορισμό, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας. Για τον καθορισμό του “ $E_{w,equiv}$ ”, απαιτείται μία διαδικασία βαθμονόμησης μέχρι την σύμπτωση αναλυτικών και μετρούμενων μεγεθών.

1. Introduction
2. Theory of the problem
3. Proposals
4. Case studies
 - 4.1 Matsoloulos Watermill, Trikala, Greece
 - 4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece
 - 4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece
5. Conclusions

1. Introduction

2. Theory of the problem

3. Proposals

4. Case studies

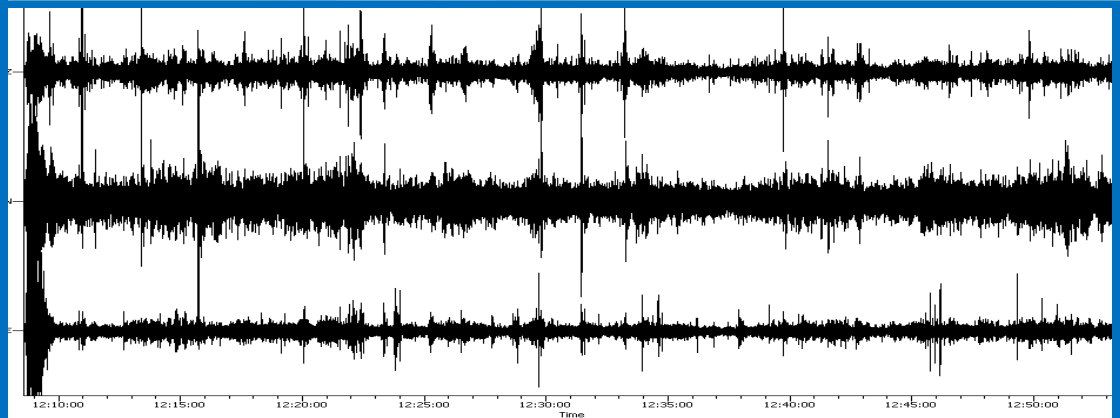
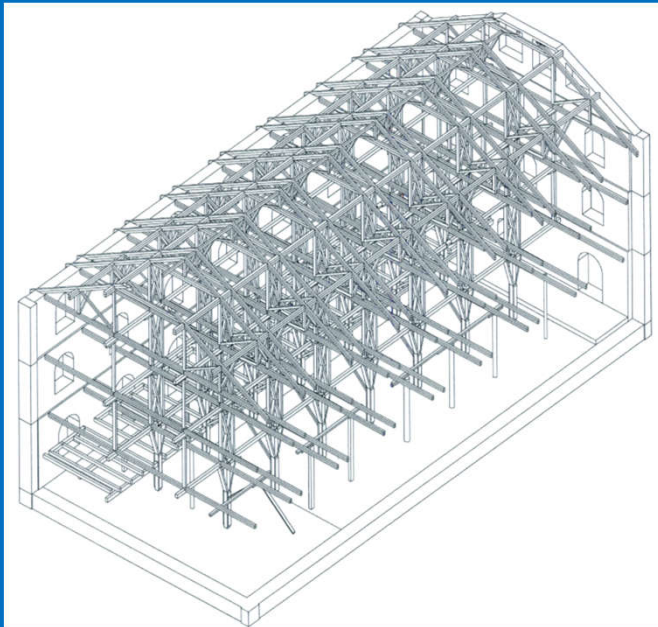
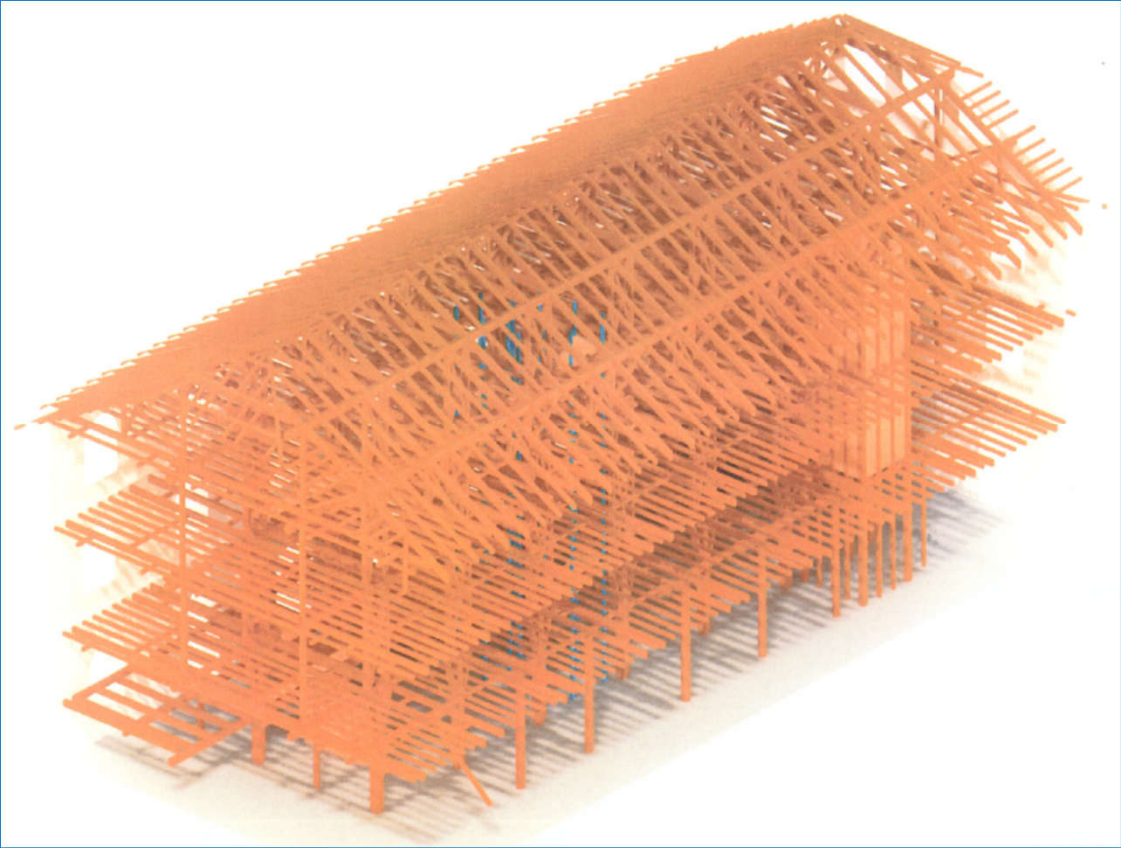
4.1 Matsoloulos Watermill, Trikala, Greece

4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece

4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece

5. Conclusions

4.1 Matsopoulos Watermill



Before Interventions

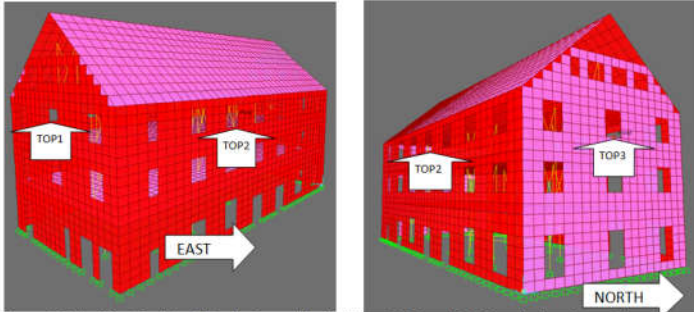


Figure 6. Left: West (Back) and South views of the building. TOP1 and TOP2 are the locations of the sensors. Right: East (Front) and South views of the building. Locations of instruments (TOP).

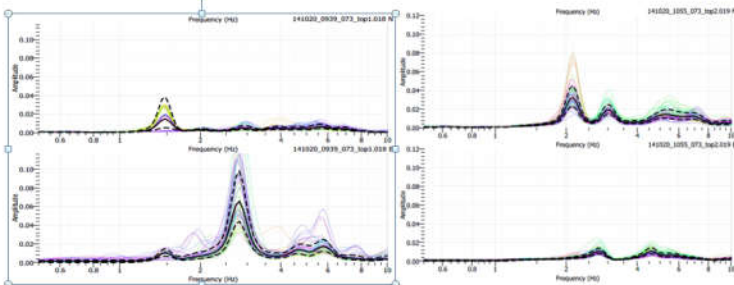
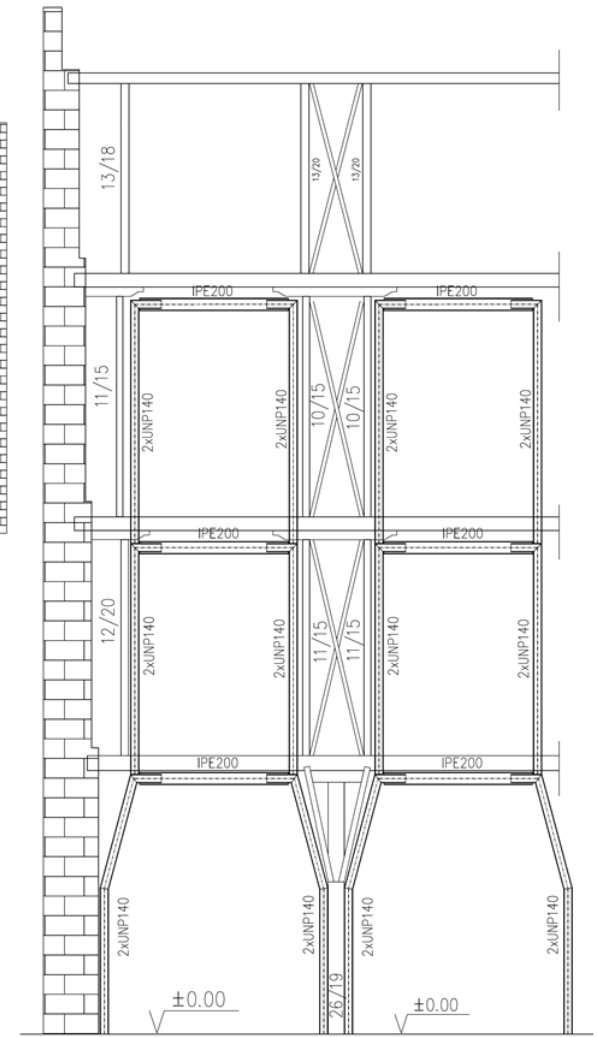
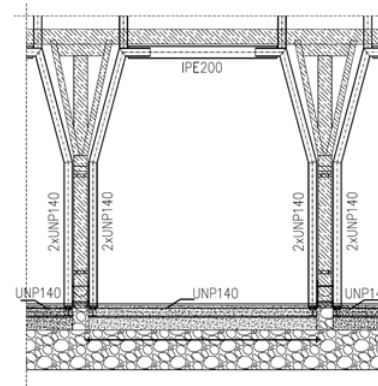
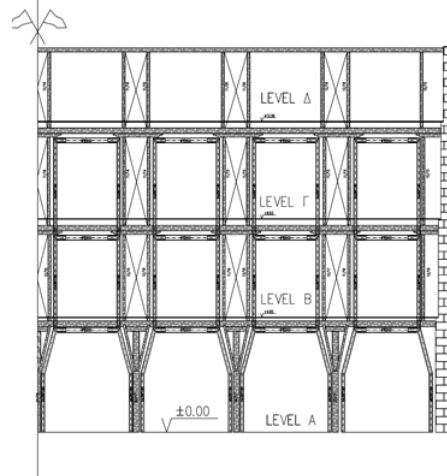


Figure 7. Left: Top1 FAS (N(X'X), E(Y'Y) components). Right: Top2 FAS (N(X'X), E(Y'Y) components)



After Interventions

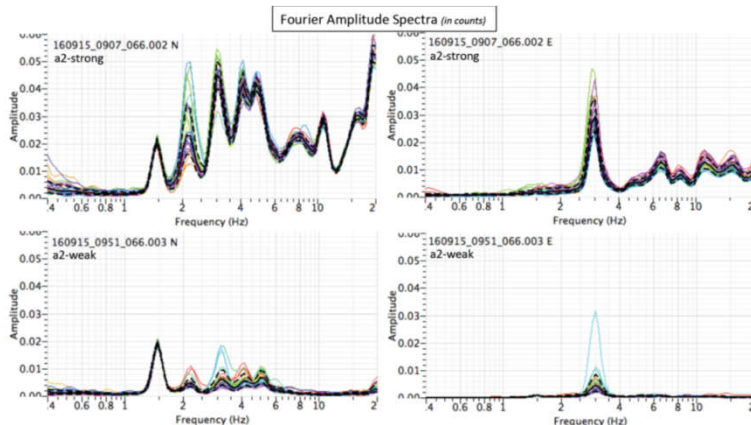


Figure 12. Fourier Amplitude Spectra for record at location CH9 "North" and inverted CH10 "East". Top diagrams represent the situation with mechanical equipment at operation and bottom diagram with equipment off.

Documentation of strength increase without modification of the horizontal stiffness.

1. Introduction

2. Theory of the problem

3. Proposals

4. Case studies

4.1 Matsoulouos Watermill, Trikala, Greece

4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece

4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece

5. Conclusions

4.2 Acheiropoietos Basilica



Fig. 1 South-east view (left) and inside view (right) of the basilica

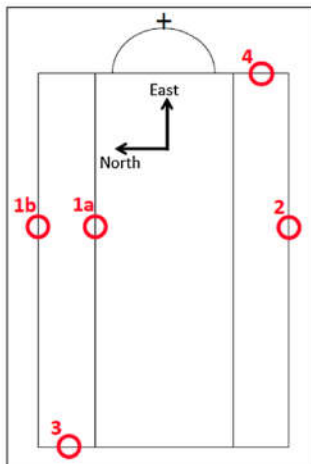


Fig. 10 Plan view of the Acheiropoietos basilica with the selected ambient vibrations measurement points that are located on the upper floor

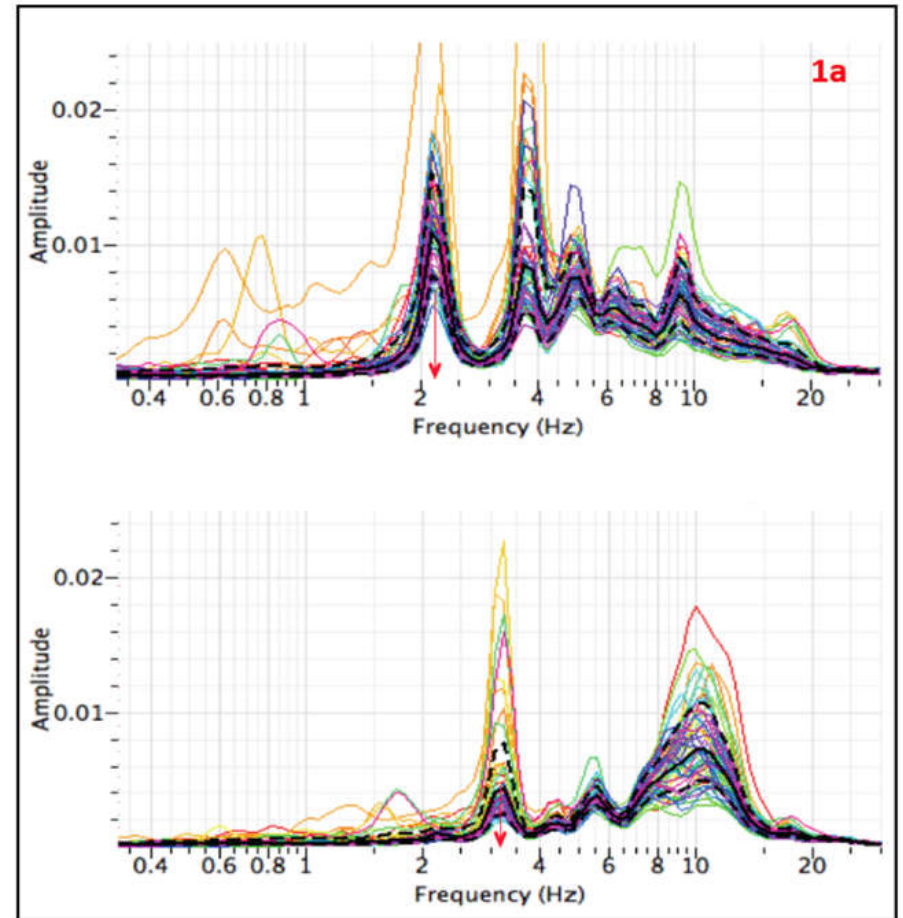


Fig. 11 Fourier amplitude spectra for each time window of 30 s (colored lines), geometric average (solid black line) and ± 1 standard deviation (dashed lines) for the point 1a; north-south (upper) and east-west (down) component. The arrow indicates the fundamental frequency

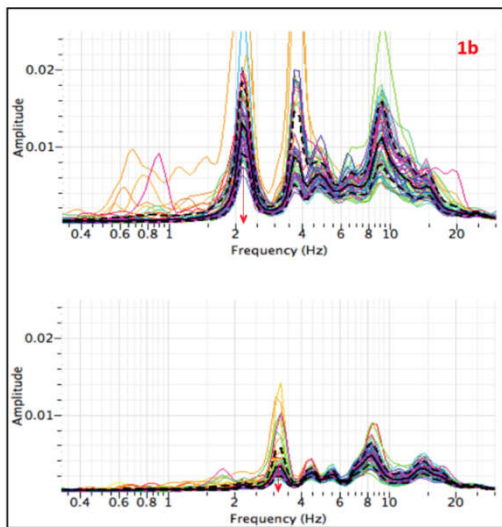


Fig. 12 Fourier amplitude spectra for each time window of 30 s (colored lines), geometric average (solid black line) and ± 1 standard deviation (dashed lines) for the point 1b; north-south (upper) and east-west (down) component. The arrow indicates the fundamental frequency

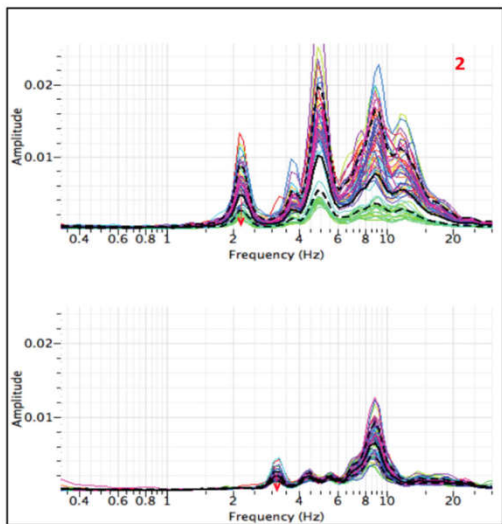


Fig. 13 Fourier amplitude spectra for each time window of 30 s (colored lines), geometric average (solid black line) and ± 1 standard deviation (dashed lines) for the point 2; north-south (upper) and east-west (down) component. The arrow indicates the fundamental frequency

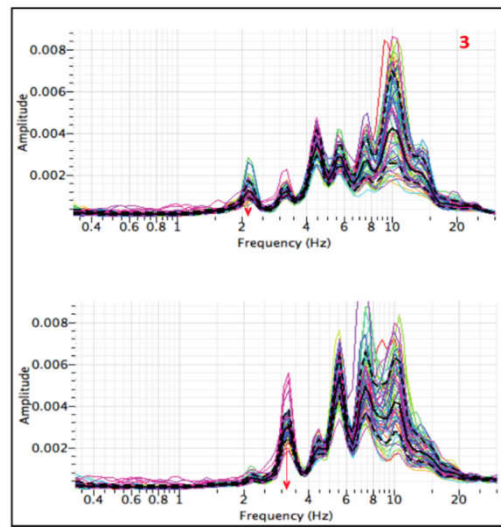


Fig. 14 Fourier amplitude spectra for each time window of 30 s (colored lines), geometric average (solid black line) and ± 1 standard deviation (dashed lines) for the point 3; north-south (upper) and east-west (down) component. The arrow indicates the fundamental frequency

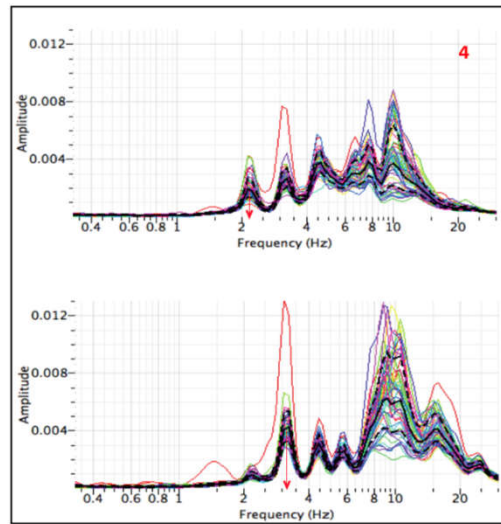
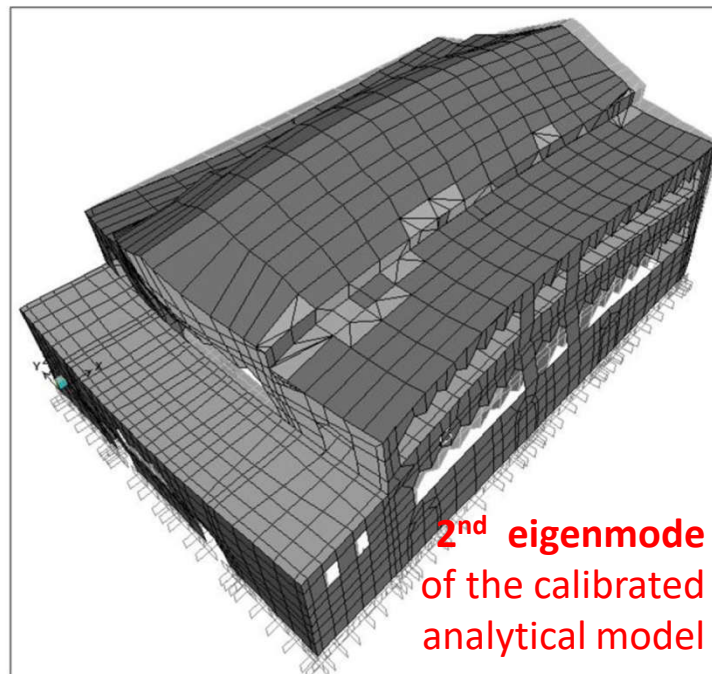
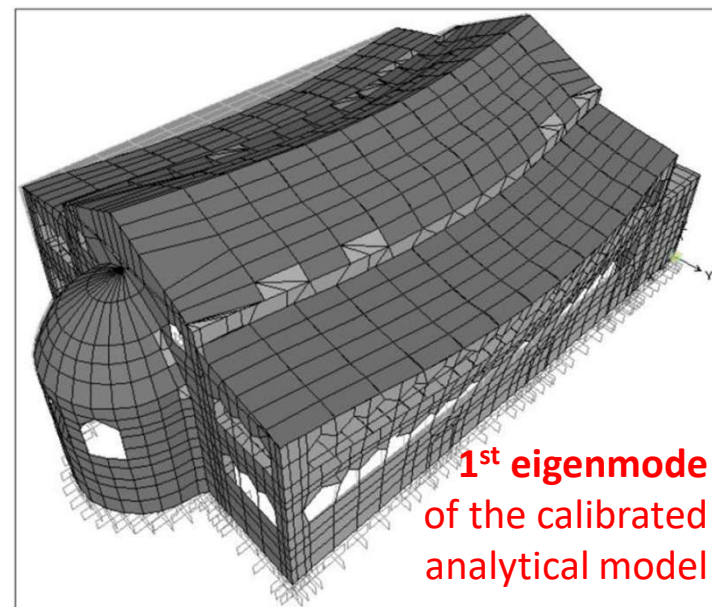


Fig. 15 Fourier amplitude spectra for each time window of 30 s (colored lines), geometric average (solid black line) and ± 1 standard deviation (dashed lines) for the point 4; north-south (upper) and east-west (down) component. The arrow indicates the fundamental frequency

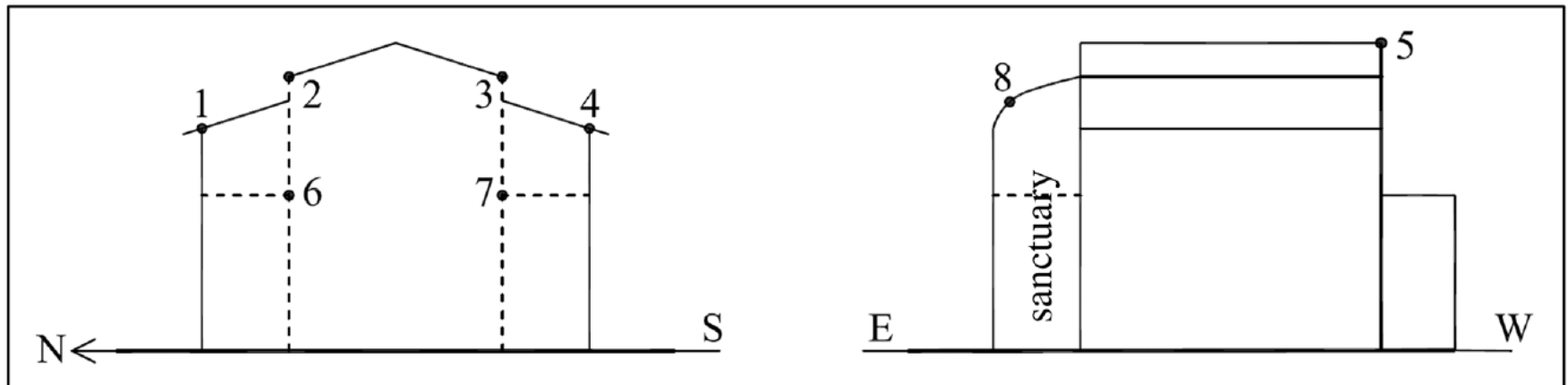
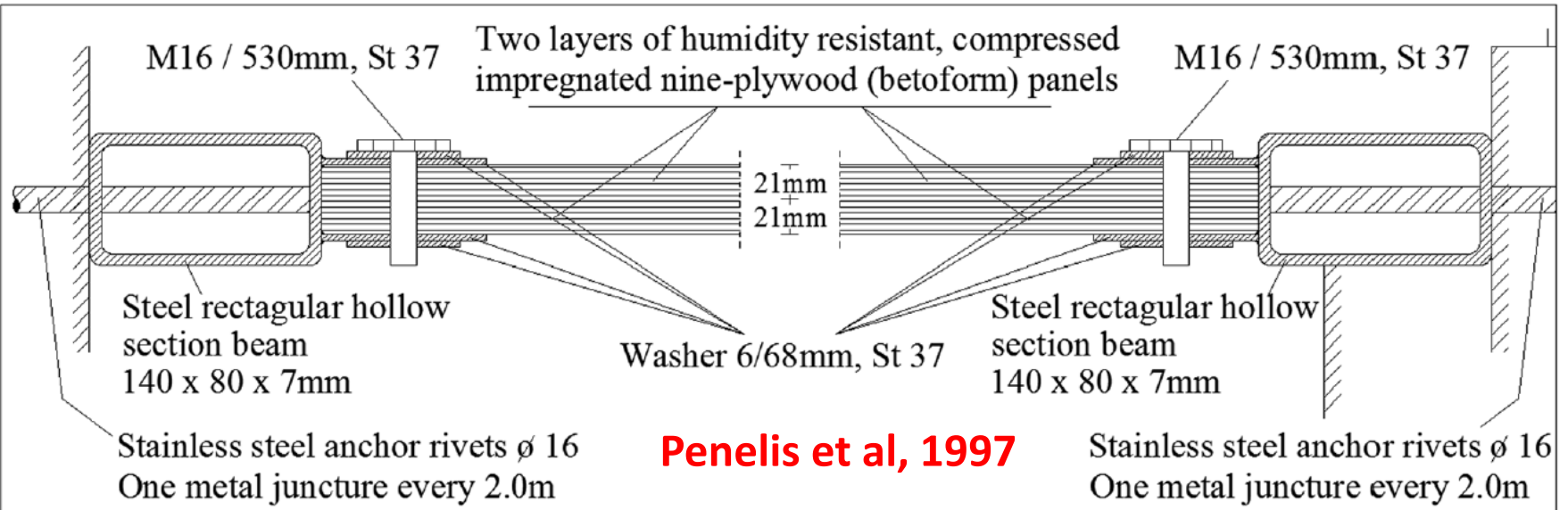


1980/before - 2017/after

Table 2 Measured and calculated basilica's eigenfrequencies in the 1980 and 2017 structural phases

Eigenfrequencies of the basilica at the two considered structural phases

Data source	Measured in 1980 (Hz)	Model of initial basilica (Hz)	Measured in 2017 (Hz)	Model of strengthened basilica (Hz)	Direction
1st eigenfrequency	1.60	1.59	2.15	2.07	North–south
2nd eigenfrequency	2.40	2.50	3.15	3.18	East–west
3rd eigenfrequency	3.40	2.70	3.30	3.40	North–south
4th eigenfrequency	3.30	3.33	4.70	4.70	North–south
5th eigenfrequency	4.20	4.17	5.50	5.40	East–west



1. Introduction

2. Theory of the problem

3. Proposals

4. Case studies

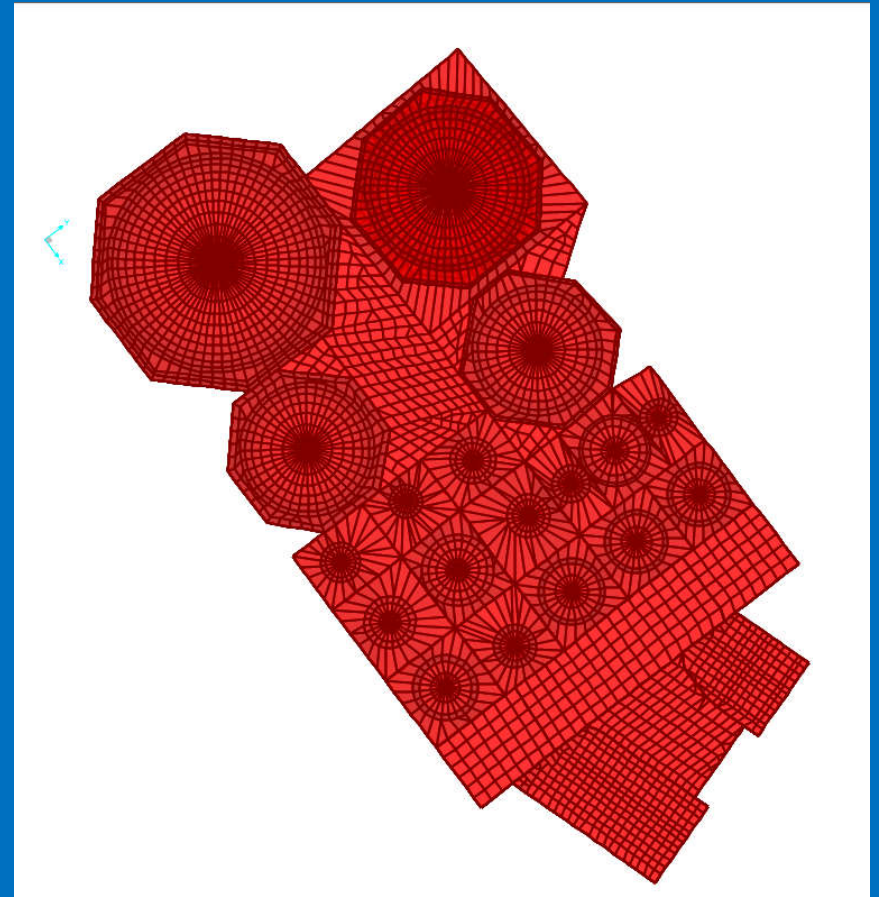
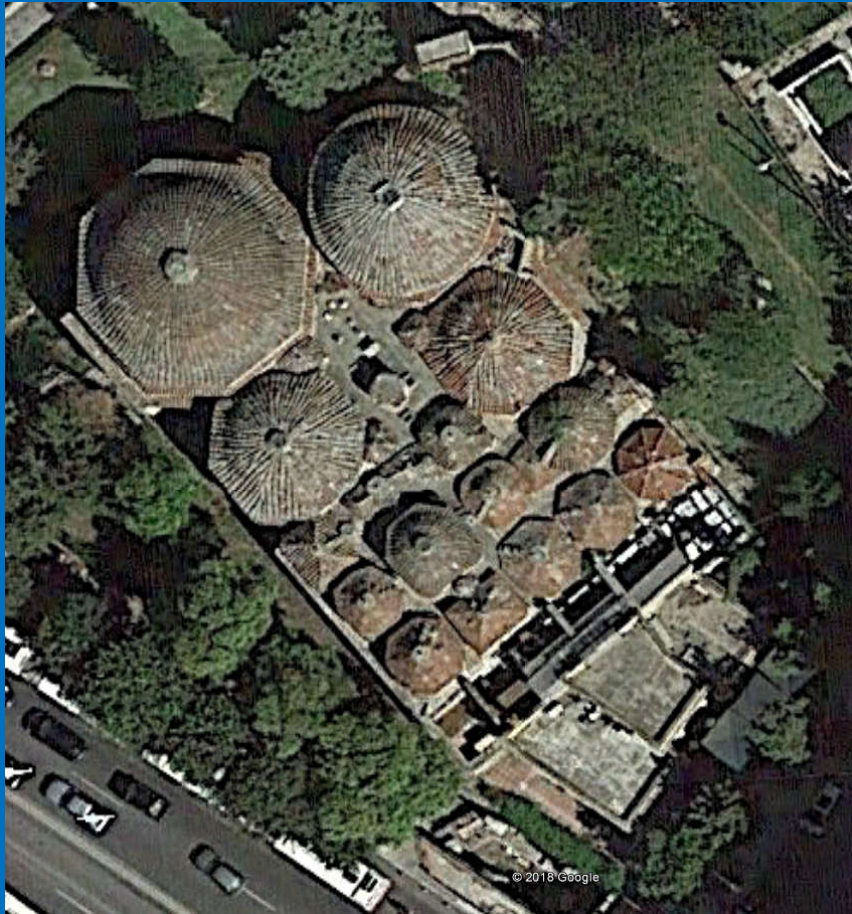
4.1 Matsoulouos Watermill, Trikala, Greece

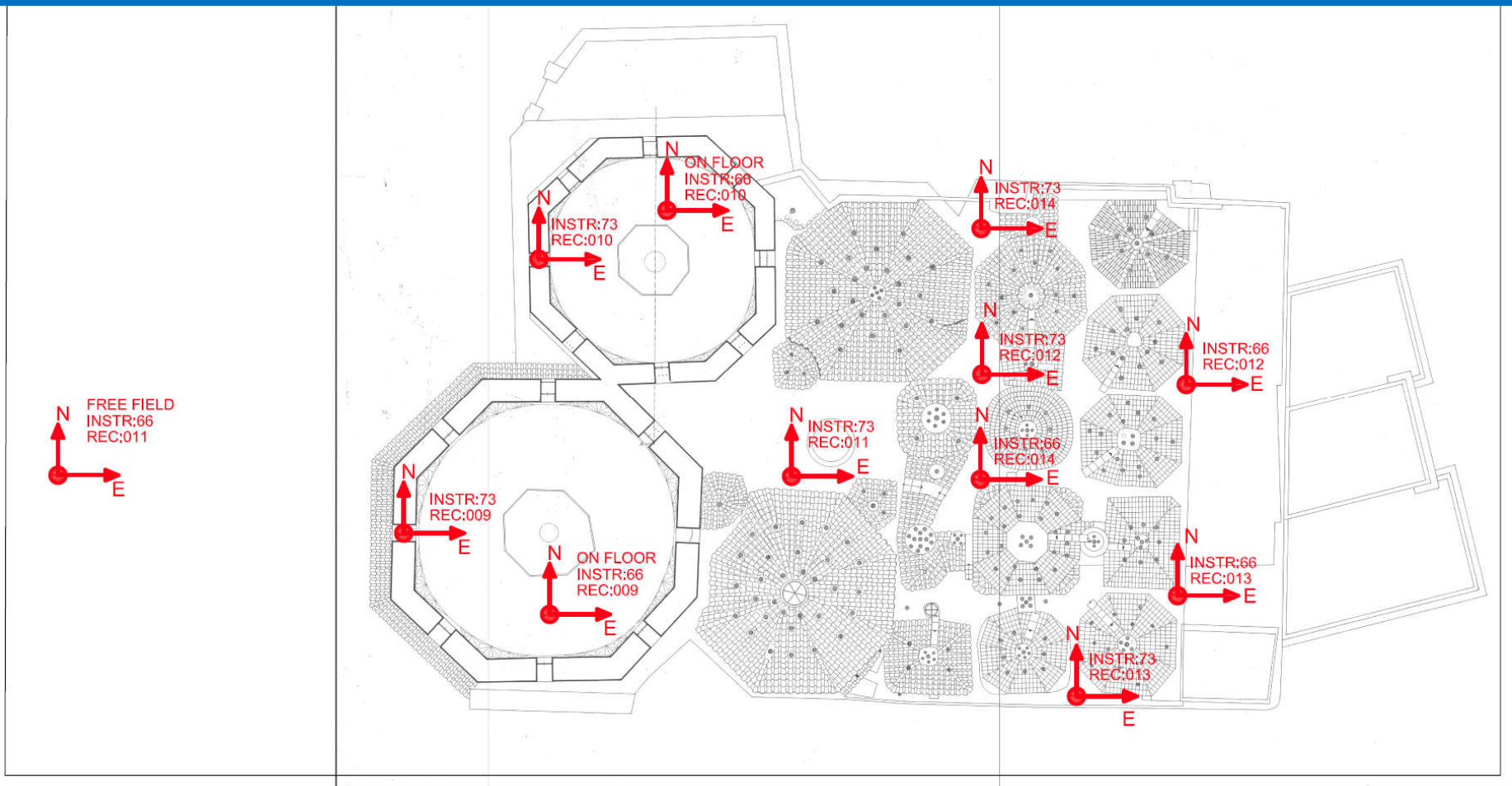
4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece

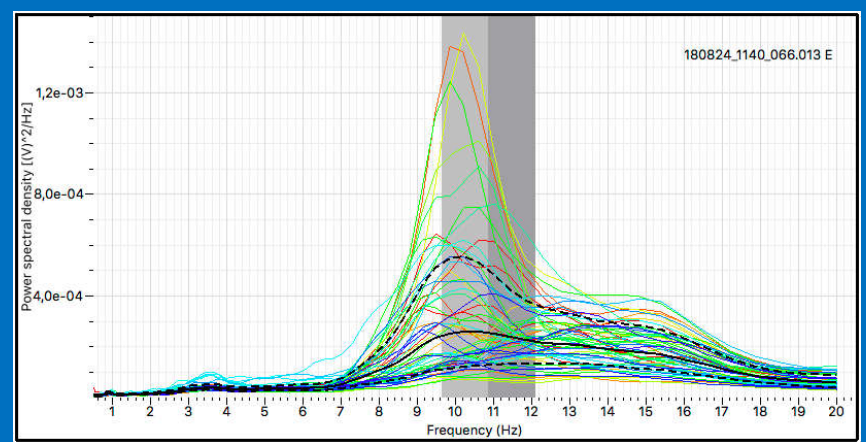
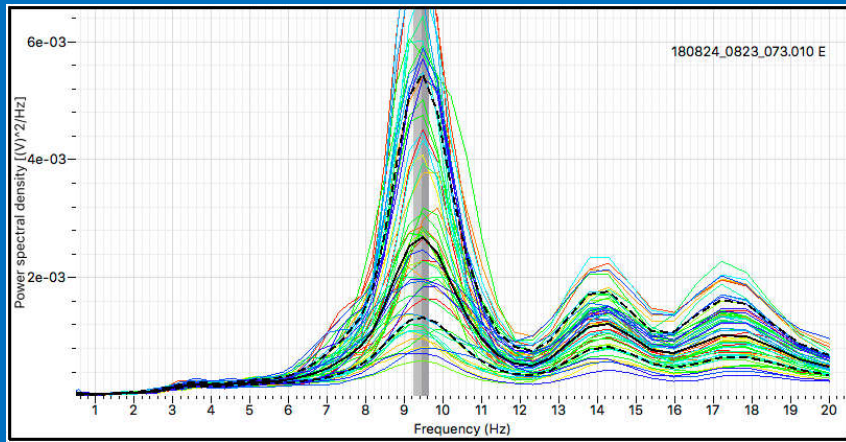
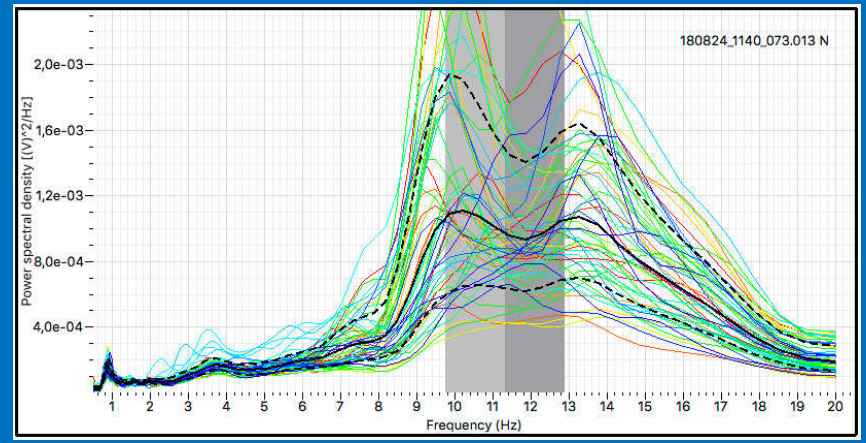
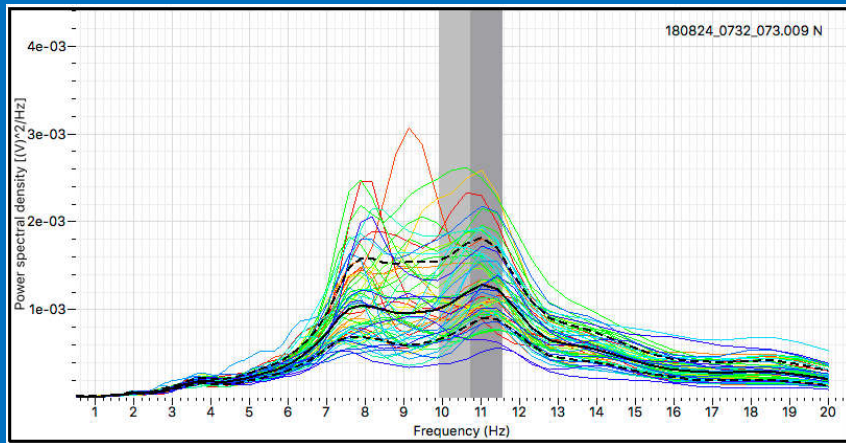
4.3 **Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece**

5. Conclusions

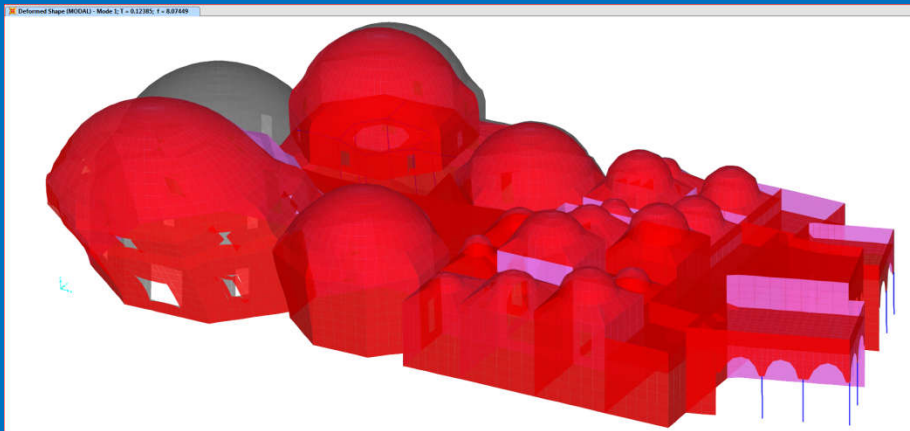
4.3 Bey Hamam an Ottoman Bath (1444)





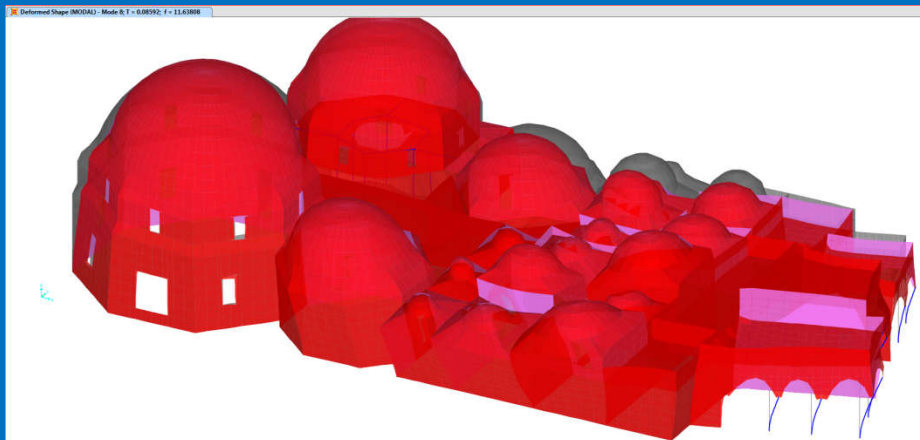
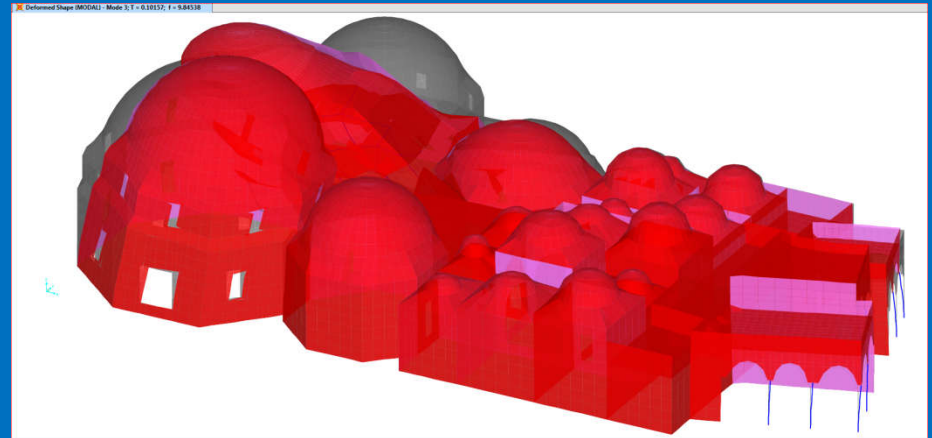


Power spectral density diagrams

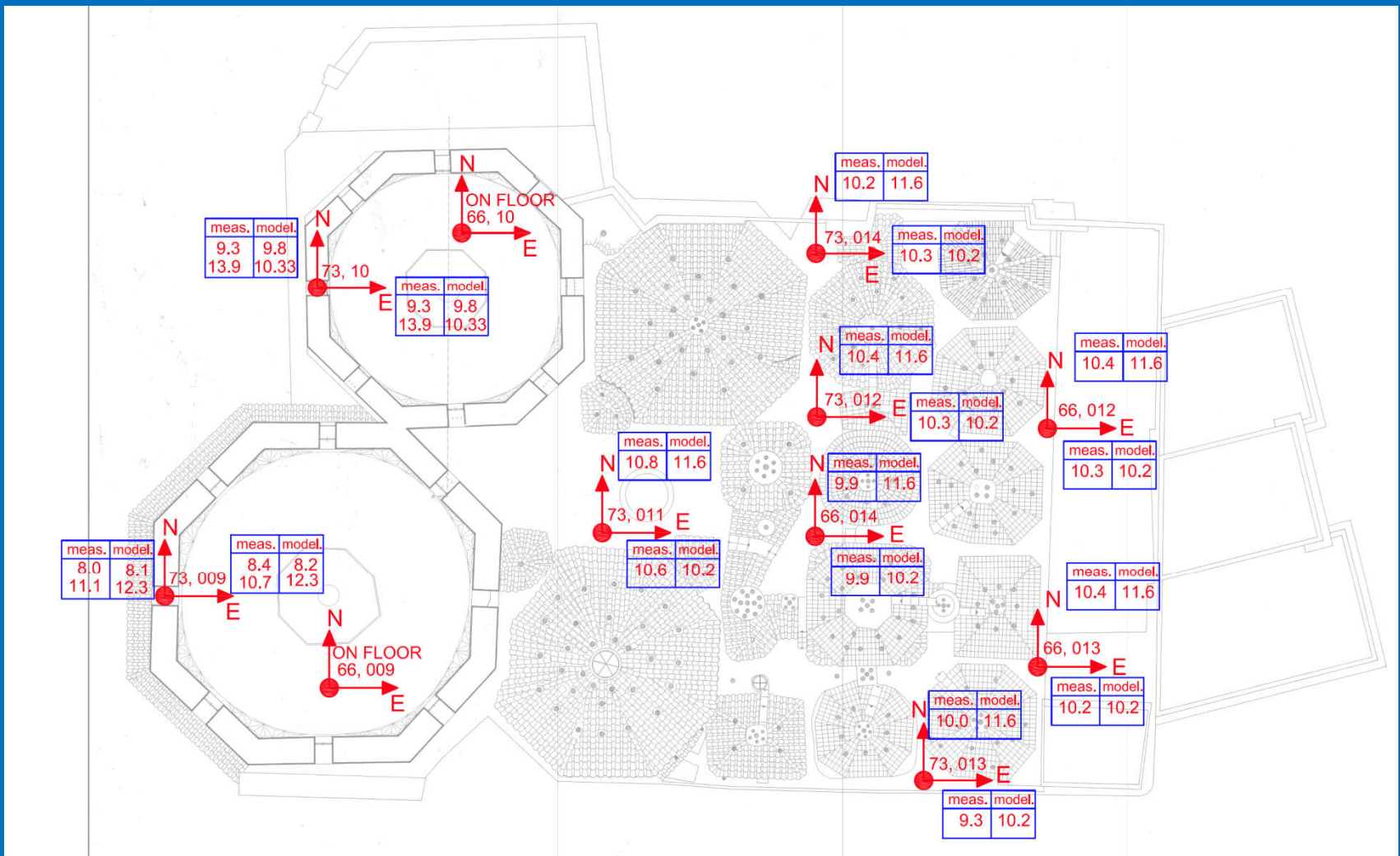


1st Main Eigenmode

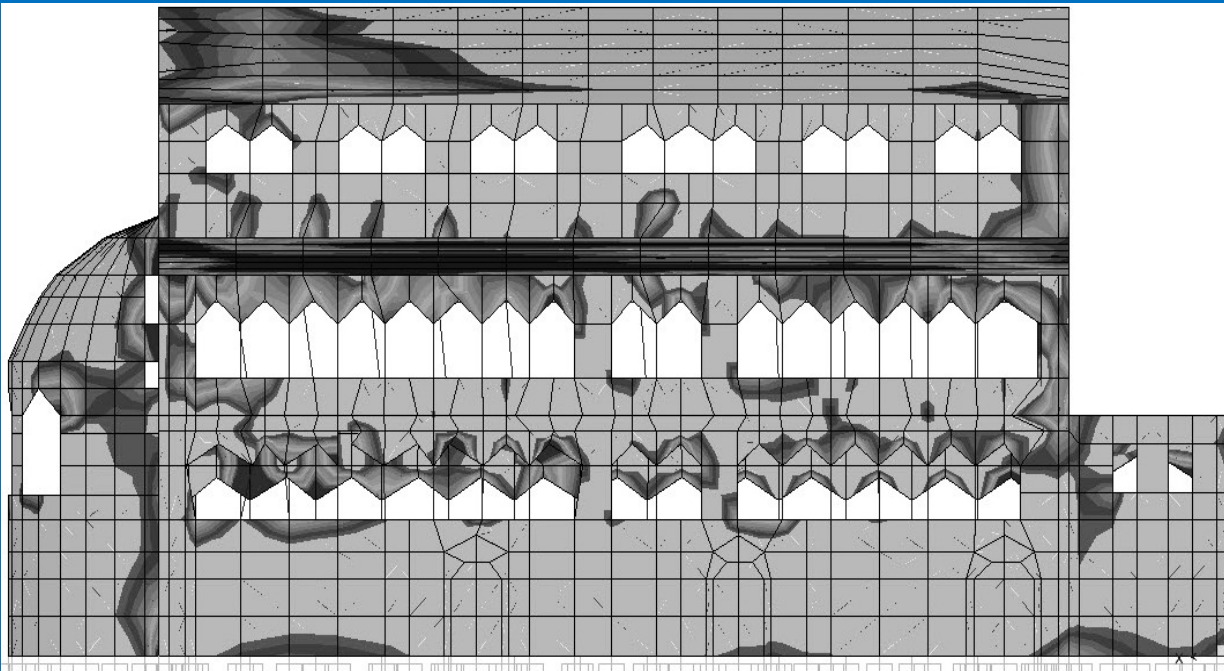
2nd Main Eigenmode



3rd Main Eigenmode

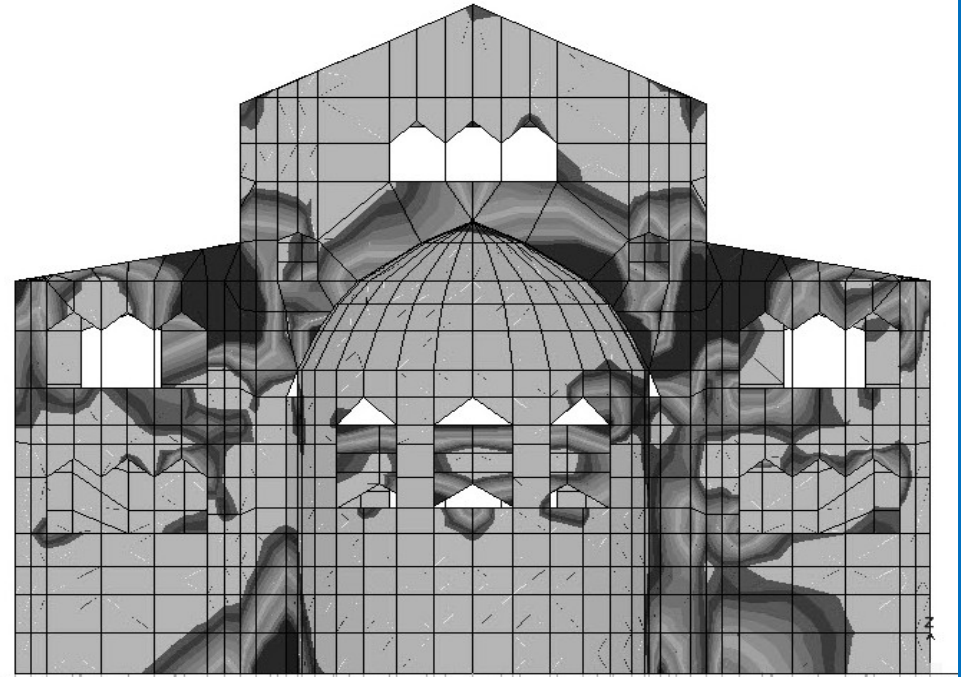


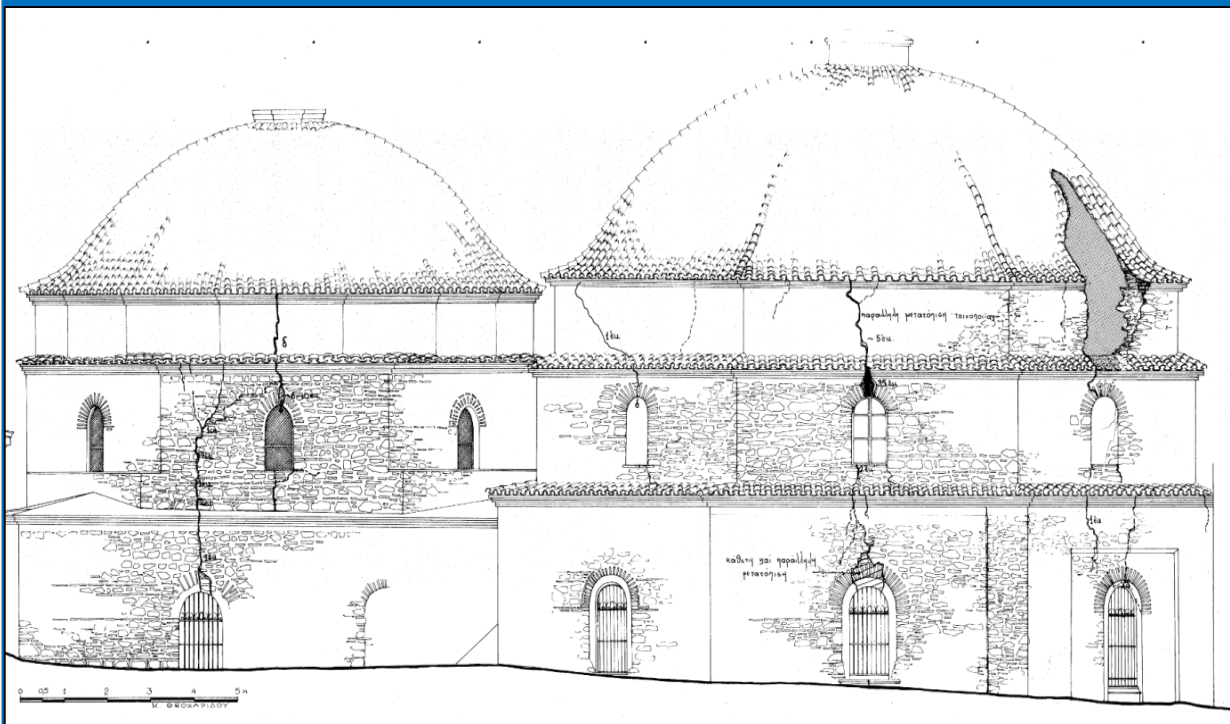
direction	measur./calcul.	measur./calcul.	measur./calcul.
X-X	8.4/8.2	9.3/9.8	10.3/10.2
Y-Y	8.0/8.1	9.3/9.8	10.6/11.6



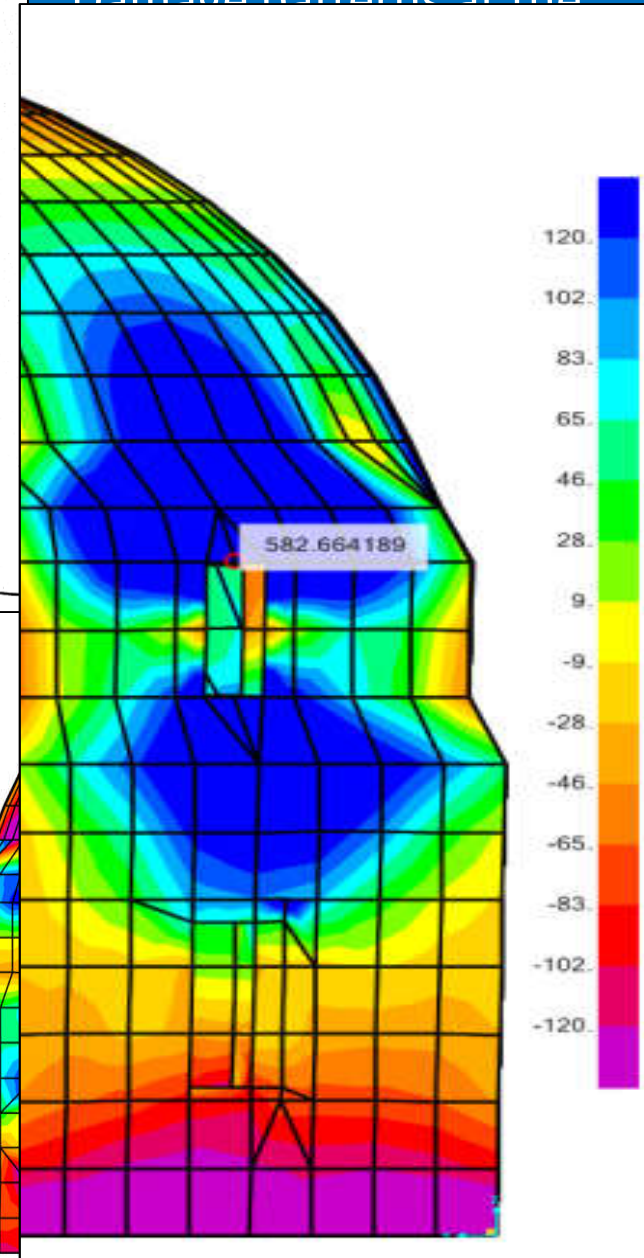
Damage distribution (dark areas)
for the flexible structural system of
Acheiropietos Basilica.

***Distributed
damages***



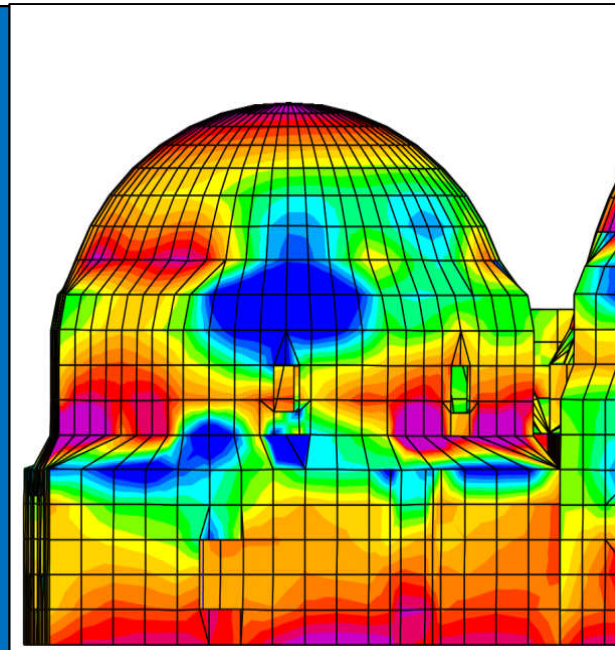


Damage patterns at the



Horizontal stresses S_{11} , as resulted from the combination of the time history analysis at time step 8.475sec and vertical loads.

Concentrated damages



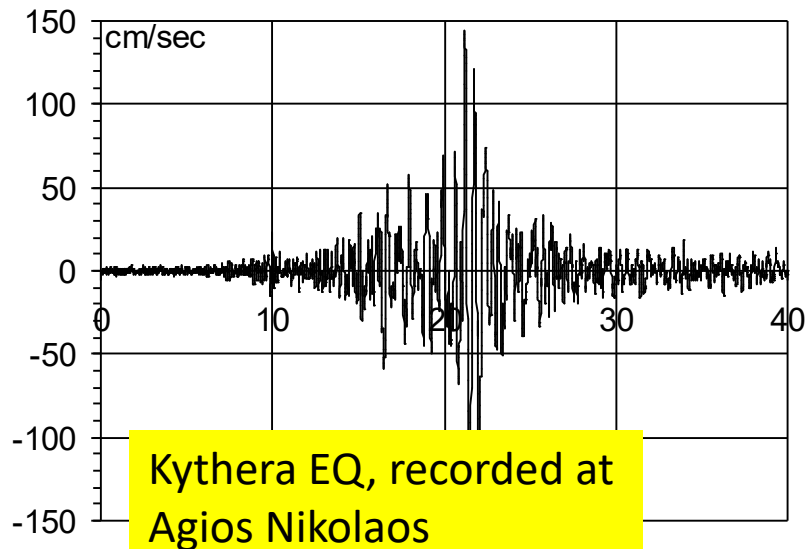
1. Introduction
2. Theory of the problem
3. Proposals
4. Case studies
 - 4.1 Matsoloulos Watermill, Trikala, Greece
 - 4.2 Acheiropoietos Basilica, Thessaloniki, Greece
 - 4.3 Bey Hamam Ottoman Bath, Thessaloniki, Greece

5. Conclusions

- ✓ Η συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης μνημείων σε περιβαλλοντικές διεγέρσεις πριν και μετά τις επεμβάσεις είναι σημαντική για την διερεύνηση :
 - Της κατανομής των βλαβών σε ισχυρούς σεισμούς
 - Της αποτελεσματικότητας του έργου των επεμβάσεων

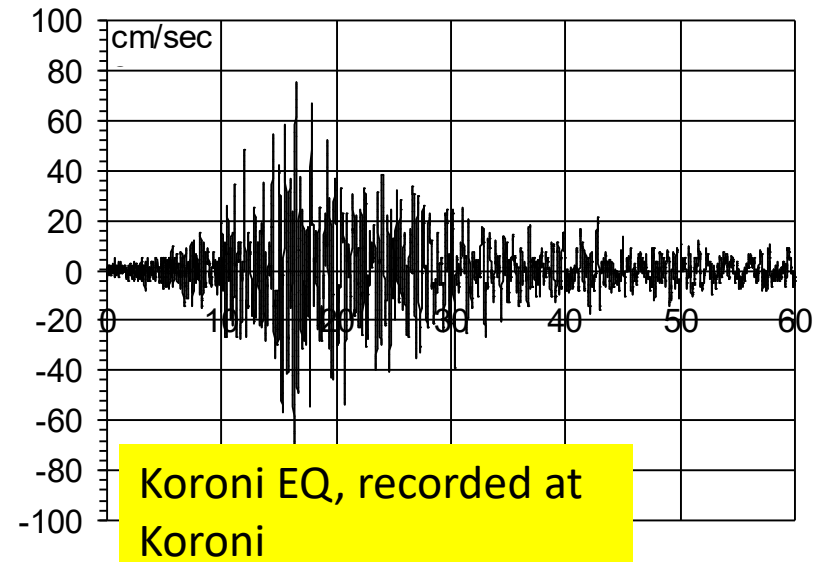
- ✓ Η μεθοδολογία αυτή υποστηρίζει:
 - Την δομική παρακολούθηση των μνημείων
 - Την λήψη αποφάσεων για επεμβάσεις σε μνημεία

ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΥΘΗΡΩΝ, ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ "L"



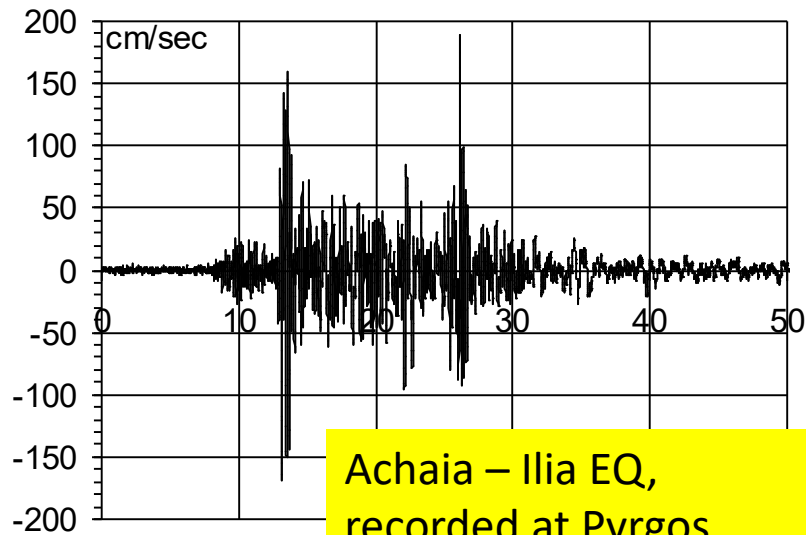
Kythera EQ, recorded at Agios Nikolaos

ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΟΡΩΝΗΣ, ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΟΡΩΝΗ "L"



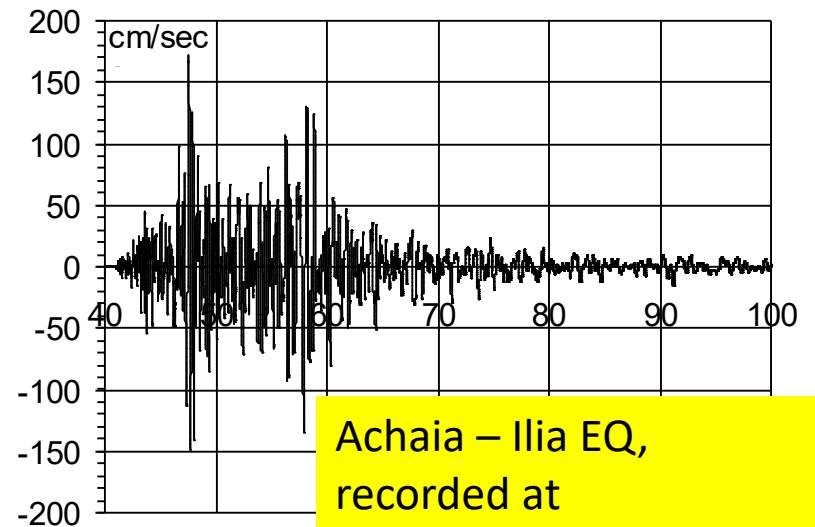
Koroni EQ, recorded at Koroni

ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΧΑΪΑΣ - ΗΛΕΙΑΣ, ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΥΡΓΟΣ "T"



Achaia – Iliia EQ, recorded at Pyrgos

ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΧΑΪΑΣ - ΗΛΕΙΑΣ, ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΒΑΡΘ. "T"



Achaia – Iliia EQ, recorded at Vartholomio

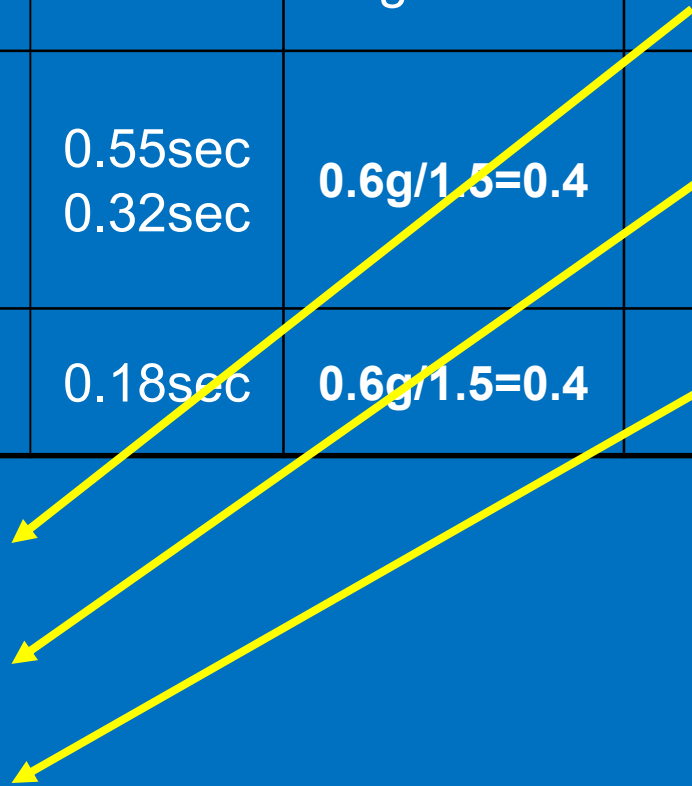
Spectral Accelerations

EQ	$Sa_{o\max}$	φασματική Sa_{\max}	T	$2.5 \cdot A_o / 1.5$	$(2/3) \cdot Sa_{\max}$
	(1)	(2)	(3)	(4)= $2.5 \cdot 0.24$	(5)= $2/3 \cdot (2)$
Koroni	0.07g	0.31g	0.28sec	$0.6g / 1.5 = 0.4$	0.20g
Kythera	0.15g	0.65g 0.46g	0.55sec 0.32sec	$0.6g / 1.5 = 0.4$	0.43g 0.31g
Achaia - Ilia	0.21g	0.87g	0.18sec	$0.6g / 1.5 = 0.4$	0.57g

Χωρίς ρωγμές

Μόνο ρωγμές

Εκτενείς ρωγμές + ορισμένες
μερικές καταρρεύσεις



• Από την ανασκόπηση βιβλιογραφίας: $\longrightarrow \zeta_{\text{equivalent}} = 20\%$

• Από παραμετρικές αναλύσεις σε κτίρια τοιχοποιίας τα σεισμικά φορτία στα οποία ανθίστανται (με ρωγμές) προκύπτουν.

Inelastic: $\longrightarrow \Phi_{\text{resisted}} = 25\%g$

Elastic: $\longrightarrow \varepsilon_{\text{resisted}} = 12\%g * 1.7 = 21\%g$

• Από την μετεπεξεργασία καταγραφών για τις οποίες εμφανίστηκαν ρωγμές και τοπικές βλάβες σε μνημεία, χωρίς καταρρεύσεις:

For Achaia – Ilia EQ, for:

$\zeta_{\text{equivalent}} = 20\%$

\longrightarrow results:

$\Phi_{\text{effective}} \approx \Phi_{\text{resisted}} = 25\%g$

Selected Literature

1. De Stefano, A., Matta, E., & Clemente, P. (2016). Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1), 83-106. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0154-y>.
2. Penelis GG, Stylianidis KC (2001) Structural restoration of the Acheiropoietos Basilica in Thessaloniki. *In: Proceedings of the 2nd international congress on studies in ancient structures 2001, Istanbul, Turkey*
3. Raptis K. T, Zombou-Asimi A. (2010) The Consolidation and Restoration Project of Acheiropoietos Basilica in Thessaloniki. *In: Proceedings of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin - Monubasin 8 (Patras, 31 May -2 June 2010), I, Athens, 411-428*
4. Salonikios T., Theodoulidis N., Morfidis K., Zacharopoulou G., Raptis K. (2017). Efficiency investigation of structural interventions based on in situ ambient vibration measurements on Acheiropoietos early Byzantine basilica, Thessaloniki, Greece. *Journal of Civil Structural Health Monitoring. First online publication Springer-Verlag*. DOI 10.1007/s13349-017-0262-3. ISSN 2190-5452.
5. Spyrakos, C. C. (2018). Bridging performance based seismic design with restricted interventions on cultural heritage structures. *Engineering Structures*, 160, 34-43.
6. Theodoulidis N, Kalogeras I, Papazachos C, Karastathis V, Margaris B, Papaioannou Ch, Skarlatoudis A. (2004). HEAD 1.0: A unified Hellenic Accelerogram Database. *Seismol Res Lett* 75:36–45.
7. Zacharopoulou G., 2015, 'Structural metric models of public ottoman baths in Thessaloniki, Greece', in *12th International Conference on "Standardization, Prototypes and Quality: a means of Balkan Countries' Collaboration"*, October 22-24, 2015, Kocaeli University İzmit, Kocaeli, Turkey, Proceedings, pp 305-313.