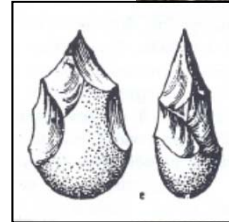
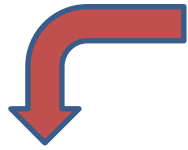


## Ενότητα: ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΗΣ - ΔΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (I)

Βγαίνοντας ο άνθρωπος από την σπηλιά.... >10.000 π.Χ.

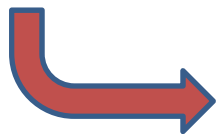


Σπήλαιο Φράγχθι, Αργολίδα



Δομικά υλικά:

- λίθος
- Χονδροί κορμοί δένδρων
- καλάμια, άχυρο
- πηλός



**1<sup>ο</sup> ΔΟΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ:**  
**Δοκός επί στύλων**  
**(ανάλογα με τα κατά χώραν υλικά)**



Μουσείο Προϊστορίας,  
Neubrandenburg, Germany.

# Δοκός επί στύλων εν ξηρώ (χωρίς κονίαμα)

Η λίθος ως βασικό δομικό υλικό για χιλιετηρίδες

Stonehenge, Αγγλία (3000-2000 π.Χ.)



Poulnabrone dolmen, Ireland  
(4000-3000 π.Χ.)



Ναός Λούξορ, Αίγυπτος (1400 π.Χ.)

## **Δοκός επί στύλων εν ξηρώ (χωρίς κονίαμα)**

**Η λίθος ως βασικό δομικό υλικό για χιλιετηρίδες**

**Στον ελλαδικό χώρο συναντάται στον Μινωικό, Κυκλαδικό (3000-1000π.Χ) και Μυκηναϊκό Πολιτισμό (1600-1100π.Χ).**





## Δοκός επί στύλων εν ξηρώ (χωρίς κονίαμα)

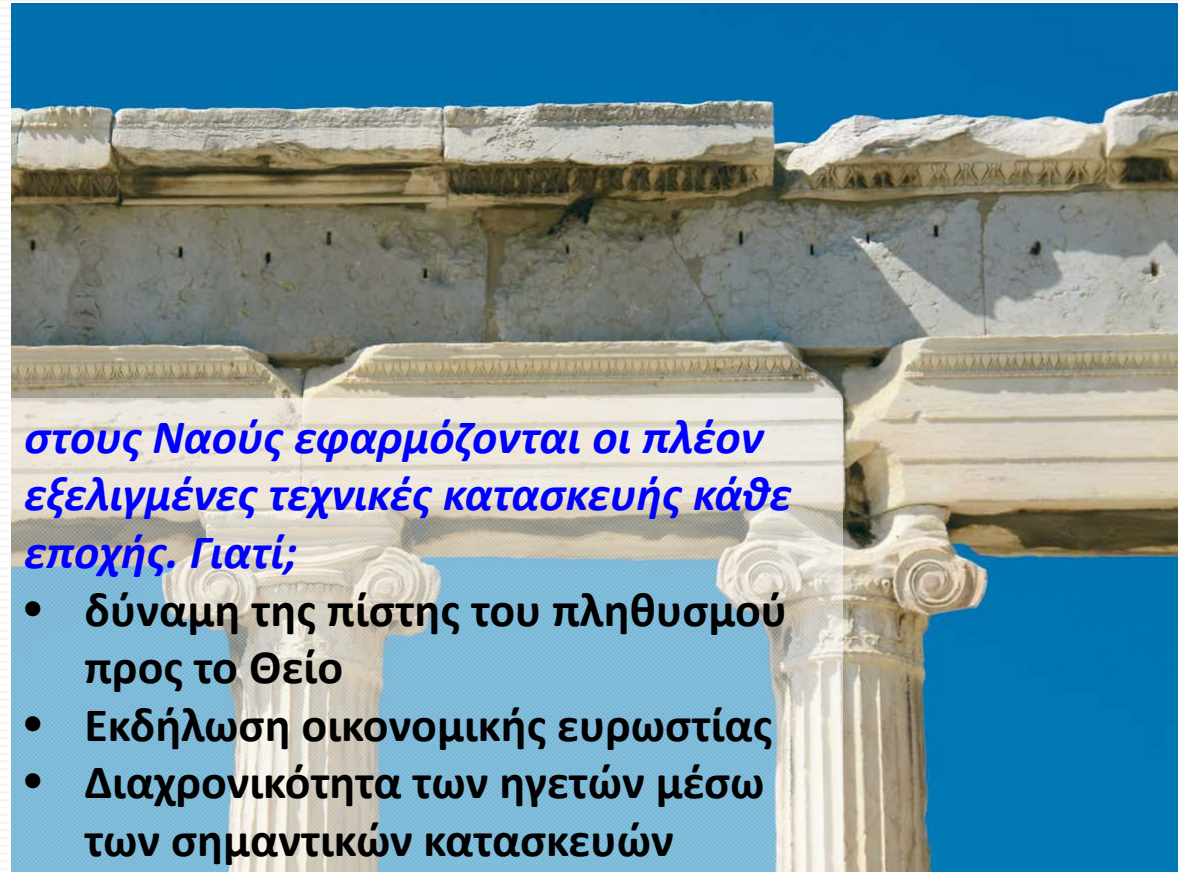
Η λίθος ως βασικό δομικό υλικό για χιλιετηρίδες

Στον ελλαδικό χώρο συναντάται στον Μινωικό, Κυκλαδικό (3000-1000π.Χ) και Μυκηναϊκό Πολιτισμό (1600-1100π.Χ) ... → στην Αρχαϊκή Περίοδο (8<sup>ος</sup>-5<sup>ος</sup> αι. π.Χ.).

Χρήση ευγενών υλικών (μάρμαρο, ασβεστόλιθος, λαξευμένες λίθοι από εργοτάξια)



Μυκήνες, Πύλη Λεόντων



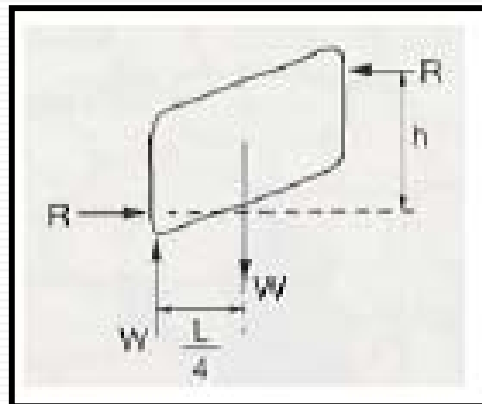
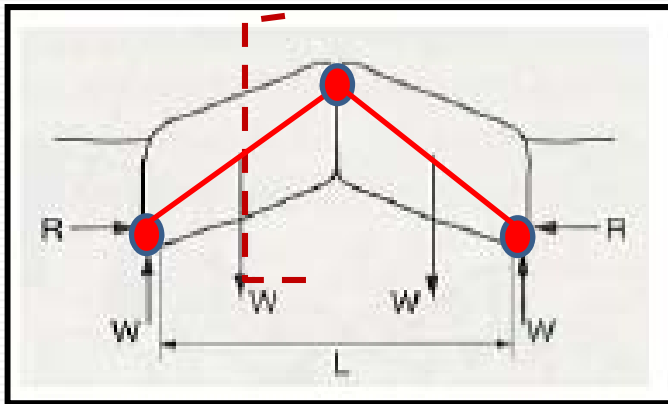
στους Ναούς εφαρμόζονται οι πλέον εξελιγμένες τεχνικές κατασκευής κάθε εποχής. Γιατί;

- δύναμη της πίστης του πληθυσμού προς το Θείο
- Εκδήλωση οικονομικής ευρωστίας
- Διαχρονικότητα των ηγετών μέσω των σημαντικών κατασκευών

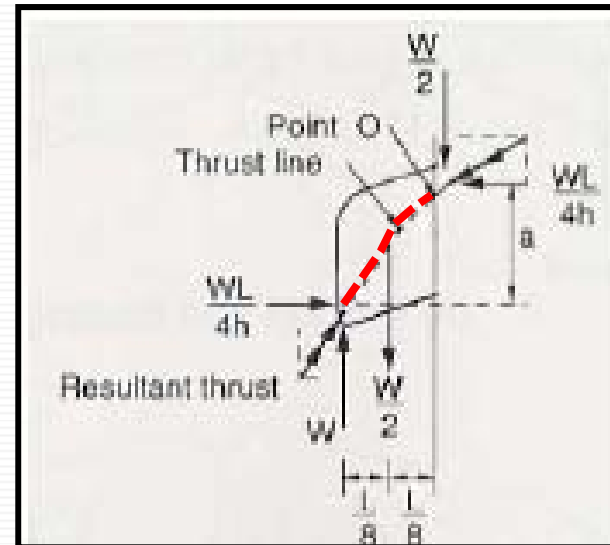
## Δομικό Σύστημα: Τόξο

Το τόξο είναι μια καμπύλη που αντικατέστησε τη δοκό στο σύστημα «δοκού επί στύλων»

Πρώιμα τόξα: (Βιντζηλαίου, ΕΜΠ)



Η μυκηναϊκή γέφυρα (1600-1100π.Χ)  
(15ο χιλ. Ναυπλίου-Επιδαύρου)



Εξ. Ροπών: εύρεση του  $a$ , τροχιά του θλιπτήρα

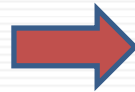
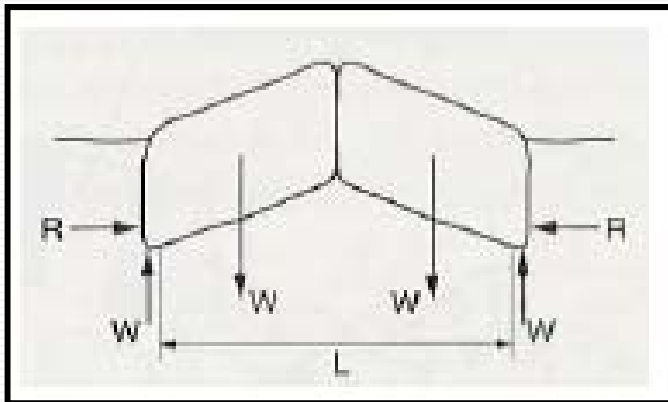
Τι άνοιγμα μπορώ να γεφυρώσω με αυτή την διάταξη;

Εξ. Ροπών: εύρεση του  $R$

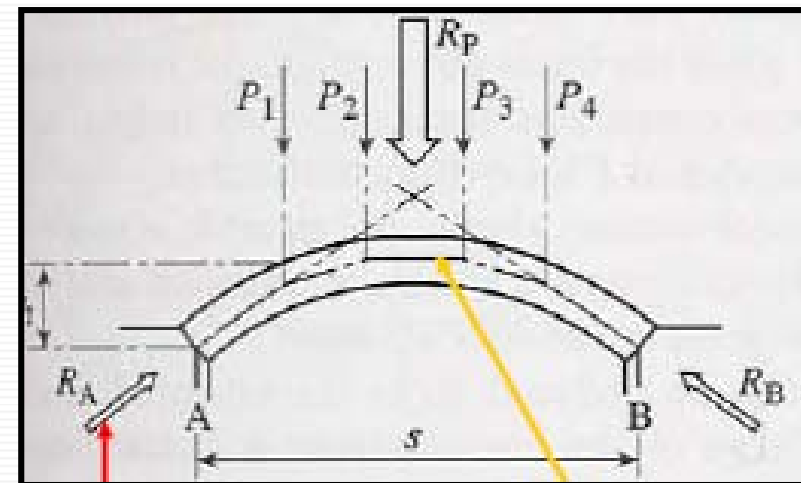
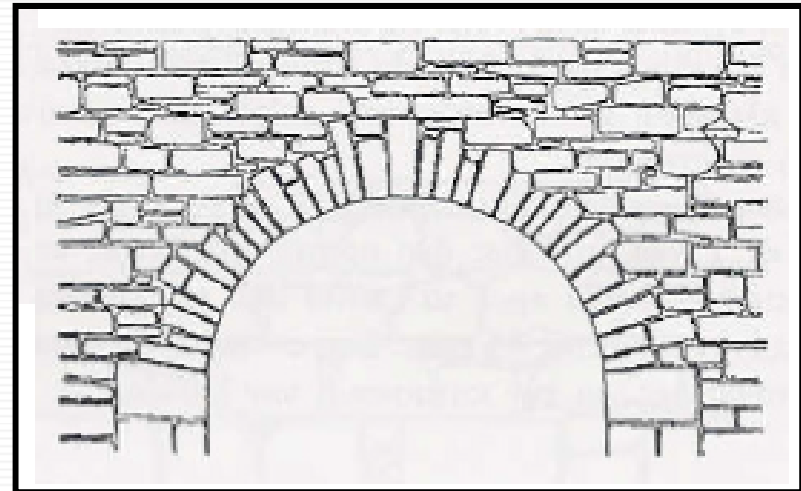
## Δομικό Σύστημα: Τόξο

Το τόξο είναι μια καμπύλη που αντικατέστησε τη δοκό στο σύστημα «δοκού επί στύλων»

Πρώιμα τόξα: (Βιντζηλαίου, ΕΜΠ)



Τόξο: Εξαιτίας της καμπυλότητάς του, φέρει τα κατακόρυφα φορτία μέσω της ανάπτυξης θλιπτικών τάσεων



Πυκνότερη  
διακρίτοποίηση,  
ακριβέστερη εκτίμηση της  
τροχιάς των θλιπτικών  
τάσεων



# Δομικό Σύστημα: Τόξο

Arches

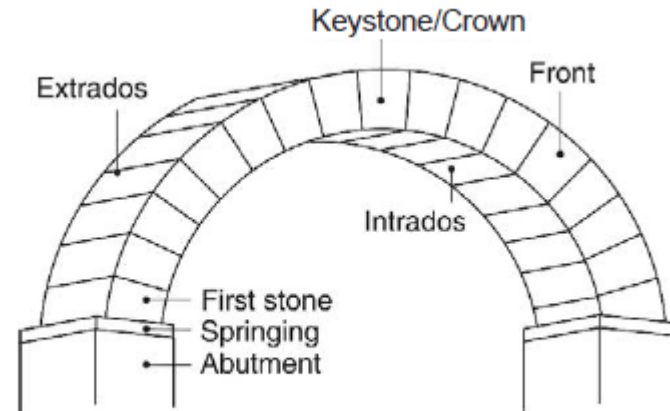
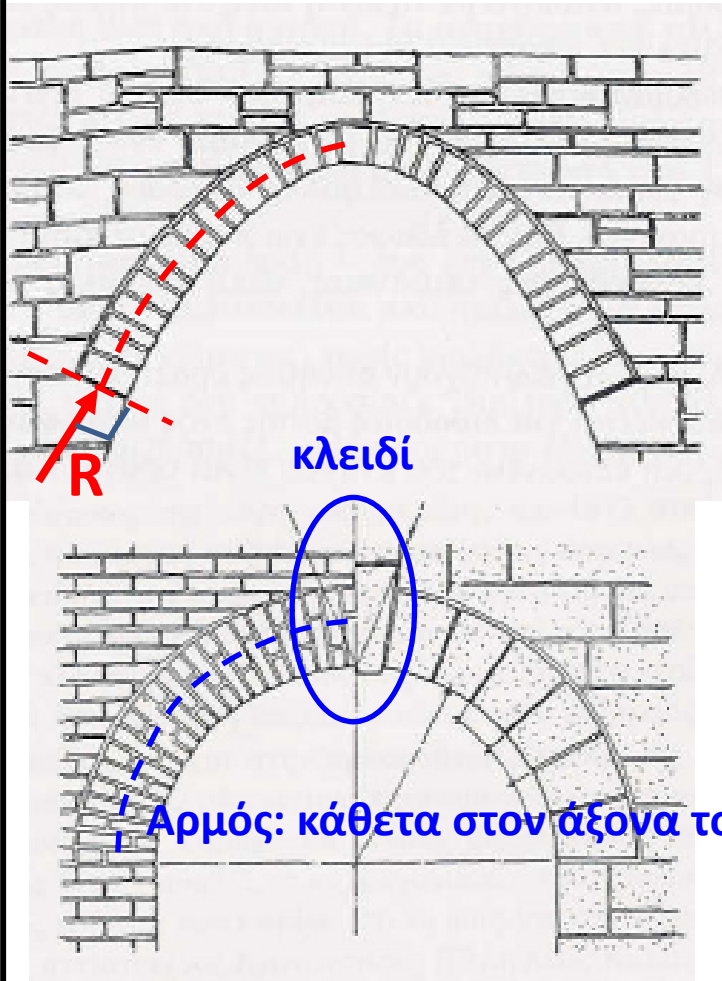
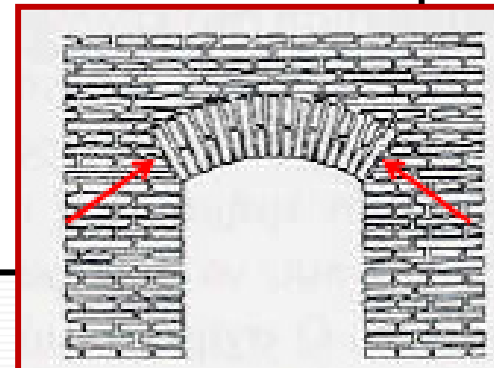
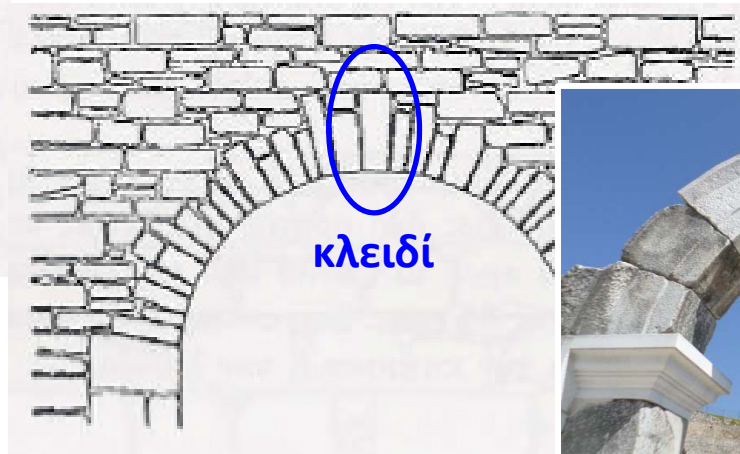


Fig. 1-24. Terms of stone arch (vault) bridges according to Koch (1998)

Μονός αριθμός λίθων

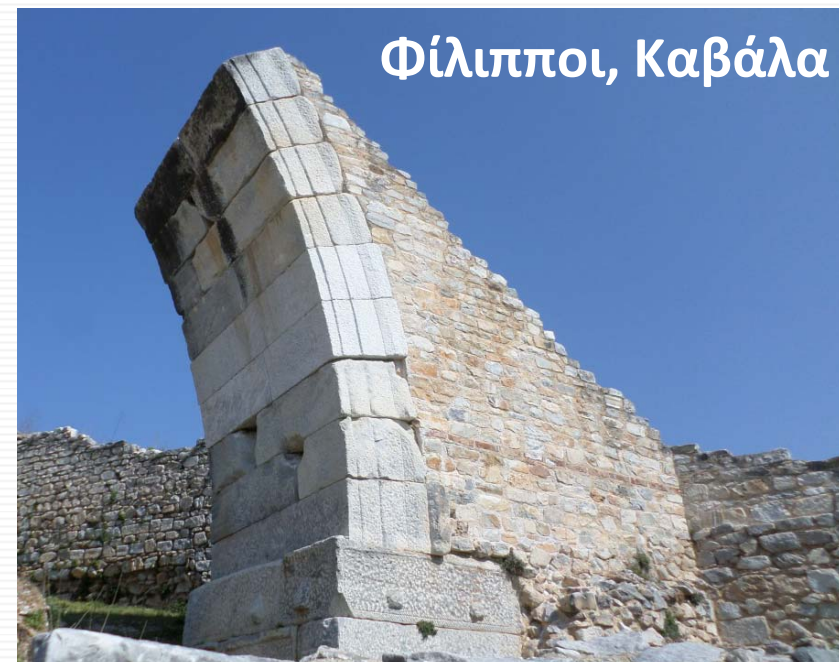


## Δομικό Σύστημα: Τόξο

Εκτενής χρήση στην Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία  
Γέφυρες, υδραγωγεία, σημαίνοντα κτήρια

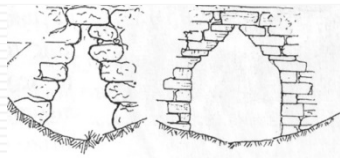


Θολίτες (σφηνοειδής γεωμετρία):  
Λαξευτοί καμπύλοι λίθοι χωρίς  
συνδετικό κονίαμα  
→ πλήρης επαφή

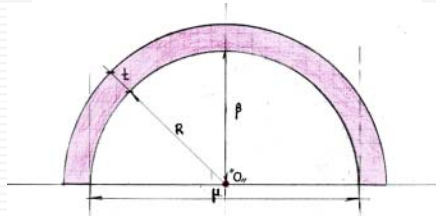




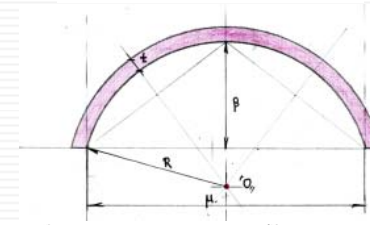
## Εκφορικό Σύστημα



## Πλήρες Ημικόκλιο



## Τμήμα Κύκλου



Ποικιλία  
Χαράξεων

6η χιλ

13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

## 1<sup>η</sup> Περίοδος

Ρωμαϊκή Εποχή

## 2<sup>η</sup> Περίοδος

Ανοίγματα έως 30m, στιβαροί θόλοι (με λυγηρότητα ~1:10) και επιμελημένη δόμηση

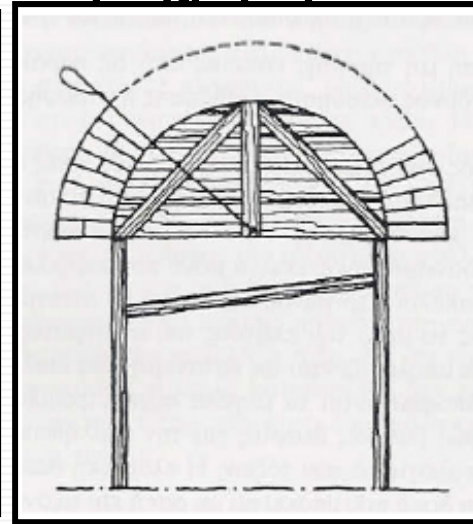
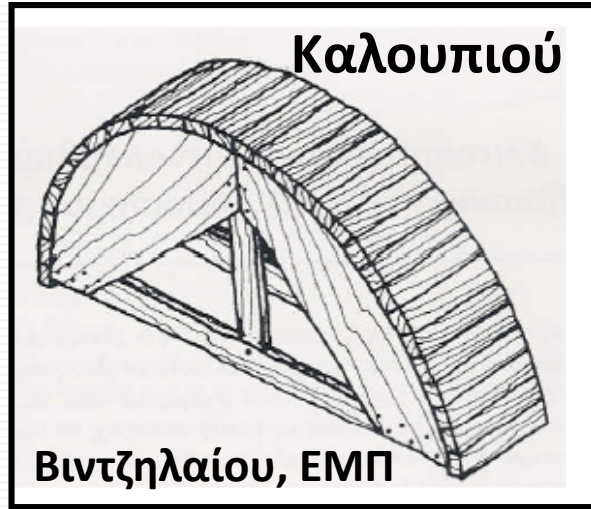
## 3<sup>η</sup> Περίοδος

Μεσαίωνας

Ελαφρώς καταβιβασμένα τόξα (τμήματα κύκλων με κέντρα σε διαφορετικές θέσεις και υψόμετρα)

Ευρώπη: Έναρξη ερευνών για την αντοχή των υλικών, τις τροχιές των δυνάμεων, τον υπολογισμό των θόλων

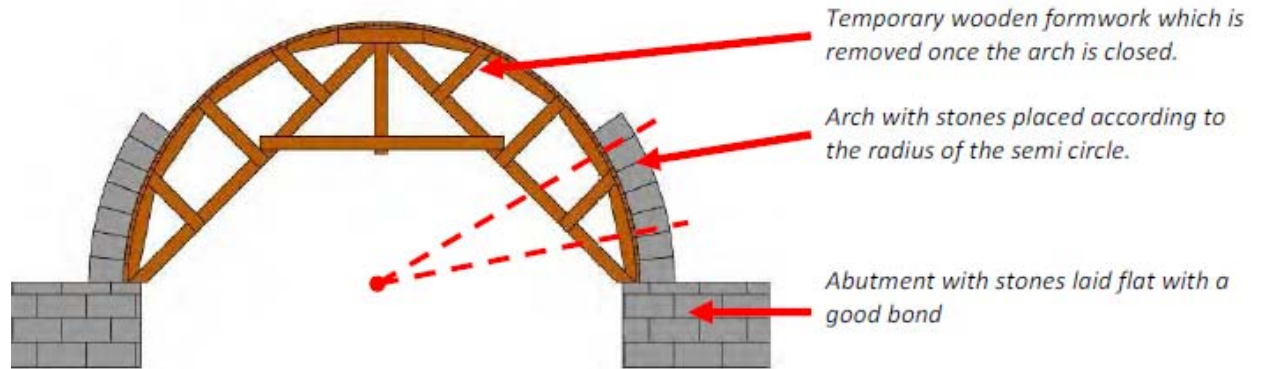
# Κατασκευή τόξου: από την βάση προς το «κλειδί» με χρήση:



βοηθητικής κατασκευής.



Fig 9: Construction of a multiple-arch culverts with stones found in the vicinity



Basic elements of arch bridge construction. The arch is constructed symmetrically over a temporary work. Note that the arrangement of the stones differs entirely between the arch and the abutment. Stones of the abutments are placed in a flat and horizontal position while the ones forming the arch follow the radius of the circle. This arrangement is the key principle for the stability of the bridge.

## «Τοξωτές λιθόκτιστες γέφυρες»

### Μεγάλα τεχνικά έργα

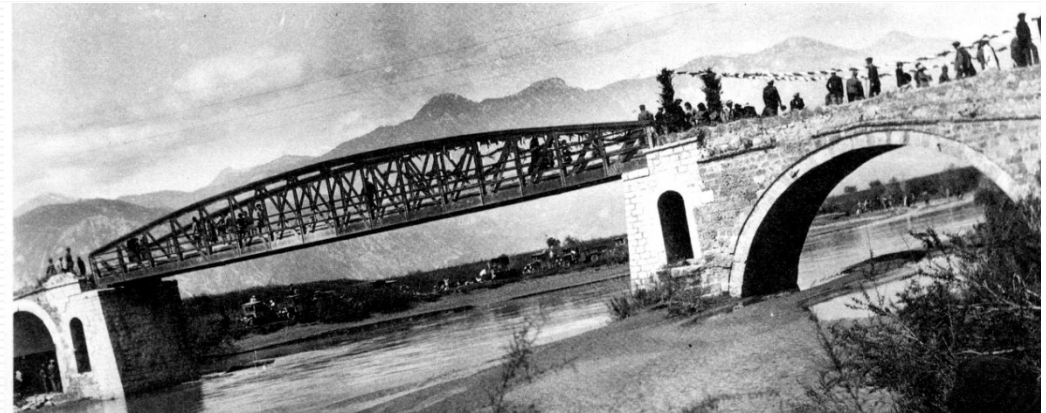
Αποτελούν τεκμήριο των τεχνικών δυνατοτήτων της κάθε ιστορικής περιόδου και της κοινωνίας που τις δημιούργησε.

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους προϋποθέτει την συνδυασμό γνώσεων Δομοστατικού, Γεωτεχνικού, Υδραυλικού και (κυρίως στα νεώτερα χρόνια) Συγκοινωνιολόγου Μηχανικού.

### Αισθητική και καλλιτεχνική αξία



Γέφυρα Άρτας 1881



Γέφυρα Αλαμάνας (π. Σπερχειός) 1930,  
εορτασμός 100 χρόνων από την  
απελευθέρωση

**Βιντζηλαίου , ΕΜΠ**



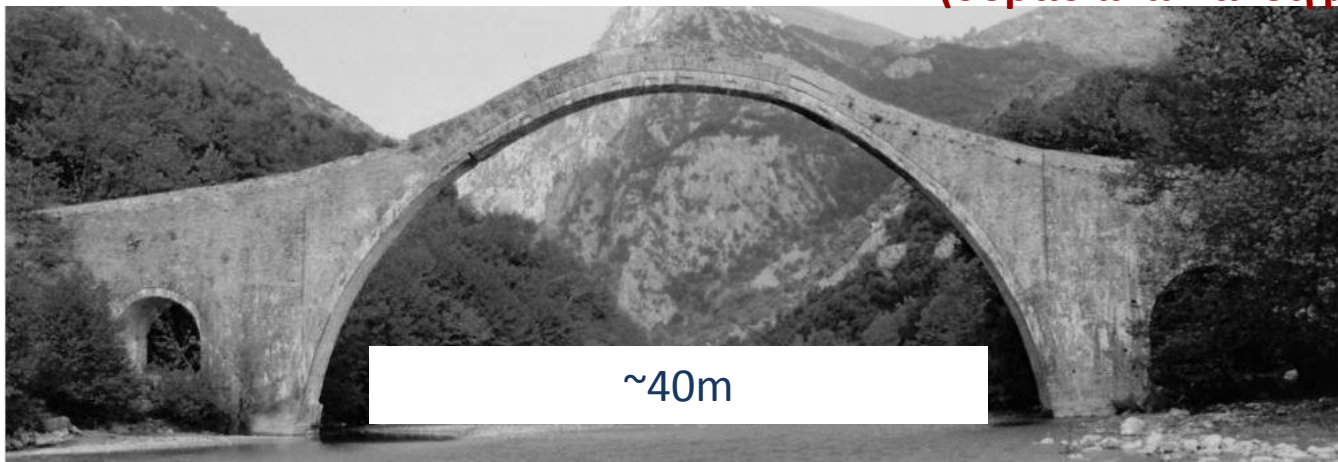
# Παράμετροι Σχεδιασμού Λίθινων Γεφυρών

Θέση Γεφυρώσεως: επί βράχου ή επί ογκόλιθων ή επί ξυλ. πασάλων



Διάταξη Βάθρων – Μέγιστο Άνοιγμα Τόξου

Γ. Πλάκας: τοποθέτηση μεσοβάθρων οριακά εντός της κοίτης του Αράχθου  
Κατασκευή ανακουφιστικών τόξων (υδραυλικών ανοιγμάτων)



Βιντζηλαίου , ΕΜΠ



## Γεφύρι της Πλάκας (Άραχθος ποταμός)



Κατάρρευση λόγω βροχόπτωσης, 2015  
Υποσκαφή θεμελίωσης

Χτισμένο το 1866, ήταν μονότοξο, με άνοιγμα καμάρας 40 μέτρα, ύψος 21 μέτρα. Θεωρούνταν το μεγαλύτερο μονότοξο γεφύρι των Βαλκανίων και το τρίτο μεγαλύτερο στην Ευρώπη.

**Πρωτομάστορας Κ. Μπέκας:**  
**Σχεδιασμός φορέα, σχεδιασμός του κονιάματος (πολύ ισχυρό, λέγεται ότι χρησιμοποιήθηκε πρωτεΐνη από ασπράδια αυγών)**



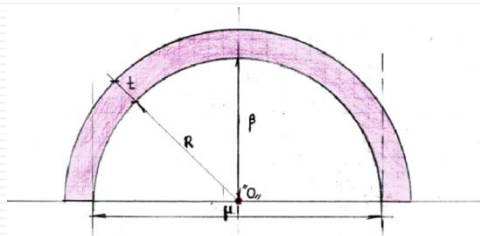
# Παράμετροι Σχεδιασμού Λίθινων Γεφυρών

Θέση Γεφυρώσεως: επί βράχου ή επί ογκόλιθων ή επί ξυλ. πασάλων

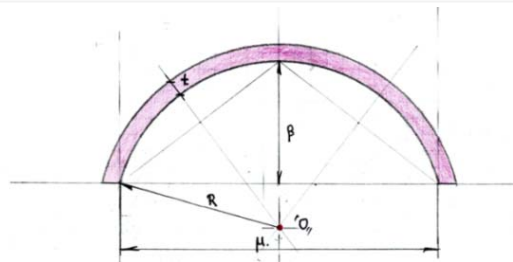
Διάταξη Βάθρων – Μέγιστο Άνοιγμα Τόξου

Χάραξη Τόξου - Λυγρότητα τόξου (στην κλείδα): Ορισμός: Ο λόγος του πάχους του τόξου στην κλείδα προς το καθαρό άνοιγμα του τόξου

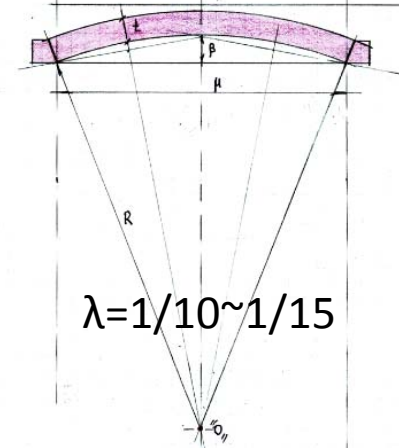
Αποτελεί την κύρια στατική επιλογή που καλείται να κάνει ο ιστορικός γεφυροποιός



$$\lambda = 1/10 \sim 1/15$$



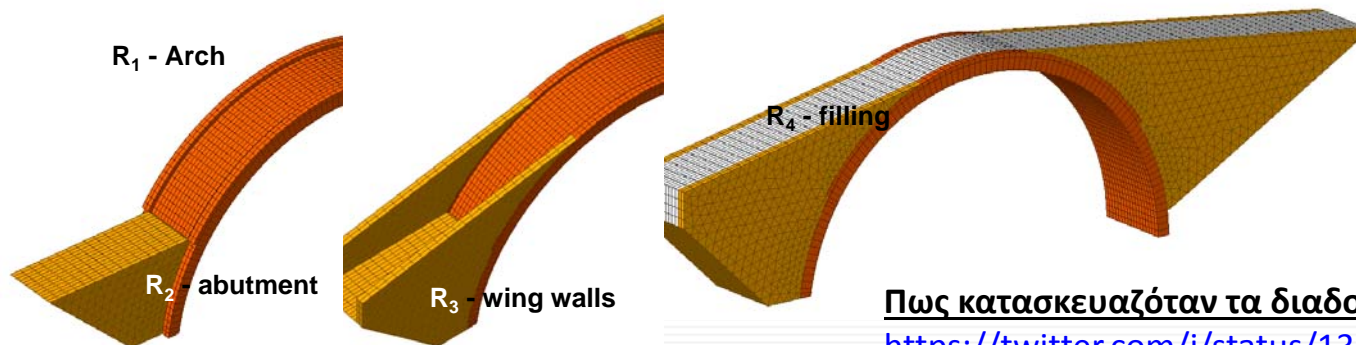
$$\lambda = 1/20 \sim 1/25$$



$$\lambda = 1/10 \sim 1/15$$

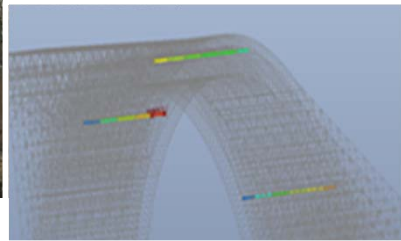
Χθαμαλές

## Μεθοδολογία κατασκευής



Πως κατασκευαζόταν τα διαδοχικά τόξα γέφυρας επί ποταμού  
<https://twitter.com/i/status/1316688832037892097>

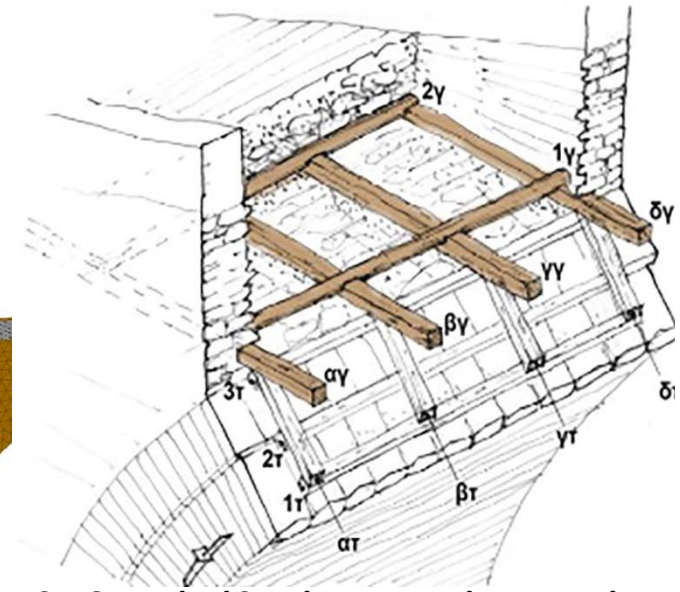
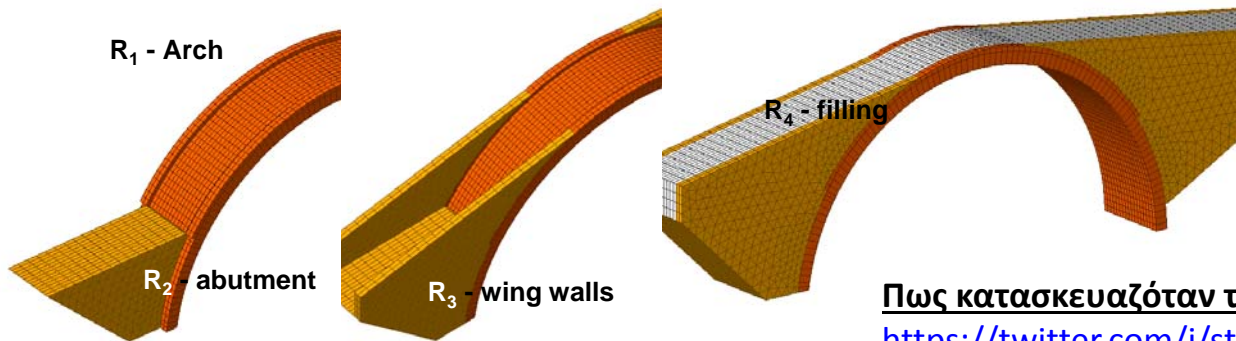




Μεταλλικά στοιχεία



## Μεθοδολογία κατασκευής



Πως κατασκευαζόταν τα διαδοχικά τόξα γέφυρας επί ποταμού  
<https://twitter.com/i/status/1316688832037892097>



Kasese District Local Government

# Stone arch bridges

*A strong & cost effective technology for rural roads*



**A practical manual for Local Governments**

With the support of  
THE BELGIAN  
DEVELOPMENT COOPERATION **.be**

Dirk Proske  
Pieter van Gelder

# Safety of Historical Stone Arch Bridges

 Springer



## Δομικό Σύστημα: Τόξο

...αυτή η τεχνική που εφαρμόσθηκε στην γεφυροποιία, κατά τα Βυζαντινά Χρόνια εισήχθη και στην ναοδομία:

→ τρούλοι, θόλοι, σταυροθόλια



εικ. 8 Αποκατάσταση των τόξων σταυροθολίων στον καθεδρικό ναό της Solssons (Γαλλία), μετά αι τον Α΄ παγκόσμιο πόλεμο.

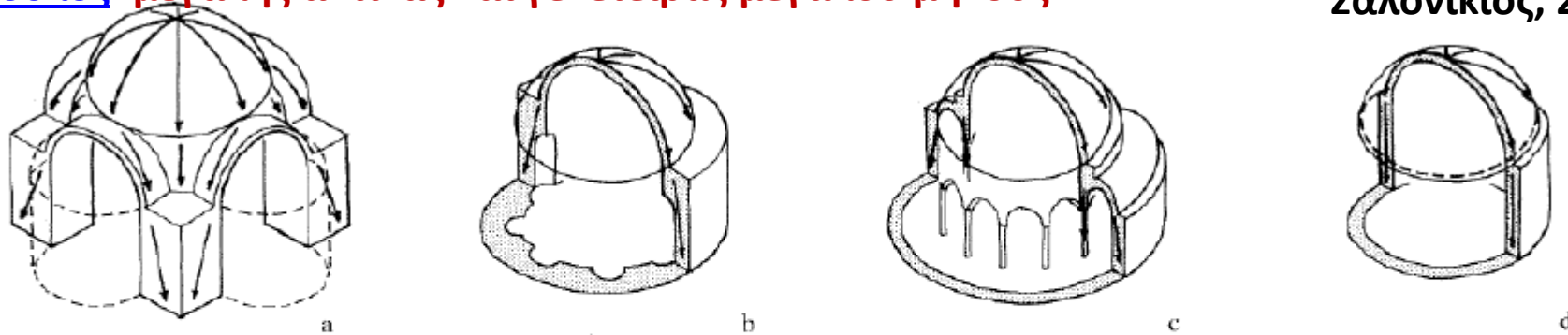
**Γοτθική περίοδος: το τόξο κυριαρχεί!!!**



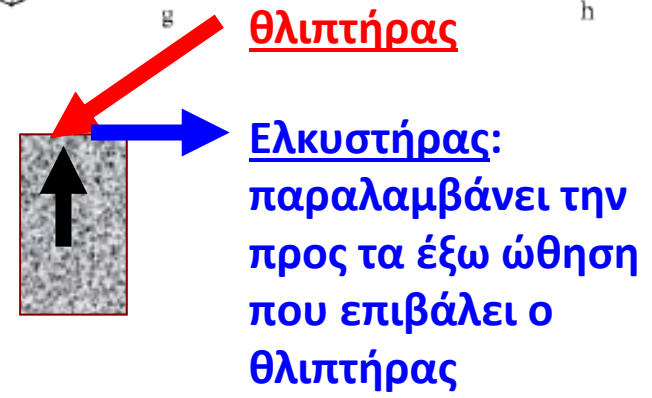
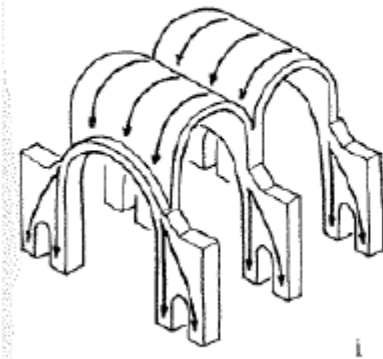
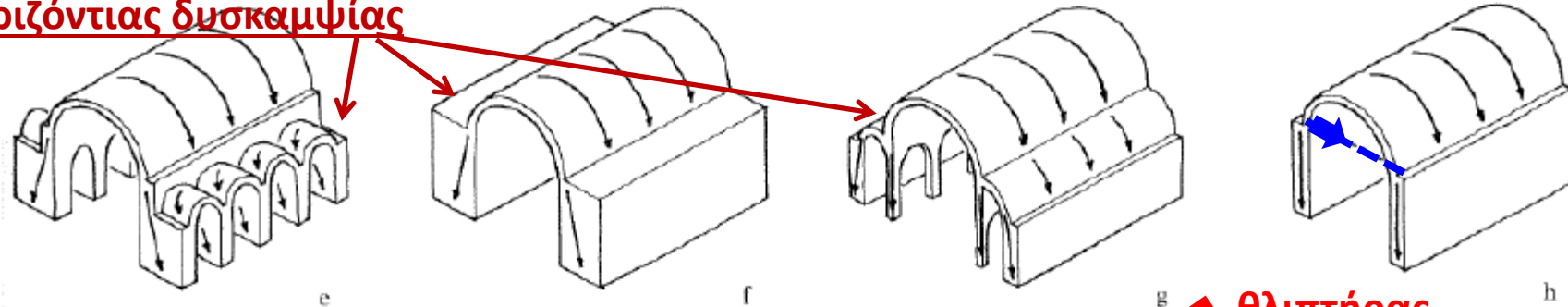
# Δομικό Σύστημα: Τόξο υπό θλίψη → τρούλοι, θόλοι, σταυροθόλια

**Τρούλος:** μεγάλης ακτίνας και γενέτειρας μεγάλου μήκους

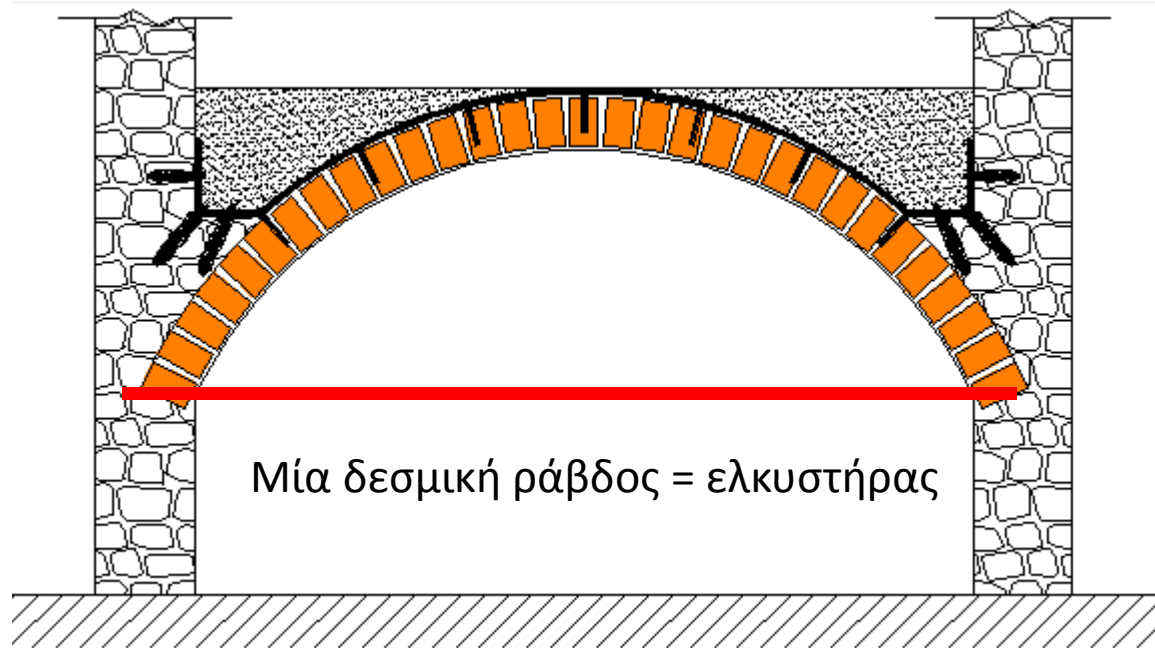
Σαλονικιός, 2007



**Θόλος:** οι ωθήσεις του παραλαμβάνονται από κατακόρυφα διαφράγματα μεγάλης οριζόντιας δυσκαμψίας



Εικ. 3. Κύρια φέροντα συστήματα κατασκευών της Βυζαντινής και Μεσαιωνικής περιόδου. Κατάταξη κατά R. Mainstone (1975).

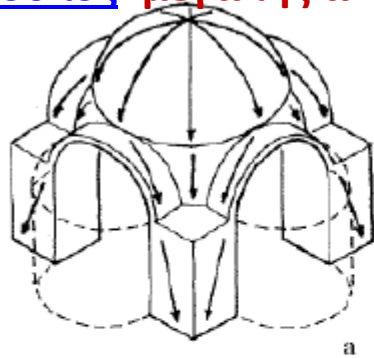




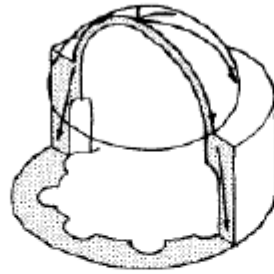
# Δομικό Σύστημα: Τόξο υπό θλίψη → τρούλοι, θόλοι, σταυροθόλια

**Τρούλος:** μεγάλης ακτίνας και γενέτειρας μεγάλου μήκους

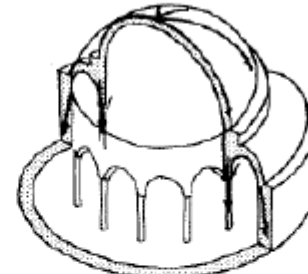
Σαλονικιός, 2007



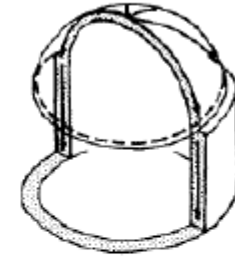
a



b

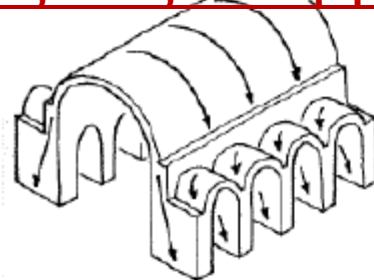


c

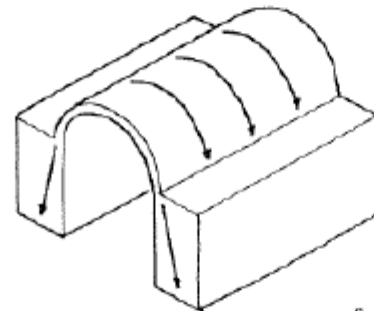


d

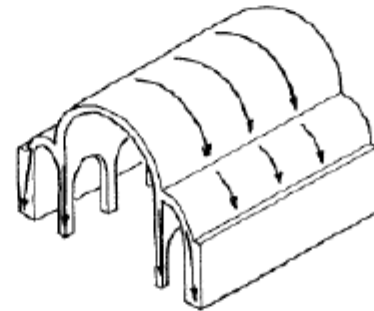
**Θόλος:** οι ωθήσεις του παραλαμβάνονται από κατακόρυφα διαφράγματα μεγάλης οριζόντιας δυσκαμψίας



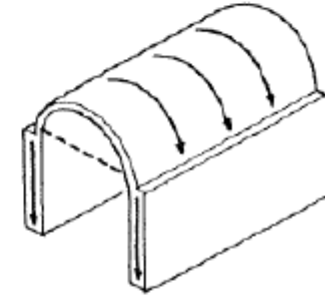
e



f

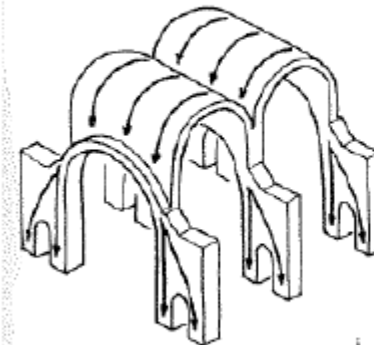


g

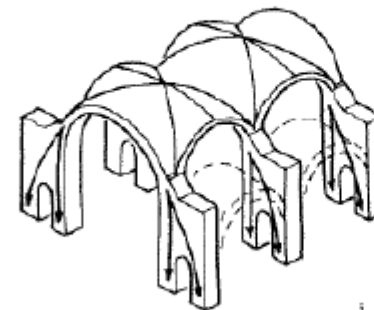


h

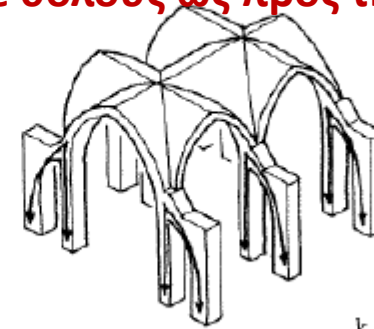
**Σταυροθόλια:** ομοίως με θόλους ως προς την παραλαβή ωθήσεων



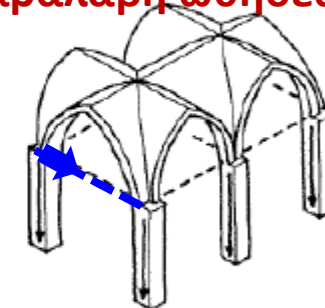
i



j



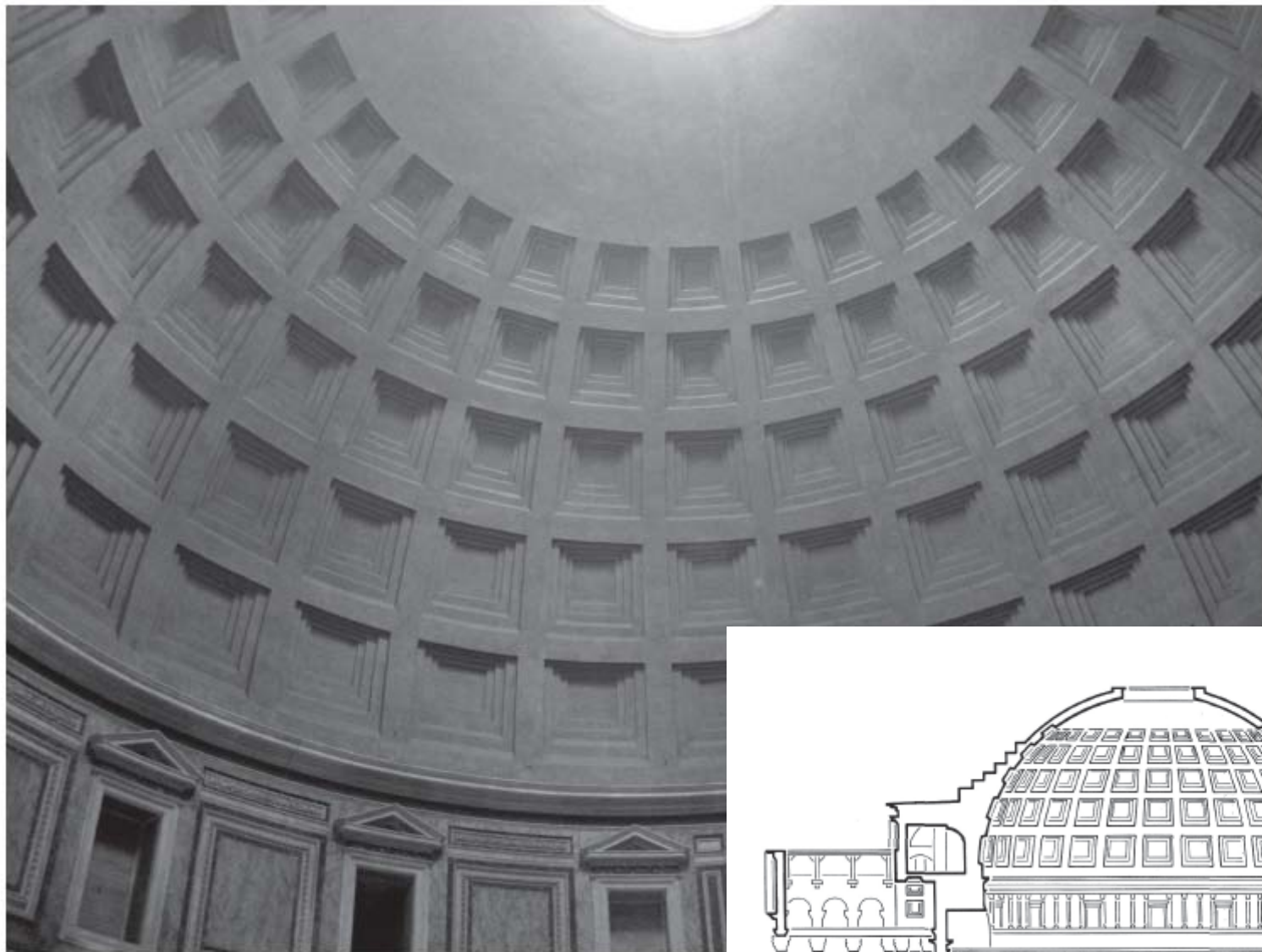
k



l

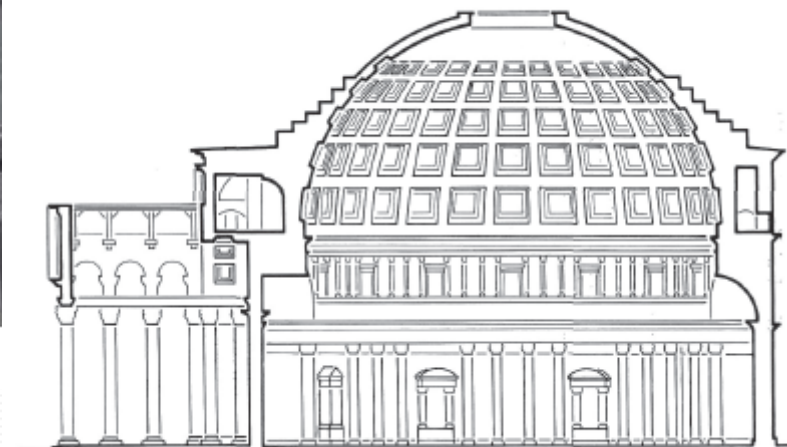
Εικ. 3. Κύρια φέροντα συστήματα κατασκευών της Βυζαντινής και Μεσαιωνικής περιόδου. Κατάταξη κατά R. Mainstone (1975).

## Από σημειώσεις Μορφολογίας, Αρχιτεκτονική ΔΠΘ



εικ. 21 Ο τρούλος στο Πάνθεον, Ρώμη

**Τρούλος διαμέτρου (εσωτερικό) 43.3μ**

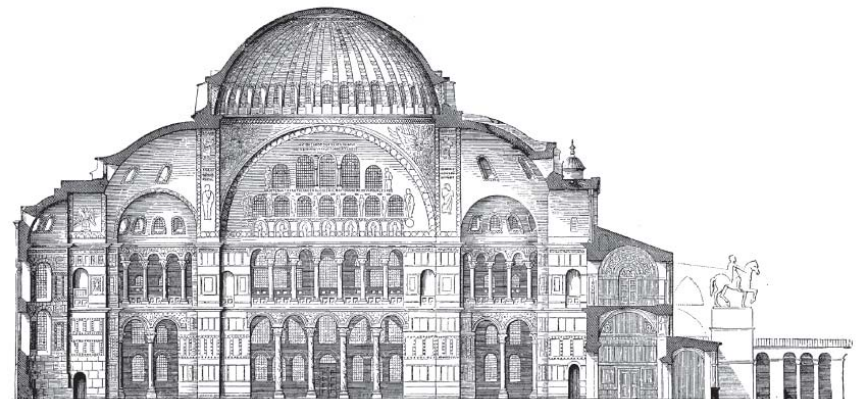






## Από σημειώσεις Μορφολογίας, Αρχιτεκτονική ΔΠΘ

**Τρούλος διαμέτρου 52μ, με παράθυρα  
στην βάση του**



σχ. 53 Τομή καθ' ύψος από το ναό Αγ. Σοφίας Κωνσταντινούπολης. Η διάμετρος του τρούλου φτάνει τα 52μ, χωρίς τύμπανο. Φέρει νευρώσεις και δημιουργεί κατάλληλο χώρο για την ακτινική παράθεση των παραθύρων στη βάση του τρούλου.














*Figure 2.17 - Scouring around a bridge foundation*

Υποσκαφή θεμελίωσης



## Τι άνοιγμα μπορώ να γεφυρώσω με τόξο;

Arch type	Continuous arch		Cross vault
	Steep arch	Low-pitched arch	
Half-circular arch or segmental arch			
Parabolic arch			
Elliptic arch or elliptic segment arch			
Basket arch			

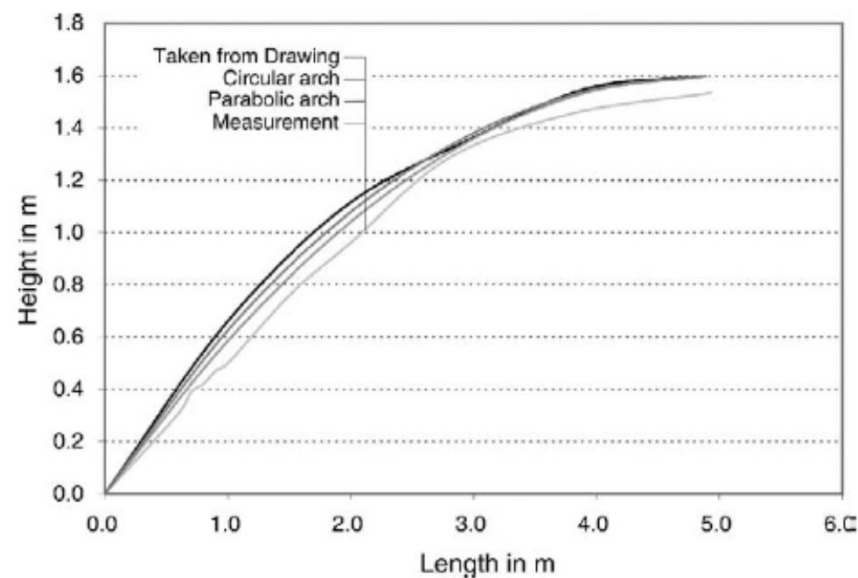


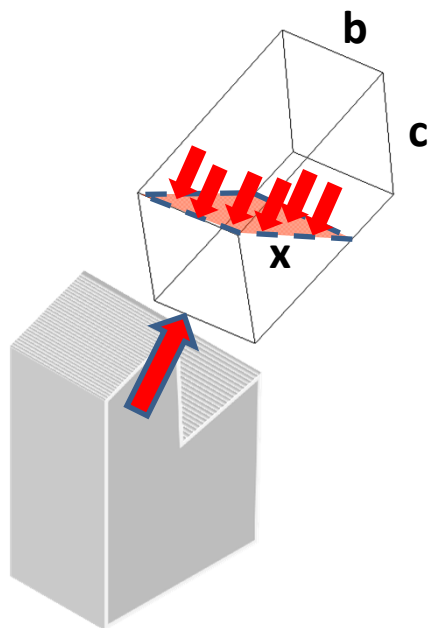
Fig. 1-36. Arch shape of a historical concrete vault

Η συνισταμένη αντίδραση στην στήριξη:

$$F = \sqrt{W^2 + \left(\frac{WL}{4h}\right)^2} = W \sqrt{1 + \left(\frac{L}{4h}\right)^2}$$

$$\text{Weight: } W = \rho_{\text{material}} V = \rho_{\text{material}} \cdot b \cdot c \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}$$

$$\Rightarrow F = \rho_{\text{material}} \cdot b \cdot c \cdot h \sqrt{\left(1 + \frac{L^2}{4h^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{L^2}{16h^2}\right)}$$



Η αντίσταση της διατομής που είναι κάθετη στην τροχιά του θλιπτήρα στην γειτονιά της στήριξης είναι:

$$R = f_{\text{material},c} \cdot (x \cdot b)$$

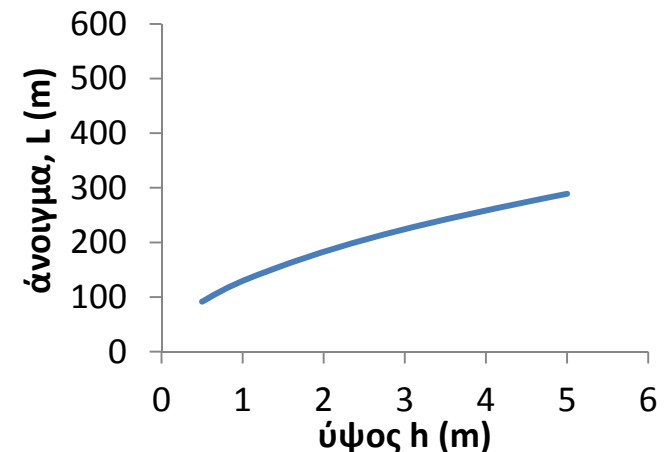
**Θα πρέπει  $F \leq R$ , οριακά  $F=R$**

Θεωρητικά:

frock (kN/m <sup>2</sup> )	c (m)	b (m)	x (m)	ρ (kN/m <sup>3</sup> )	h (m)	L (m)	check
40000	1	1	1,414214	27	0,5	91,5	3,77695E-08
40000	1	1	1,414214	27	1	129,4	0,000122079
40000	1	1	1,414214	27	2	183,0	3,97922E-08
40000	1	1	1,414214	27	3	224,0	2,7816E-08
40000	1	1	1,414214	27	4	258,6	0,000115499
40000	1	1	1,414214	27	5	289,1	6,39484E-08

Δίνω τιμή στο h

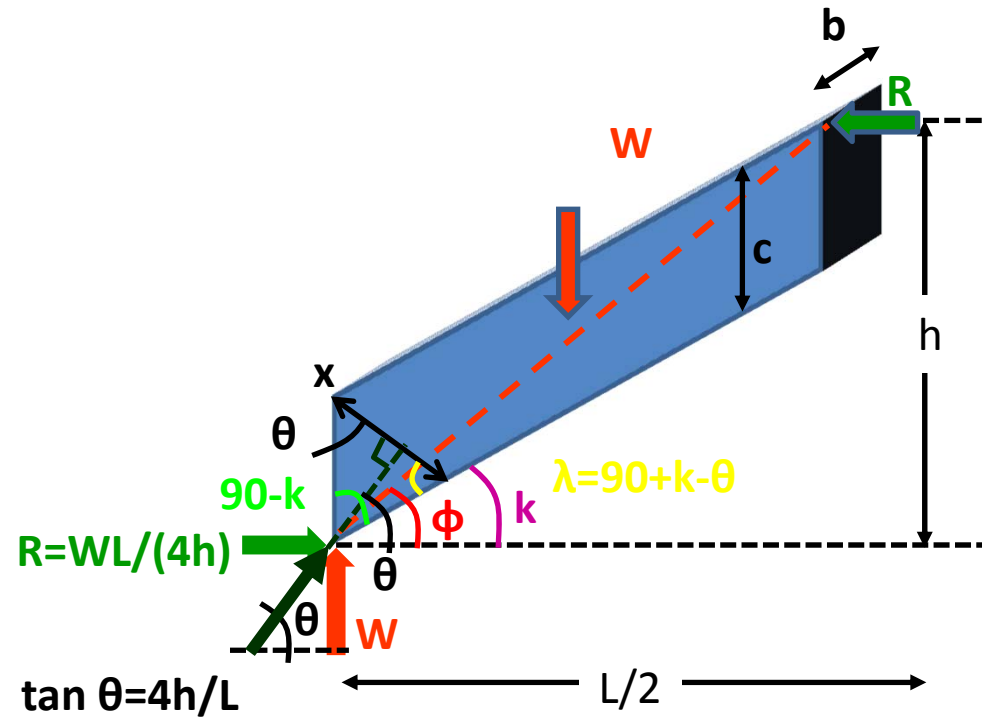
Ψάχνω το L



Διερεύνηση με:

Φτιάξτε και άλλες καμπύλες και βάλτε τις μέσα στο ίδιο γράφημα αλλάζοντας π.χ. την αντοχή του υλικού  $f_{\text{material},c}$  (5, 10, 20, 30MPa) ή την τετράγωνη γεωμετρία της διατομής (b=c=0.5, 1, 2, 5 m).





$$\tan \theta = 4h/L$$

Κλίση θλιπτικής τροχιάς τάσεων  $\tan \phi = 2h/L$

$$\tan k = (h-c)/(0,5L)$$

Νόμος ημιτόνων: