

# A

## Δομή, λειτουργία και αισθητική στη φύση

Μια αρχιτεκτονική προσέγγιση

Σκεφτείτε το μάτι μας με την κόρη που μεγαλώνει όταν το φως λιγοστεύει, με τα φρύδια που δεν επιτρέπουν το νερό να μπει μέσα, με τα βλέφαρα που κλείνουν για προστασία ή για τον ύπνο και όλα τα άλλα και κάντε μία γρήγορη σύγκριση με τα παράθυρα που σχεδιάζουμε. Μάλλον τα μάτια μας είναι παράθυρα από το μέλλον!

Σκεφτείτε έναν σκελετό από κόκαλα που αλλάζει σχήμα όταν χρειάζεται και μαζί του το δέρμα που ως εφελκυσμένη μεμβράνη, αλλού τεντώνει και αλλού ζαρώνει και τους μυς στα πόδια που από το ένα κόκαλο συνδέονται με το άλλο κόκαλο και δίνουν τη δυνατότητα στον άνθρωπο να στέκει όρθιος. Μάλλον μιλάμε για αρχιτεκτονική του μέλλοντος.

Από την αρχή της ανθρωπότητας οι κατασκευές του ανθρώπου είναι εμπνευσμένες από τη φύση γύρω του. Αν δούμε τα σημερινά ανθρωποειδή ρομπότ, μοιάζουν με παιδικά παιχνίδια σε σύγκριση με τους πραγματικούς βιολογικούς οργανισμούς. Ίσως και αν όλοι οι κλάδοι της επιστήμης συνενωθούν, να μπορέσουν κάποτε να φτιάξουν κάτι που να πλησιάζει τον άνθρωπο.

Ο ιστός της αράχνης σε αντοχή είναι 14 φορές ανθεκτικότερος σε εφελκυσμό από το ατσάλι. Μπορούμε να κατασκευάσουμε καλώδιο με τις ίδιες αντοχές; Τα ερωτήματα είναι πάρα πολλά και ίσως κάποιες απαντήσεις βρεθούν παρακάτω.

### A.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Συσχετισμός δομικών στοιχείων φύσης  
και αρχιτεκτονικής

Οι δυνάμεις πάνω σε κτηριακά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το μέγεθος, την κατεύθυνση και τον προορισμό τους.

Κατακόρυφα φορτία ως προς τη βαρύτητα είναι το ίδιο βάρος και τα κινητά βάρη όπως τα έπιπλα, οι η/μ εγκαταστάσεις, η βροχή, το χιόνι κ.ά.

Πλευρικά φορτία ασκούνται στα κτήρια από τον σεισμό, τον άνεμο (πίεση & υποπίεση), την υδροστατική πίεση, τις εκρήξεις κ.ά.

Τα ζητούμενα είναι: α) η ισορροπία των δυνάμεων κάτω από οποιαδήποτε πιθανή φόρτιση, β) η επαρκής αντοχή των στοιχείων της κατασκευής, γ) η επαρκής ακαμψία και δ) η γεωμετρική σταθερότητα.

Τα δομικά στοιχεία που φορτίζονται σε:

- α) εφελκυσμό είναι επαρκή
- β) θλίψη είναι λιγότερο επαρκή και
- γ) κάμψη είναι τα λιγότερο επαρκή.

Ο φέρων οργανισμός (Φ.Ο.) του κτηρίου ή ο σκελετός είναι για το κτήριο ό,τι είναι για τα έμβια όντα τα κόκαλα ή ο εξωσκελετός.

Ο Φ.Ο. εξασφαλίζει τη σταθερότητα της κατασκευής.

Η δομική μορφολογία, ως κλάδος, αναδύθηκε διαχρονικά ως η αισθητική της αρχιτεκτονικής του Φ.Ο. των κτηρίων. Οι Φ.Ο. των κτηρίων χαρακτηρίζονται από τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή όπως η πέτρα, το ξύλο, ο χάλυβας, το πλαστικό, το σκυρόδεμα, ο πάγος, η άμμος, το γυαλί, το χαρτί, το τούβλο, ο αέρας κ.ά. Οι γεωμετρικές μορφές των δομικών στοιχείων στους Φ.Ο. είναι συνήθως τα ευθύγραμμα στοιχεία (δοκοί, στύλοι, καλώδια), οι επιφάνειες (τοίχοι, πατώματα) και τα στερεά (κώνοι, τρούλοι, κελύφη κ.ά.).

Οι τρόποι ή οι μηχανισμοί αντιμετώπισης των φορτίων στους Φ.Ο. των κτηρίων είναι:

- α) Προσαρμογή ως προς τις δυνάμεις (Adjustment), Φ.Ο. με στατικά «ενεργές» μορφές (form active)
- β) Καταμερισμός των δυνάμεων (Dissection), Φ.Ο. με

διανυσματικά «ενεργά» δομικά στοιχεία (vector active)  
 γ) Περιορισμός των δυνάμεων (Confinement), Φ.Ο. με «ενεργά», σε τομή, δομικά στοιχεία (section active)  
 δ) Διασκεδασμός των δυνάμεων (Dispersion), Φ.Ο. με στατικά «ενεργές» επιφάνειες (surface active)  
 ε) Συλλογή και γείωση των δυνάμεων (Collection and grounding), Φ.Ο. με στατικά «ενεργό» ύψος (height active).

### A.1.1 Μονοδιάστατα δομικά στοιχεία

(Δοκοί, στύλοι, καλώδια)

Διανυσματικά – ενεργά δομικά στοιχεία (vector-active) είναι συμπαγή «ευθύγραμμα», «μονοδιάστατα» στοιχεία με μικρή διατομή σε σχέση με το μήκος τους που μεταφέρουν φορτία θλίψης και εφελκυσμού κατά το μήκος τους στις άκρες, όπως τα υποστυλώματα, τα δοκάρια, οι ράβδοι και τα καλώδια.

Οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στα μονοδιάστατα δομικά στοιχεία διαφέρουν ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους (οπλισμένο σκυρόδεμα, ξύλο, μέταλλο ή άλλο υλικό). Σημαντικό ρόλο παίζει η γεωμετρία της διατομής από απλά σχήματα όπως ο κύκλος, το τετράγωνο, το ορθογώνιο σε σύνθετες διατομές όπως το διπλό T, το T, το L, ο σταυρός κ.ά.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση των ευθύγραμμων δομικών στοιχείων με τα κόκαλα (εικ. A.1).

Το σχήμα της διατομής των δοκών έχει μεγάλη σημασία στην κατασκευή, όπως και στα οστά (εικ. A.2).

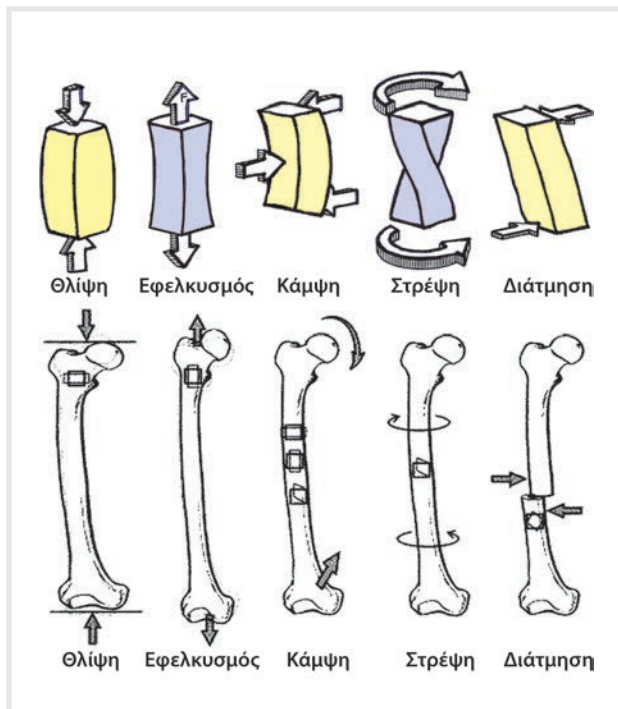
Το δοκάρι με ορθογωνική διατομή αντέχει σε κάμψη

περισσότερο από κυκλικό δοκάρι με ίδια επιφάνεια διατομής. Συγκρίνουμε τις γεωμετρίες της διατομής με το ίδιο δομικό υλικό, δηλαδή ξύλο με ξύλο ή σίδηρο με σίδηρο. Το δοκάρι με ορθογωνική διατομή, κατά πλάτος, αντέχει λιγότερο από το δοκάρι κυκλικής διατομής (εικ. A.3).

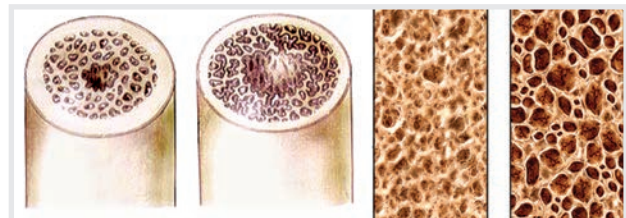
Τα δοκάρια σε φόρτιση κάμψης παραμορφώνονται. Η πάνω πλευρά της μεταλλικής δοκού διπλού T «θλίβεται», δηλαδή μικραίνει το μήκος της, και η κάτω πλευρά «εφελκύεται», δηλαδή μεγαλώνει το μήκος της. Αυτό μπορεί να συμβεί αν το υλικό της δοκού έχει τέτοιες ιδιότητες ελαστικότητας που να αντέχει αυτή την παραμόρφωση. Άλλα υλικά μπορεί να θρυμματιστούν όπως μία δοκός από μπετόν (εικ. A.4).

Η συνεργασία δοκού με καλώδιο είναι πολύ σημαντική στη συνθήκη σταθερότητας που απαιτείται στατικά. Η δοκός αντέχει σε θλίψη αλλά όχι σε κάμψη και εφελκυσμό και το καλώδιο αντέχει σε εφελκυσμό αλλά όχι σε κάμψη. Για την αύξηση της αντοχής σε λυγισμό, 3 καλώδια εφελκύνονται και συμπιέζουν με τρία δοκάρια κατά μήκος του στύλου σε τρία σημεία για τη μείωση του μήκους του στύλου και την εξουδετέρωση του λυγισμού. Μικρότερο μήκος στύλου σημαίνει και αύξηση της αντοχής σε κάμψη. Σε όποια κατεύθυνση προκύψει η φόρτιση, τα καλώδια δεν θα επιτρέψουν στον στύλο να καμφθεί, να λυγίσει (εικ. A.5).

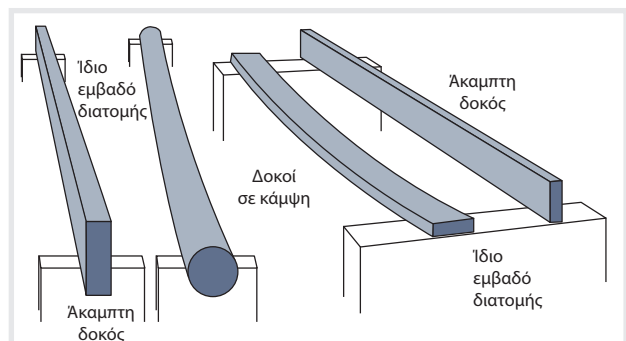
Η μεταφορά κατακόρυφων φορτίων σε στύλους, διαμορφώνει και το σχήμα τους. Η παλάμη και το πέλμα δείχνουν τη σταδιακή μεταφορά των φορτίων από τα



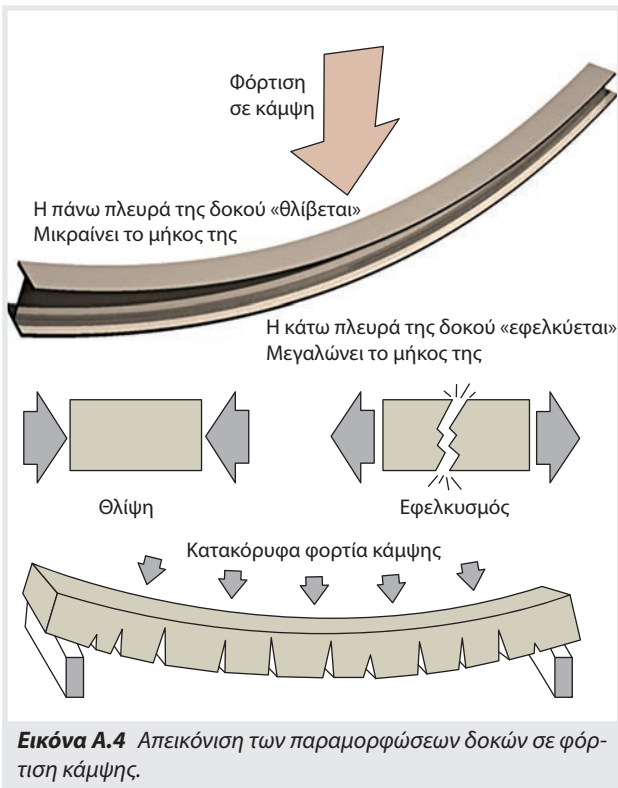
**Εικόνα A.1** Δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε ευθύγραμμα δομικά στοιχεία (δοκοί, στύλοι, καλώδια) και πάνω σε κόκαλα.



**Εικόνα A.2** Κόκαλο υγιές (γερό, πυκνό, συμπαγές οστό με πυκνό σπογγώδη ιστό χωροδικτύωμα) και με οστεοπόρωση (λεπτό, αδύνατο με λεπτές ή σπασμένες συνδέσεις).

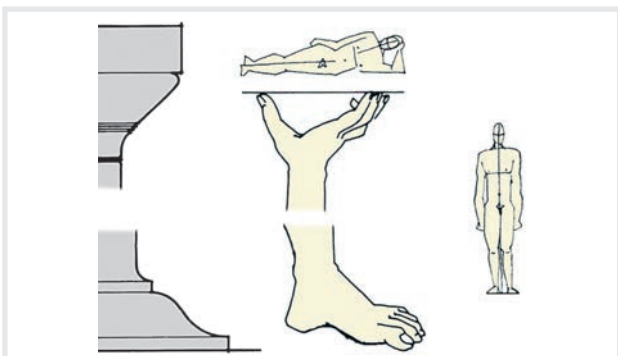


**Εικόνα A.3** Διάταξη του σχήματος της διατομής δοκού για αντοχή σε κάμψη. Δοκοί με ορθογωνική διατομή και δοκός κυκλικής διατομής (πηγή: Ζάννος, 1983).

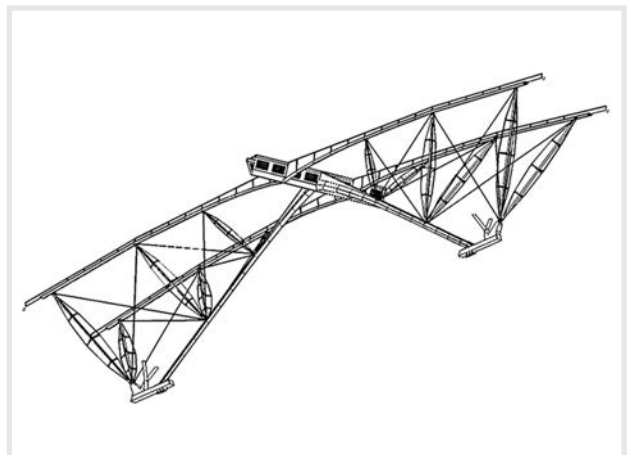


**Εικόνα A.4** Απεικόνιση των παραμορφώσεων δοκών σε φόρτιση κάμψης.

κόκαλα στα άκρα. Κάπως έτσι λειτουργεί και το κιονόκρανο και η βάση του στους αρχαίους κίονες (εικ. A.6). Προτεινόμενες λύσεις σε υποστυλώματα για την ομαλή μεταφορά φορτίων στην εικ. A.7.

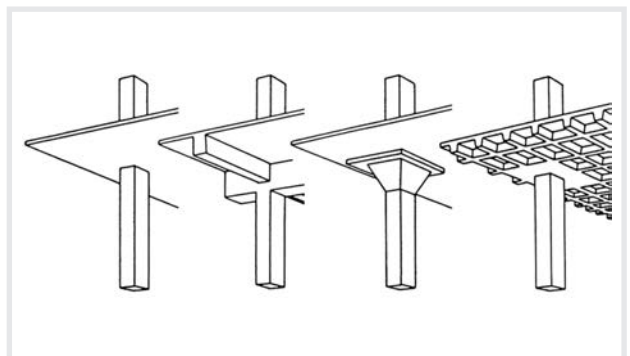


**Εικόνα A.6** Μεταφορά φορτίων σε κίονα. Το κιονόκρανο στηρίζει όπως τα δάχτυλα του χεριού (κατανομή σε 5 δάχτυλα) και η βάση πατάει όπως το πέδιλο και το πέλμα. Ξαπλωμένο αναπαύεται, ενώ ο σκελετός συνθλίβεται όταν ορθώνεται το άτομο (πηγή: Ζάννος, 1983).

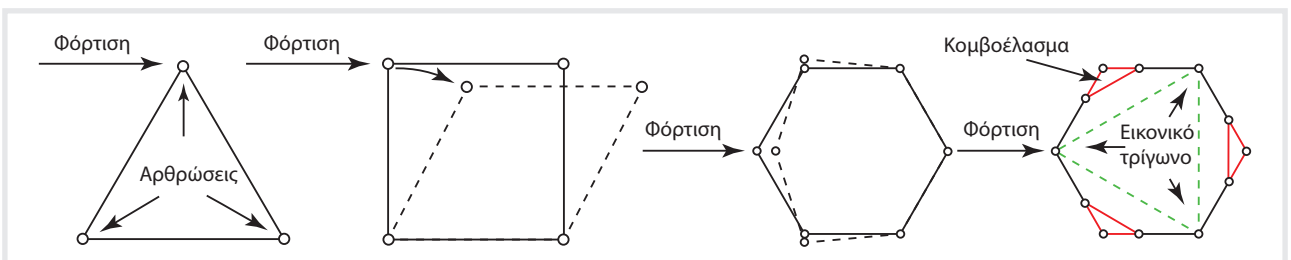


**Εικόνα A.5** 12 στύλοι-κοιλοδοκοί κυκλικής διατομής, ενισχυμένοι με τρία καλώδια έκαστος, δέχονται θλιπτικά φορτία ανάμεσα σε τρία τόξα. The Qingdaobei Station, Shandong, China, AREP Architect + MaP3 Structural Engineering (πηγή: ArchDaily).

Τα βασικά γεωμετρικά σχήματα συμπεριφέρονται στατικά, ανάλογα με το σχήμα τους. Το τρίγωνο εξασφαλίζει την ακαμψία και ορίζει το επίπεδο. Το τετράγωνο θεωρείται ασταθές αφού μπορεί να παραμορφωθεί σε ρόμβο (ομοεπίπεδη παραμόρφωση, εικ. A.8) ή σε υπερβολικό παραβολοειδές (από επίπεδο σε τρισδιάστατη επιφάνεια διπλής καμπυλότητας). Ο κύκλος παραμορφώνεται σε έλλειψη (ομοεπίπεδη) ή σε υπερβολικό παραβολοειδές (τρειςδιάστατη επιφάνεια).



**Εικόνα A.7** Ομαλή μεταφορά φορτίων: α) από πλάκα σε στύλο, β) από πλάκα σε στενόμακρο δοκό, σε στύλο, γ) από πλάκα σε κιονόκρανο, σε στύλο και δ) «καφασωτή» οροφή με μεγάλο πλάτος και πολλά μικρά δοκάρια για καλύτερη κατανομή των φορτίων (πηγή: Ramsey – Sleeper, 1989).



**Εικόνα A.8** Βασικά σχήματα με αρθρώσεις. Τρίγωνο – σταθερό, τετράγωνο – ασταθές παραμορφώνεται σε ρόμβο, εξαγώνο – ασταθές – συμπίεζεται, εξαγώνο με κομβοελάσματα σε τρεις γωνίες – σταθερό.

### A.1.2 Δισδιάστατα δομικά στοιχεία

(Ομοεπίπεδα τόξα, πλαίσια)

Τα τόξα είναι επίσης διανυσματικά – ενεργά δομικά στοιχεία, «μονοδιάστατα» και ομοεπίπεδα, δηλαδή μία επίπεδη επιφάνεια ακουμπά στο τόξο σε όλο το μήκος του. Τα τόξα έχουν σχήμα ημικύκλιου ή τμήματος κύκλου, παραβολής, έλλειψης ή σύνθεσης τμημάτων κύκλου (εικ. Α.9).

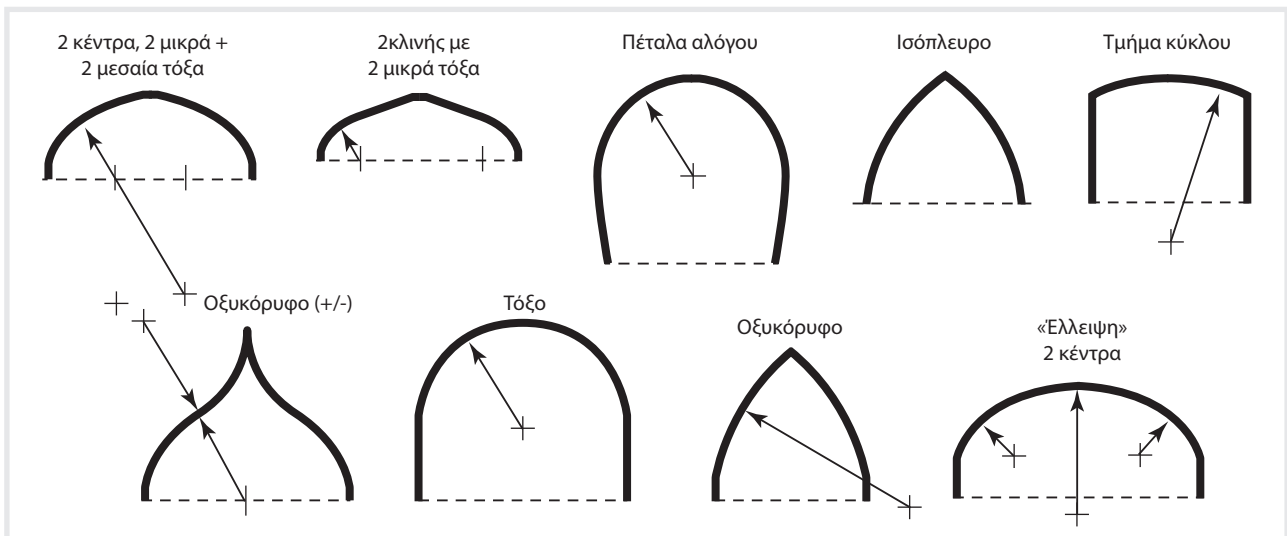
Τα φορτία που ασκούνται πάνω στα τόξα, συνήθως κατακόρυφα, όπως το ίδιο βάρος και η οροφή, διαπερνούν το τόξο κατά την περιμέτρό του και καταλήγουν στις δύο άκρες του τόξου προς το έδαφος ή προς τους στύλους ή προς τον τοίχο. Επειδή λόγω της φόρτισης το τόξο «μεγαλώνει» στη βάση του, τα φορτία κατευθύνονται λίγο διαγώνια σε σχέση με την κατακόρυφο. Το τόξο σε κατακόρυφη φόρτιση κάμψης «παραμορφώνεται».

Η πάνω πλευρά του τόξου «θλίβεται», δηλαδή μικραί-

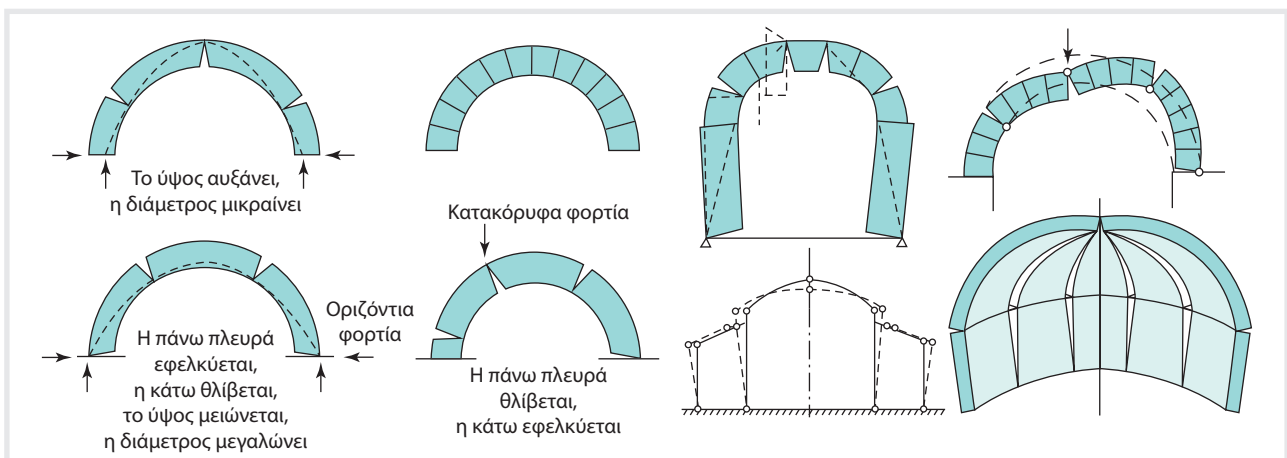
νει το μήκος της, και η κάτω πλευρά «εφελκύεται», δηλαδή μεγαλώνει το μήκος της πλευράς ή της περιμέτρου.

Αυτό μπορεί να συμβεί αν το υλικό της δοκού έχει τέτοιες ιδιότητες ελαστικότητας που να αντέχει αυτή την παραμόρφωση. Άλλα υλικά μπορεί να θρυμματιστούν. Το τόξο σε οριζόντια φόρτιση, όταν ασκούνται πλευρικά φορτία, «αυξάνει» το ύψος του με αντίστροφα αποτελέσματα, πάνω να εφελκύεται και κάτω να θλίβεται (εικ. Α.10).

Ο πύργος του Άιφελ στο Παρίσι έχει το σχήμα οξυκόρυφου «καμπυλωμένου» τόξου. Τα κατακόρυφα φορτία «μειώνουν» το ύψος με αποτέλεσμα οι δύο πλευρές του τόξου να «πλησιάζουν» και το οριζόντιο στατικό στοιχείο υπάρχει για να αντέξει τις θλιπτικές δυνάμεις (εικ. Α.11). Αν αναποδογυρίσουν τα τόξα κάθετα και οριζόντια δημιουργείται νέο σχήμα οξυκόρυφου «καμπουρωμένου» τόξου, το οποίο συμπεριφέρεται αντίστροφα στα κατακόρυφα φορτία που τείνουν να το

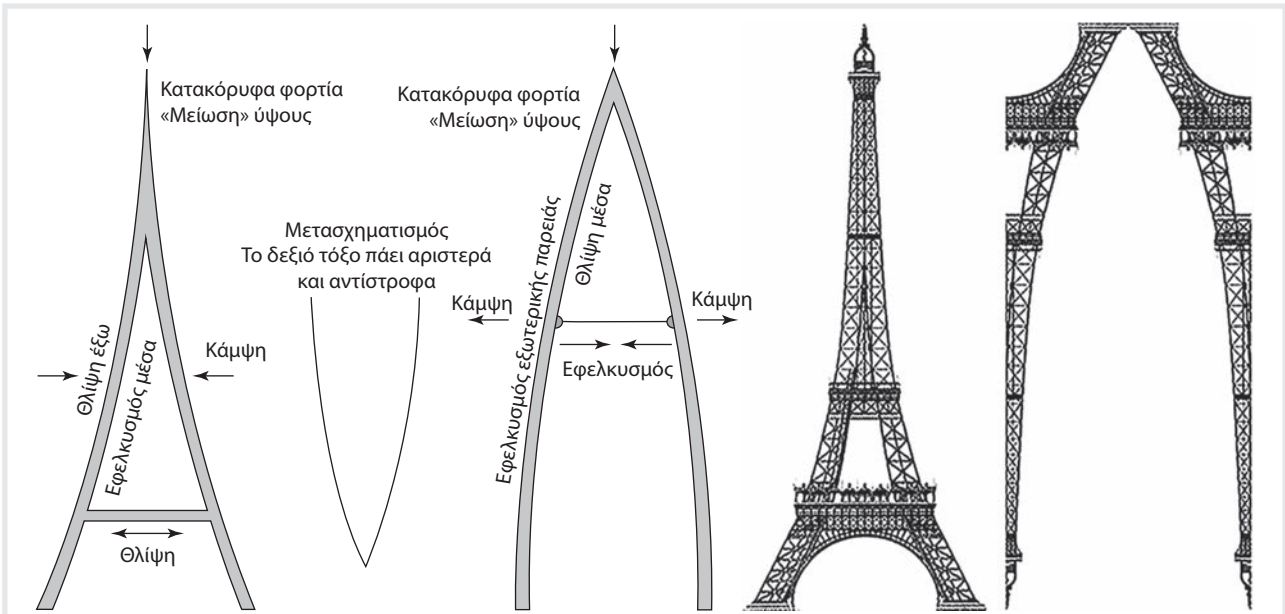


**Εικόνα Α.9** Βασικά γεωμετρικά σχήματα τόξων με 2 μικρά και 2 μεσαία τόξα, 2κλινή στέγη με 2 μικρά τόξα, τόξο πέταλου αλόγου, οξυκόρυφα ισόπλευρα τόξα με 2 κέντρα χάραξης κ.ά.



**Εικόνα Α.10** Παραμόρφωση «ολόσωμων» τόξων σε κατακόρυφη ή οριζόντια φόρτιση και τρούλων σε κατακόρυφη φόρτιση.





**Εικόνα A.11** Το «αντίστροφο» σχήμα του πύργου του Άιφελ στο Παρίσι. Από «καμπυλωμένο» σε «καμπουρωμένο» τόξο και από δοκό για τη θλίψη σε καλώδιο για τον εφελκυσμό.

«ανοίξουν» και έτσι το οριζόντιο στοιχείο χρειάζεται να αντέχει τις δυνάμεις εφελκυσμού.

Τα τόξα στη φύση έχουν εξελιχθεί ανάλογα με το περιβάλλον και τις χρήσεις που καλούνται να καλύψουν. Τα πλευρά στο στέρνο δεν κλείνουν μπροστά λόγω της αύξησης του όγκου των πνευμόνων στην αναπνοή. Τα τόξα είναι αρκετά για να αντέξουν. Στη σπονδυλική στήλη ενώνονται μέσω αρθρώσεων (εικ. A.12).

Το τοξωτό κέρατο της αντιλόπης. Στους καυγάδες για την κυριαρχία, τα κέρατα υπόκεινται σε συνεχή επιπόνηση. Ως κατασκευή σε πρόβολο, η διατομή μειώνεται προς την άκρη και η αντοχή του φορέα ενισχύεται με πολλές εγκάρσιες νευρώσεις (εικ. A.13).

Τα τόξα στα φτερά-μεμβράνες της νυχτερίδας είναι «ελαστικά» για να ανοιγοκλείνουν, οι φολίδες του παγκολίνου έχουν τη μορφή τόξων για να αντέχουν (οι γωνίες σπάνε πιο εύκολα), η τοξωτή μορφή του μυρμηγκοφάγου για να εισβάλλει στα λαγούμια της φωλιάς των μυρμηγκιών και τα ελικοκτώ τοξοειδή κέρατα για

να αντέχουν περισσότερο (εικ. A.14).

Οι προϊστορικοί χαυλιόδοντες του μαμούθ είναι εξαιρετικές κατασκευές γιατί ο σωλήνας είναι κούφιος και έτσι αντέχει σε φορτία, μικραίνει η διατομή του προς τα άκρα και ταυτόχρονα δημιουργεί τόξο το οποίο στρίβει κάπως και δεν είναι ομοεπίπεδο. Είναι επιφάνεια διπλής καμπυλότητας (στεφάνη διατομής και τόξο) και με μείωση προς τα άκρα και στρίψιμο από το επίπεδο. Ακόμη και με καλούπι είναι δύσκολο να κατασκευαστεί σήμερα (εικ. A.15).

Τα βαρίδια τεντώνουν το τοξωτό καλώδιο, το οποίο εφελκύει τα κτηριακά διάτρητα στοιχεία από γρανίτη, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις και σταθεροποιούνται. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα φορτία εφελκυσμού στα καλώδια «ισομοιράζονται» σε 13 σημεία του τόξου! Μοιάζει απίστευτο να μην υπάρχει σύνδεση ανάμεσα στα «τούβλα» από γρανίτη και η δύναμη από τα βαρίδια στις άκρες του τόξου να κρατάει μια τόσο μεγάλη κατασκευή σε σταθερότητα (εικ. A.16).



**Εικόνα A.12** Τα τόξα στα πλευρά του σκελετού ενός γορίλα και το παρεκκλήσι Farkasret Mortuary του Imre Makovecz, στη Βουδαπέστη, 1975. Σε πολλά έργα του, ο αρχιτέκτονας έδειξε τη σημασία της φύσης πάνω στις κατασκευές.

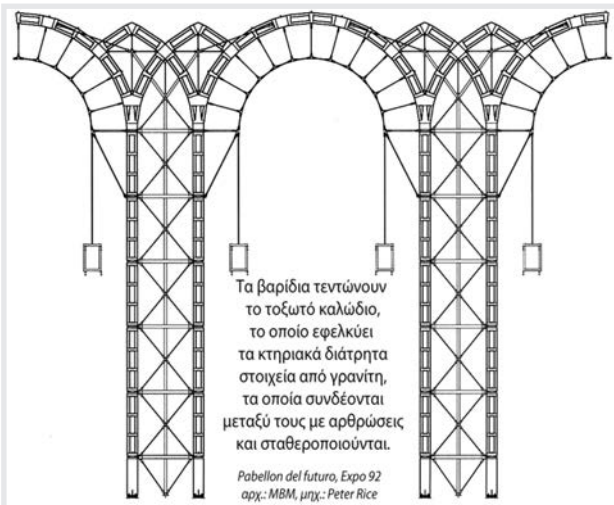


**Εικόνα A.13** Το τοξωτό «κωνικό» κέρατο της αντιλόπης με νευρώσεις. Stockley Park W2 Building, Peter Foggo. Το στέγαστρο με ενισχυμένα τόξα χρησιμοποιεί μορφή ζευκτών με οριζόντιες συνδέσεις για ενίσχυση και διάφορα μικρά διαγώνια στοιχεία για ενίσχυση του σκελετού σε ανεμοπιέσεις και άλλες επιπονήσεις του κτηρίου.

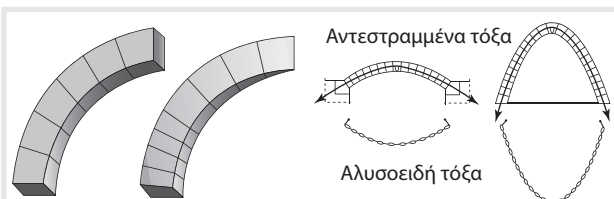


**Εικόνα Α.14** Τα τόξα στη μεμβράνη της νυχτερίδας, οι φολίδες στο παγκολίνο, η μουσούδα του μυρμηγκοφάγου και τα ελκωτά τόξα στο ζαρκάδι kudu (πηγή: Harter, 1979).

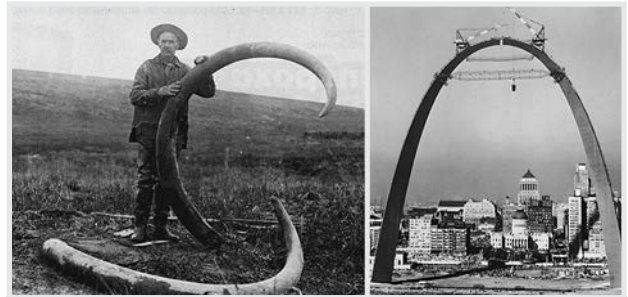
Το σχήμα του τόξου μπορεί να προκύψει πειραματικά αν αναρτηθούν βαρίδια σε ένα καλώδιο ή σε μία αλυσίδα ή σε ένα σχοινί (Roleni, 1747, τρούλος Αγίου Πέτρου της Ρώμης). Ο Roleni απέδειξε ότι το σχήμα που προκύπτει από αυτά τα πειράματα είναι παραβολή. Επομένως αν αναποδογυριστεί το σχήμα, τα φορτία θα κατανεμηθούν όπως πρέπει. Αργότερα, την ίδια μέθοδο χρησιμοποίησε ο Gaudí στους τρούλους της Sagrada Família. Από τότε θεωρείται ότι το «ιδανικό» σχήμα του



**Εικόνα Α.16** Περίπτερο του μέλλοντος – “Pabellon del futuro”, Expo 92, αρχ. MBM, μηχ. Peter Rice (ίσως ο σπουδαιότερος μηχανικός του 20<sup>ου</sup> αιώνα). Μοιάζει με παιχνίδι ισορροπίας αν σκεφτούμε ότι δεν συνδέονται οι γρανίτες μεταξύ τους με κόλλα ή κωνία.



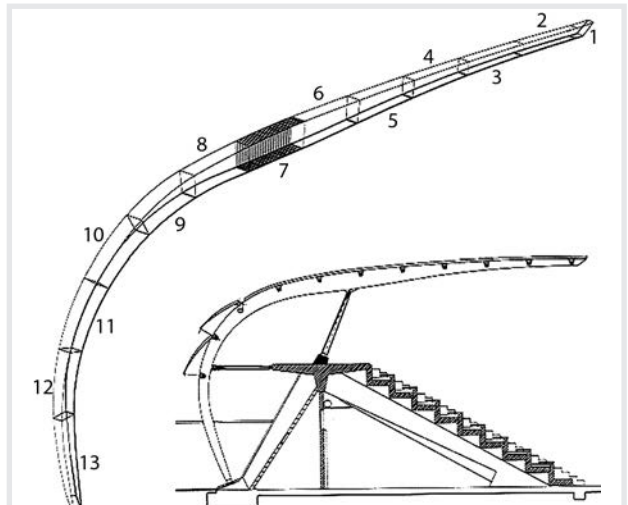
**Εικόνα Α.17** Μείωση της διατομής τόξου προς το κλειδί και αύξηση προς τη βάση του τόξου. Σχήμα παραβολής, τα αλυσοειδή τόξα και τα αντίστροφά τους.



**Εικόνα Α.15** Οι χαυλιόδοντες ενός προϊστορικού μαμούθ. Η κυψελωτή καμπύλη του τόξου εξασφαλίζει αντοχή, λόγω της επιφανείας διπλής καμπυλότητας. Η διατομή μειώνεται προς τις άκρες για να αντέχει περισσότερο και να έχει μεγαλύτερη διεισδυτικότητα. Το διπλό «παραβολικό» τόξο Gateway του Eero Saarinen, 1965, στο St. Louis, ως τοπόσημο.

τόξου είναι η παραβολή. Αυτό είναι ένα από τα βασικά παραδείγματα όπου η αρχιτεκτονική μορφή ακολουθεί τη στατική λειτουργία (εικ. Α.17).

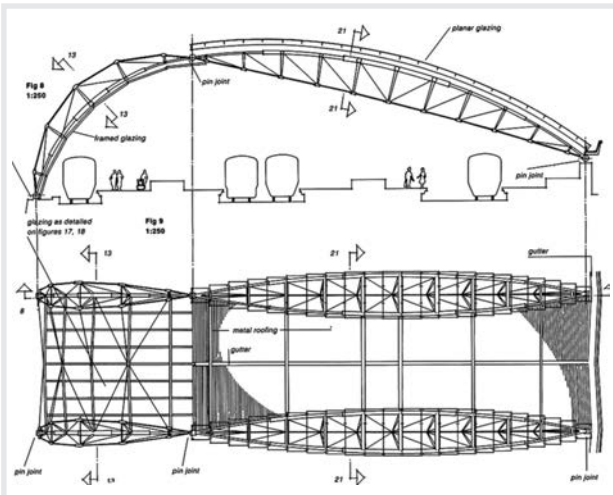
Η αρχιτεκτονική μορφή των τόξων ακολουθεί τη στατική λειτουργία τους, όπως η μεταβλητή διατομή που έχει προκύψει από υπολογισμούς (εικ. Α.18). Στο σημείο 7, όπου στηρίζεται το τόξο, λογικό είναι η διατομή να αυξάνει όπως και στις δύο άκρες που η διατομή μικραίνει.



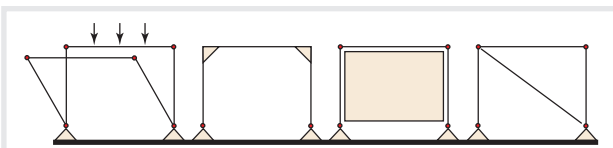
**Εικόνα Α.18** Montreuil Stadium, Marc Mimram, 1993. Μεταβλητή διατομή τόξου σε κοιλοδοκό που κατασκευάζεται από 13 διαφορετικά τμήματα. Η μορφή προκύπτει από τη στατική λειτουργία, όπως στα κόκαλα.

Το στέγαστρο του σιδηροδρομικού σταθμού Waterloo στο Λονδίνο, από τον Nicholas Grimshaw, 1993, στηρίζεται σε χωροδικτυωματικά τόξα με τρεις σωλήνες σε κάθε τόξο (οι κατακόρυφες τομές πάνω στο τόξο είναι τρίγωνα). Η γεωμετρία του σε όψη είναι δύο τόξα με διαφορετική καμπυλότητα που αλληλοτέμνονται έκκεντρα. Το τμήμα του στεγάστρου με το μεγαλύτερο άνοιγμα καλύπτεται με μέταλλο, ενώ τα στοιχεία που αποτελούν τη δομή του είναι τοποθετημένα προς το





**Εικόνα Α.19** Στέγαστρο σιδηροδρομικού σταθμού Waterloo στο Λονδίνο, Nicholas Grimshaw, 1993. Στην τομή, το καλώδιο, πάνω αριστερά και κάτω δεξιά, αναλαμβάνει τα φορτία εφελκυσμού ενώ το τόξο, κάτω αριστερά και πάνω δεξιά, αναλαμβάνει τις δυνάμεις θλίψης. Κάτω, τα δύο τόξα σε κάτοψη, αριστερά 2 καλώδια και μία σωλήνα και δεξιά 2 σωλήνες και ένα καλώδιο.



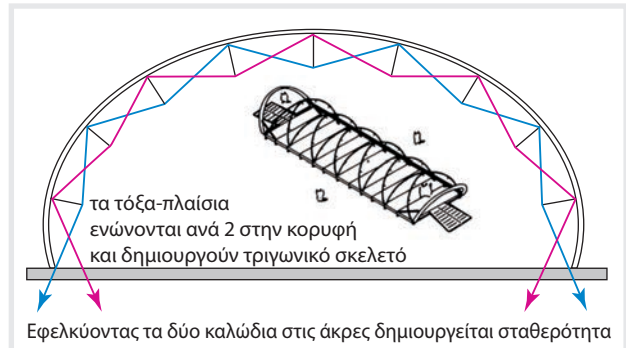
**Εικόνα Α.21** Ένα ορθογώνιο πλαίσιο που δέχεται πλευρικά φορτία, παραμορφώνεται σε πλάγιο παραλληλεπίπεδο. Μικρές γωνίες, όπως τα κομβοελάσματα, ή μία επιφάνεια ή μία διαγώνια σύνδεση μέσα στο πλαίσιο, το καθιστούν σταθερό σχήμα.

εσωτερικό της κατασκευής. Το μικρότερο τμήμα καλύπτεται με γυάλινα πετάσματα ενώ το μεταλλικό πλέγμα που τα στηρίζει είναι τοποθετημένο στην εξωτερική πλευρά της κατασκευής (εικ. Α.19).

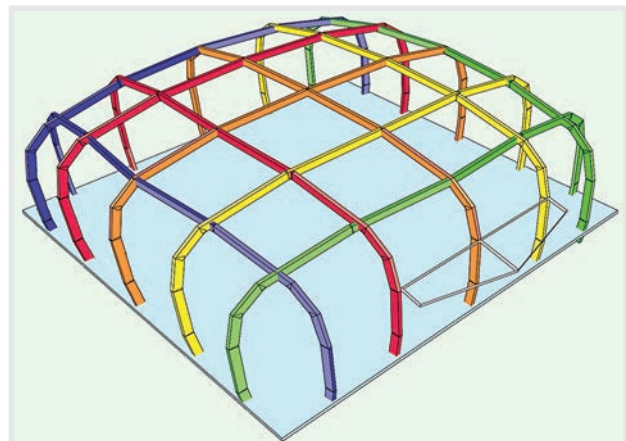
Τα τόξα της τέντας "MOMI", δεν είναι κατακόρυφα και συνδέονται ανά δύο στην κορυφή τους (εικ. Α.20). αξονομετρικό. Δημιουργείται έτσι ένα σταθερό στατικό «τρίγωνο» εξασφαλίζοντας αντοχή σε πλευρικά φορτία.

Τα πλαίσια παραμορφώνονται από διάφορες φορτίσεις, κατακόρυφες ή πλευρικές, από παραλληλεπίπεδα σε πλάγια, από τετράγωνα σε ρόμβους και από ομοεπίπεδα σε επιφάνειες διπλής καμπυλότητας, υπερβολικό παραβολοειδές. Για την εξασφάλιση της σταθερότητας ενός ορθογώνιου ή διαιρείται σε δύο τρίγωνα ή τοποθετείται στατικά ενεργή επιφάνεια ή ενισχύονται οι γωνίες (εικ. Α.21).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει στα σύγχρονα λογισμικά σχεδιασμού η εντολή extrude, δηλαδή η προβολή 2διάστατου σχεδίου σε 3διάστατο. Στην αρχή τα ονόμασαν εφαρμογές 2,5 διαστάσεων! Ένα παράδειγμα τετραγωνικού σχήματος κάτοψης μετασχηματίζεται σε κέλυφος καμπύλης επιφάνειας 2 διαστάσεων με τη χρήση 5+5 σειρών καμπυλόμορφων πλαισίων (εικ. Α.22).



**Εικόνα Α.20** Τέντα "MOMI", 1991. Αρχιτέκτονες: Future Systems, μηχανικός: Peter Rice. Το «ελλειπτικό» τόξο ενισχύεται με 9 ράβδους (ασκείται πίεση από μέσα προς τα έξω) οι οποίες συνδέονται με δύο καλώδια (ζιγκ-ζαγκ) δημιουργώντας συνθήκες σταθερότητας, ακαμψίας λόγω εφελκυσμού τους στις άκρες (tensegrity system).

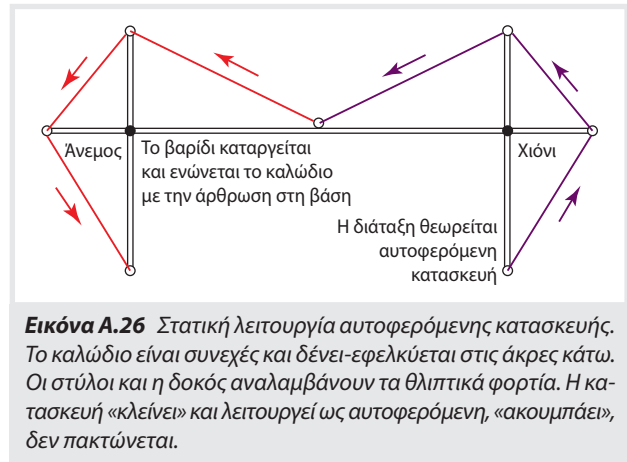
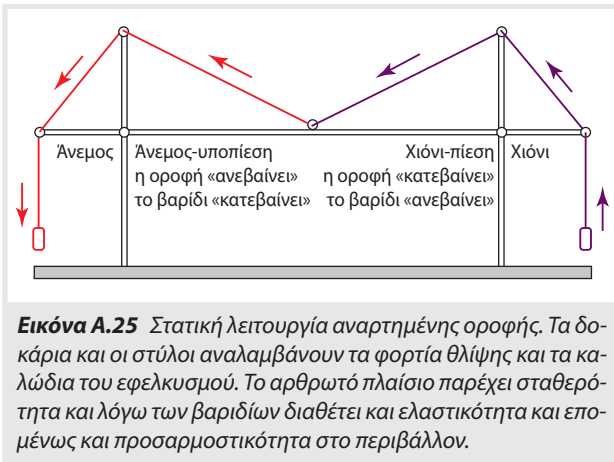
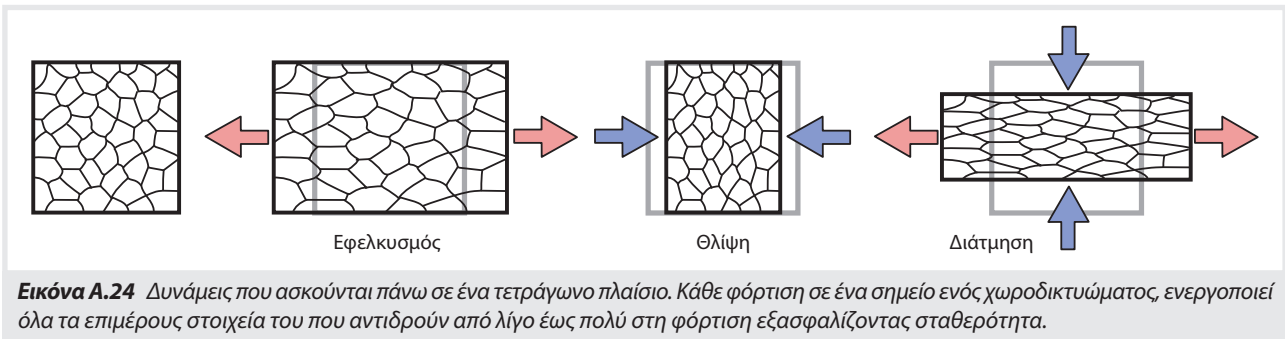
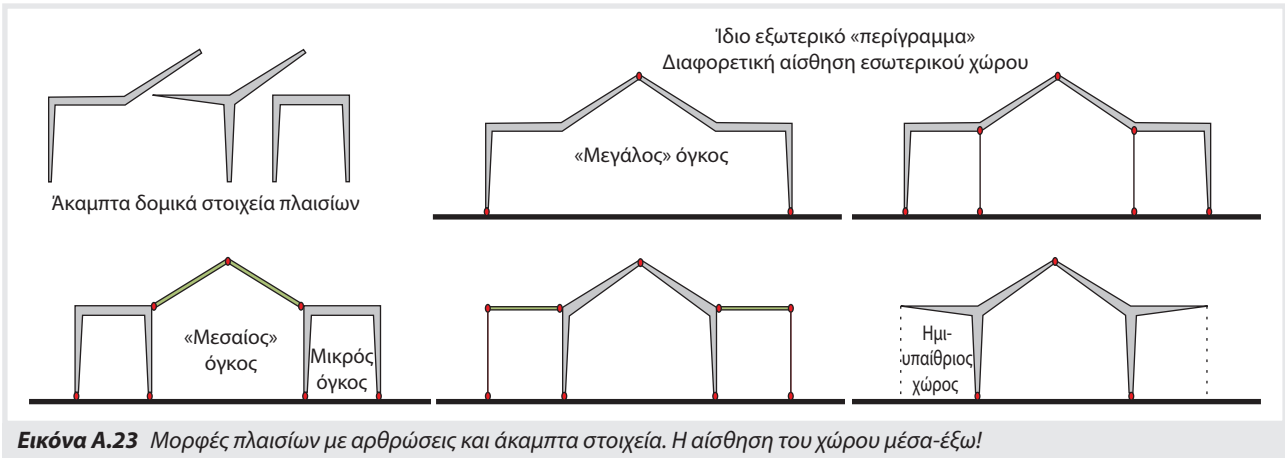


**Εικόνα Α.22** Πλαισιωτή «αυτοφερόμενη», «πλεγματική», «θολωτή» κατασκευή. Κάτοψη-κάναβος. Στην όψη, κάθε «καμπυλωμένο» τόξο αποτελείται από 12 ευθύγραμμα τμήματα-κόκαλα. Από τα 10 πλαίσια τα 2 πορτοκαλί είναι ίδια, τα 4 κίτρινα και κόκκινα ίδια και τα 4 πράσινα και μπλε ίδια.

Στην εικόνα Α.23, παρουσιάζονται μορφές πλαισίων με αρθρώσεις και άκαμπτα στοιχεία. Το πάνω πλαίσιο αποτελείται από 2 άκαμπτα τμήματα (γωνία και διαγώνιο δοκάρι) που έχουν αρθρώσεις. Μέση αριστερά, το ίδιο πλαίσιο με προσθήκη 2 στύλων στην εσωτερική γωνία. Μέση δεξιά, 2 άκαμπτα πλαίσια σχήματος Π και δύο διαγώνια δοκάρια με αρθρώσεις. Κάτω αριστερά 2 άκαμπτες αμβλείες γωνίες και 4 δοκάρια. Κάτω δεξιά, 2 άκαμπτα στοιχεία Υ. Όλα τα πλαίσια διαθέτουν αρθρώσεις μεταξύ τους καθώς και στην έδρασή τους.

Οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε ένα τετράγωνο πλαίσιο με εσωτερικό χωροδικτύωμα, μεταφέρουν την παραμόρφωση και στο εσωτερικό χωροδικτύωμά του (εικ. Α.24).

Σε μία αναρτημένη οροφή, αντίστοιχο μοντέλο αναρτημένης γέφυρας, οι υπερυψωμένοι στύλοι κρατούν από ψηλά την οροφή με καλώδια. Στην άκρη των καλωδίων αναρτώνται βαρίδια με ανάλογο βάρος, έτσι



ώστε να μην υποχωρεί η οροφή από το χιόνι και να μην υπερυψώνεται από την υποπίεση του αέρα (εικ. A.25). Αν το καλώδιο συνδεθεί στη βάση των στύλων, η κατασκευή μετατρέπεται σε αυτοφερόμενη (εικ. A.26).

Οι πλαισιωτές κατασκευές χρησιμοποιούν διάφορα υλικά στα δομικά τους στοιχεία αλλά και πολλές παραλλαγές γεωμετρίας κατασκευής. Ένα παράδειγμα με ξύλινα 2τοξα πλαίσια, σε κυκλική διάταξη που συνδέονται με εγκάρσια δοκάρια, παρουσιάζεται στην εικ. A.27. Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια η/υ.



**Εικόνα A.27** Rarapa, η πρώτη βιβλιοθήκη «δρόμου» στη Βάρνα Βουλγαρίας από νέους αρχιτέκτονες χρησιμοποιώντας εργαλεία παραμετρικού σχεδιασμού. Τα ομοεπίπεδα, καμπύλα, 2τοξα πλαίσια συνδέονται μεταξύ τους με μικρά δοκάρια (πηγή: inhabitat.com).



**A.1.3 Τρισδιάστατα δομικά στοιχεία**

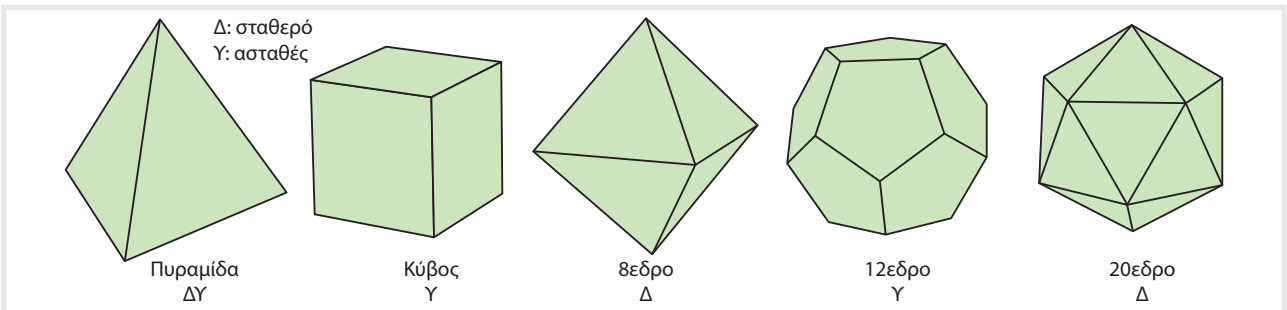
(Πολύεδρα, κώνοι, θόλοι, τρούλοι, επιφάνειες διπλής καμπυλότητας)

Τα Πλατωνικά στερεά πολύεδρα είναι 5, η πυραμίδα (4εδρο), ο κύβος (6εδρο), το 8εδρο, το 12εδρο και το 20εδρο (εικ. A.28). Τα μήκη των πλευρών τους είναι όλα ίσα, έτσι προκύπτουν από κανονικά σχήματα όπως το τρίγωνο, το τετράγωνο και το πεντάγωνο.

Πολλά άλλα πολύεδρα δημιουργούνται με περισσότερα από ένα σχήματα, όπως τρίγωνα και τετράγωνα ή 5γωνα με 6γωνα που δημιουργούν το κολοβό 20εδρο (12 πεντάγωνα & 20 εξαγωνα, εικ. A.29 & A.64). Η στατική λογική που τα διέπει είναι για τα στερεά πολύεδρα επιφάνεια «ενεργής» στατικά μορφής ενώ για τα πλεγματικά χωροδικτυωματικά πολύεδρα με ράβδους διανυσματικά «ενεργά» στατικά στοιχεία (εικ. A.63).

Το σχήμα του κώνου υπάρχει στη φύση σε διάφορες παραλλαγές που έχουν διαμορφωθεί λόγω των συνθηκών του περιβάλλοντος. Η συνηθέστερη περίπτωση είναι ο κώνος που διαθέτει στην επιφάνειά του ακτίνες προς τη βάση. Οι ακτίνες έχουν κάποια λειτουργία που συνδέεται με την επιβίωση. Η κατασκευή του καβουκιού της πεταλίδας έχει αξονικές πτυχώσεις-νευρώσεις του εξωσκελετού που εξασφαλίζουν ασφάλεια από θηρευτές και υπόγεια ρεύματα (εικ. A.30).

Όπως τα περισσότερα οστρακοειδή, η μέσα επιφάνεια είναι λεία, ως κέλυφος ζωής, ενώ η εξωτερική είναι αδρή για προστασία. Η μέδουσα διαθέτει επίσης στο κέλυφός της ραβδώσεις, νευρώσεις. Η αξονική διάταξη στα πλοκάμια του κοραλλιού, όπως και στο άνθος της πρωτέας, παρουσιάζει ομοιότητες με την κατασκευή μιας ξύλινης κωνικής στέγης με ακτινωτή διάταξη των δοκίδων (εικ. A.31, A.32).



**Εικόνα A.28** Η πυραμίδα, το 8εδρο και το 20εδρο θεωρούνται σταθερά ενώ τα υπόλοιπα ασταθή. Το Δ υπονοεί το τρίγωνο (σταθερότητα) και το Υ τις γωνίες στους κόμβους που είναι μεγαλύτερες από 90° (πηγή: Wester, 1984).



**Εικόνα A.29** Viking dome glamping (glamorous camping). Ο θόλος αποτελείται από τρίγωνα σε διάταξη κολοβού 20εδρου που διαθέτει 12 5εδρα και 20 βεδρα ή πολλαπλάσια του 20. Μέση διάμετρος 6 μ., μέσο ύψος 3,75 μ.



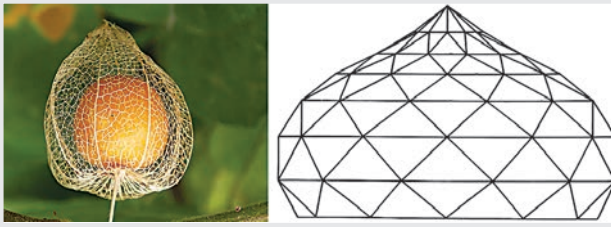
**Εικόνα A.30** Κωνικό καβούκι πεταλίδας με αξονικές πτυχώσεις (wikiwand). Η μέδουσα «πυξίδα» έχει στο κέλυφός της αξονικές ραβδώσεις, νευρώσεις (φωτ.: Paul Naylor).



**Εικόνα A.31** Η κωνική μορφή του κοραλλιού *Funaria scruposa* διαθέτει αξονική διάταξη στα πλοκάμια του (National Geographic), όπως και μία τυπική διάταξη ζευκτών ξύλινης κωνικής στέγης.



**Εικόνα A.32** Η κωνική μορφή της πρωτέας (άνθος *N. Αφρικής*) διαθέτει αξονική διάταξη των νευρώσεων (southafricanstory). Μία από τις διατάξεις κωνικής, ξύλινης στέγης των λουτρών (Imre Makovecz), ακολουθεί το δομικό σύστημα ακτίνων από κέντρο σε περιφέρεια με διαγώνιες συνδέσεις (φωτ.: Helen Betts).



**Εικόνα A.33** Κάλυκας αγριοκέρασου (*portulfruticola*). Κρεμμυδόσχημος τρούλος.

Ο κάλυκας του αγριοκέρασου έχει μορφή καμπυλωμένου κώνου, ο οποίος καμπουρώνει προς τη βάση και τον μίσχο. Οι νευρώσεις είναι αξονικές και οι μικρότερες εσωτερικές νευρώσεις μοιάζουν με ασύμμετρο πλέγμα (*portulfruticola*). Στον κρεμμυδόσχημο τρούλο, οι νευρώσεις είναι διαγώνιες, έτσι που διαμορφώνουν όλη την επιφάνεια με τρίγωνα. Αν ενωθούν οι κορυφές των τριγώνων, τότε «φαίνεται» η αξονική διάταξη από την κορυφή προς τη βάση. Η μία πλευρά των τριγώνων είναι οριζόντια, κάτι σαν ομόκεντροι «πολυγωνικοί» δακτύλιοι (εικ. A.33).

Τα αγκάθια του τριαντάφυλλου έχουν μορφή καμπυλωμένου κώνου με έκκεντρη κορυφή ως προς την ελλειπτική βάση. Η μορφή συναντάται συχνά στις εφυλικόμενες μεμβράνες όπως, για παράδειγμα, στον σταθμό του λιμανιού του Βανκούβερ (εικ. A.34).

Οι θόλοι, συνήθως ημικύλινδροι, είναι επιφάνειες με μονή καμπυλότητα, π.χ., ένα επίπεδο φύλλο δομικού υλικού που κάμπτεται από τις δύο άκρες και δημιουργεί

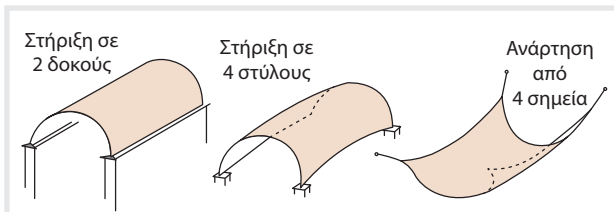


**Εικόνα A.34** Μορφή καμπυλωμένου κώνου με έκκεντρη κορυφή ως προς την ελλειπτική βάση στα αγκάθια του τριαντάφυλλου και στον σταθμό, στο λιμάνι του Βανκούβερ.

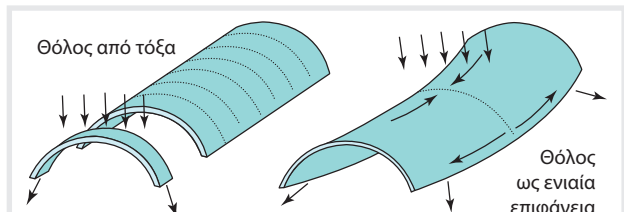
τμήμα κυλίνδρου (εικ. A.35 αριστερά), μπορεί να θεωρηθεί ως επιφάνεια που στηρίζεται σε τέσσερα σημεία, οπότε σχηματίζεται επιφάνεια διπλής καμπυλότητας που στηρίζεται σε τέσσερα τόξα, ή αλλιώς ένας όρθιος, «καμπουρωμένος» ημικύλινδρος (εικ. A.35 στη μέση), ή ένα «σεντόνι» αναρτημένο με καλώδια σαν αναποδογυρισμένος «καμπουρωμένος» θόλος (εικ. A.35 δεξιά).

Η παραμόρφωση του θόλου αλλάζει αν θεωρηθεί αποτέλεσμα πολλών τόξων δίπλα-δίπλα (διανυσματικά ενεργά στατικά τόξα, εικ. A.36 αριστερά), ή αν θεωρηθεί αποτέλεσμα παραμόρφωσης επιφάνειας διπλής καμπυλότητας (ενεργή, στατικά, επιφάνεια, εικ. A.36 δεξιά).

Τα οστά έχουν συνήθως εξωτερικό σκληρό κόκαλο και μέσα βρίσκεται ο σπογγώδης ιστός όπως στην εικ. A.2. Ο σκαντζόχοιρος έχει αναπτύξει οστά με κυψέλες, σαν να υπάρχει δεύτερο κόκαλο μέσα στο κόκαλο για να αντέχει σε απειλή όταν κουλουριάζει το σώμα του και σαν μπάλα κατηφορίζει για να γλιτώσει πέφτοντας σε διάφορα εμπόδια (εικ. A.37).



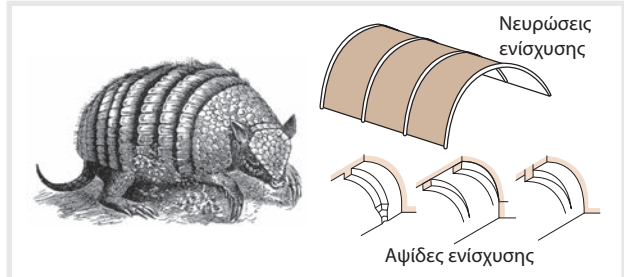
**Εικόνα A.35** Στήριξη καμάρας σε πλευρικά δοκάρια (θόλος) ή σε 4 σημεία έδρασης (επιφάνεια διπλής καμπυλότητας) ή αναρτημένη από 4 σημεία (μεμβράνη) (πηγή: Ζάννος, 1983).



**Εικόνα A.36** Στατική λειτουργία θόλου με πολλά τόξα, διανυσματικά ενεργά στατικά στοιχεία ή ενεργή, στατικά, επιφάνεια που παραμορφώνεται προς δύο κατευθύνσεις σε σχήμα σέλας (πηγή: Ζάννος, 1983).

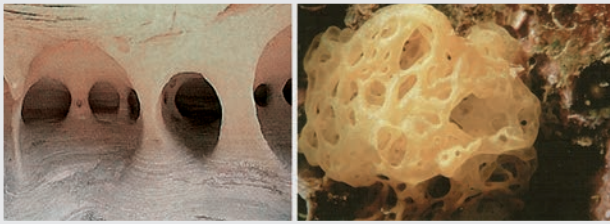


**Εικόνα A.37** Η κυψελωτή δομή της σπονδυλικής στήλης σκαντζόχοιρου χαρίζει αντοχή στις πλευρικές δυνάμεις 3 φορές ανώτερη από έναν κοίλο κύλινδρο και διπλασιάζει την ανθεκτικότητά του σε θλιπτικές τάσεις. Ρουλεμάν με μπίλιες.



**Εικόνα A.38** Αρμαντίλο με 9 ζώνες στο καβούκι του. Τα λεπτά κυλινδρικά πλαστικά ή μεταλλικά φύλλα ενισχύονται με νευρώσεις επιφάνειας. Στους Ρωμαϊκούς ναούς, οι θόλοι διαθέτουν αψίδες για την επιπλέον ενίσχυση στα φορτία.



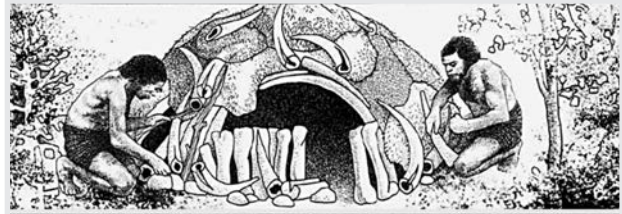


**Εικόνα A.39** Σπηλιές, ο εσωτερικός χώρος της σφαίρας. Κυψελοειδής αποσάθρωση στον ψαμίτη λόγω κρυστάλλωσης και ανέμου (Λεξικό της Γης). Σπόγγος, ασπόνδυλο που προσροφά νερό μέσα από τα χοανοκύτταρα και το αποβάλλει από το στομάτιο, έχοντας κατακρατήσει την τροφή (πηγή: περιοδικό Experiment).

Ο αρμαντίλο, όπως και άλλα ζώα που διαθέτουν εξωσκελετό, χρησιμοποιεί την πανοπλία του για προστασία (εικ. A.38). Η ενίσχυση της πανοπλίας-θόλου επιτυγχάνεται στις ζώνες που διαθέτει το καβούκι του, όπως και οι αψίδες στους Ρωμαϊκούς θόλους.

Οι πρώτες προσπάθειες κατασκευής καλύβας θυμίζουν έναν σπόγγο ή τη σπηλιά που είναι κάτι σαν εσωτερικό ενός τρούλου, όπως η προϊστορική καλύβα και το ιγκλού στους πάγους (εικ. A.39, A.40).

Οι τρούλοι, ημισφαίρια, κατασκευάζονται με διάφορους τρόπους. Ο βασικότερος τρόπος είναι η σφαίρα της γης με τους μεσημβρινούς και τους παράλληλους με τον ισημερινό στη μέση. Οι κατακόρυφοι άξονες ξεκινούν και καταλήγουν στον βόρειο και νότιο πόλο (εικ. A.41, εικ. A.42). Οι οριζόντιοι είναι οι παράλληλοι. Παραλλαγές αυτών των γεωμετρικών χαράξεων είναι το «ξάπλωμα» του ημισφαιρίου και η χάραξη με



**Εικόνα A.40** Ο προϊστορικός άνθρωπος κατασκευάζει με κόκαλα και δέρματα την καλύβα του σε σχήμα τρούλου όπως ακριβώς και οι άνθρωποι των πάγων που κατασκευάζουν τα ιγκλού τους από πάγο.

παράλληλους και διαγώνιους άξονες που δημιουργούν τρίγωνα ή καμπύλες ακτίνες που ξεκινούν από τον βόρειο πόλο και καταλήγουν στον ισημερινό (εικ. A.43 μέση και δεξιά).

Η μέδουσα και ο πρώτος φουσκωτός τρούλος το 1948 με διάμετρο 15 μ. έχουν την ίδια κατασκευαστική λογική, δηλαδή τους μεσημβρινούς. Η ίδια τριγωνική, «καμπουρωμένη», λουρίδα-πατρόν κόβεται και ράβεται όσες φορές χρειάζεται να «κλείσει» ο κύκλος, π.χ., στη



**Εικόνα A.41** Κατασκευή τρούλου, αφρικανική καλύβα, από καλάμια, με παράλληλους και μεσημβρινούς. Οι Auguste Piccard & Paul Kipfer με αυτοσχεδιαζόμενα κράνη το 1930, crashtest!

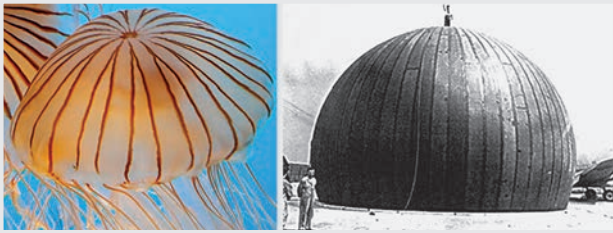


**Εικόνα A.42** Κατασκευή σφαίρας, το καύκαλο του αχίνου «εχίνος» με μεσημβρινούς (Maruska Rajmonova) και το Ball House, Δρέσδη, 1928, αρχ. Peter Birch Wood (1876-1961) που κατεδαφίστηκε από τους Ναζί ως αιρετικό κατασκεύασμα!



**Εικόνα A.43** Κατασκευή τρούλου. Μεσημβρινοί και παράλληλοι, το ημισφαίριο «ξάπλωμένο» στο πλάι με τους παράλληλους να είναι κάθετοι προς το έδαφος και ημισφαίριο με παράλληλους και διαγώνιες συνδέσεις που διαμορφώνονται με τρίγωνα.



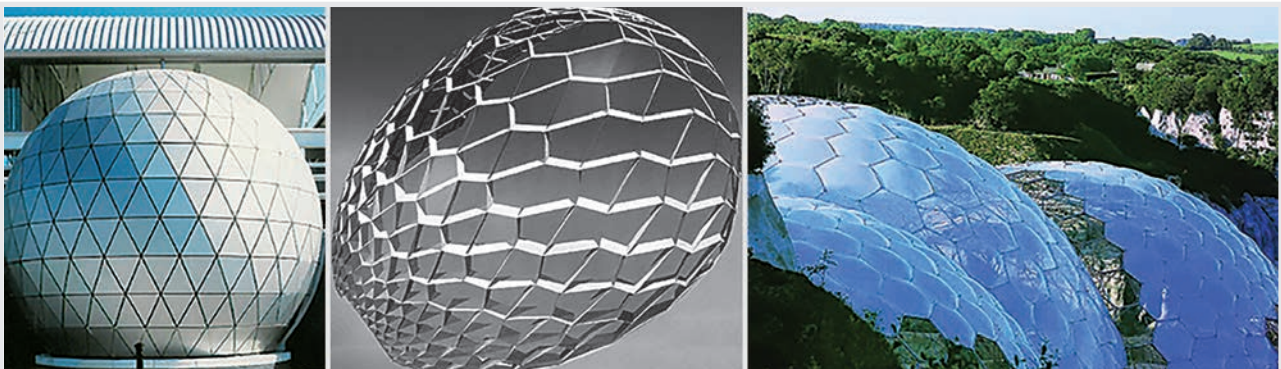


**Εικόνα Α.44** Η μέδουσα και ο πρώτος φουσκωτός τρούλος το 1948 με διάμετρο 15 μ., έχουν την ίδια κατασκευαστική λογική, δηλαδή τους μεσημβρινούς.

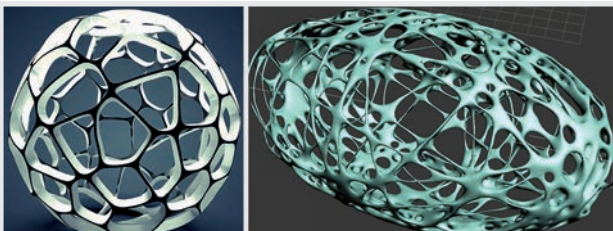
σκωτού προκύπτει από τη διαφορά ατμοσφαιρικής πίεσης έξω και μέσα. Οι «ντούγιες», ξύλινοι φλοιοί στα ηχεία των παραδοσιακών χορδόφωννων μουσικών οργάνων, κάμπτονται σε φλόγιστρα, ακουμπάνε στο καλούπι και αν έχουν καμφθεί σωστά, τις κολλάνε μεταξύ τους και μαζί με το καπάκι δημιουργούν τα ηχεία των έγχορδων μουσικών οργάνων όπως το ούτι, τα μπουζούκια, το λαούτο κ.ά. Όσο περισσότερες είναι οι ντούγιες, τόσο καλύτερο ήχο παράγουν (εικ. Α.45).



**Εικόνα Α.45** Κατασκευή λαούτου με λουρίδες, «ντούγιες» πάνω σε μοντέλα-καλούπια.



**Εικόνα Α.46** Κατασκευή σφαιρας και τρούλου. Παράλληλοι με τρίγωνα, τυχαία πολύεδρα (voronoi pattern) ελλειψοειδούς και γεωδαιτικός θόλος που βασίζεται στο κολοβό 20εδρο ή 32εδρο, eden project, Nicholas Grimshaw.



**Εικόνα Α.47** Τρισδιάστατη σφαίρα (ψηφιακή τέχνη) με voronoi pattern του bschauer (πηγή: deviantart.com) και ελλειψοειδές με τυχαίες περιμέτρους και παραμετρικό λογισμικό grasshopper σε λογική οστών, bone structure (πηγή: formpig.com).

φωτογραφία είναι πάνω από 30 λουρίδες στη μέδουσα και πάνω από 50 λουρίδες στο φουσκωτό. Η σύνδεση των λουρίδων μεταξύ τους (ράψιμο, κόλλημα), μοιάζει να είναι κάτι σαν στατικά στοιχεία ενίσχυσης, κάτι σαν καμπύλα στατικά τόξα (εικ. Α.44). Το σχήμα του φου-

Άλλες κατασκευαστικές χαράξεις για τους τρούλους είναι τα τρίγωνα, οι γεωδαιτικοί θόλοι και άλλα κανονικά ή ακανόνιστα σχήματα ή πολύγωνα που «ενσωματώνονται» σε ένα ημισφαίριο. Τρούλοι με κανονικά πολύγωνα χρησιμοποιούν συμμετρικά σχήματα και τρούλοι με ακανόνιστα σχήματα χρησιμοποιούν μοτίβα voronoi ή καμπύλα σχήματα λογικής οστών (εικ. Α.46, Α.47).

Οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε ένα ημισφαίριο είναι δύο ειδών: κατά τον κατακόρυφο άξονα, όπως είναι οι μεσημβρινοί της γης, και κατά τον οριζόντιο άξονα, οι δακτύλιοι, όπως είναι οι παράλληλοι της γης. Τα κατακόρυφα φορτία που ασκούνται πάνω σε τρούλο είναι το ίδιο βάρος και το περιβάλλον (άνεμος, βροχή, χιόνι). Σε φόρτιση του τρούλου, η στεφάνη «τείνει» να μεγαλώσει την περίμετρό της, οπότε δημιουργούνται ρωγμές με αποτέλεσμα την κατάρρευση (εικ. Α.48 αρι-