

ΧΩΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ – ΕΙΣΒΟΛΗ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Δρ ΔΗΜΗΤΡΑ ΤΖΟΥΡΜΑΚΛΙΩΤΟΥ

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι αρχιτέκτονες μηχανικοί και οι πολιτικοί μηχανικοί οδηγούνται ασυναίσθητα προς τον κόσμο των δύο διαστάσεων – τον «πανταχού παρόντα» στο σχέδιο και τη δημιουργία και τον «ειδικό» στην ανάλυση κατασκευών δύο διαστάσεων. Ενώ ακόμα και οι καλύτεροι αρχιτέκτονες πάντα εκμεταλλεύονται τον κόσμο των τριών διαστάσεων, η πλειοψηφία των κατασκευαστικών προβλημάτων και των καταρρεύσεων έχουν εμφανιστεί όταν οι μηχανικοί απέτυχαν να σκεφτούν στις τρεις διαστάσεις.

Οι κατασκευές στο χώρο υποκινούν και προκαλούν τη φαντασία και τη διάνοια των μηχανικών αναγκάζοντάς τους να απέχουν από την άνετη αλλά συχνά θαμνή οικειότητα που τους προσφέρει ο κόσμος των δύο διαστάσεων. Ενθαρρύνουν τους μηχανικούς να συλλαμβάνουν τις κατασκευές σε τρεις διαστάσεις και να χρησιμοποιούν τις δύο μόνο όταν είναι απαραίτητο και βολικό, από το να χρησιμοποιούν την αντίθετη πορεία. Σε έναν κόσμο όπου οι δομές και οι δυνάμεις αλληλεπιδρούν τόσο έντονα, η κατασκευή στο χώρο αναγκάζει τους αρχιτέκτονες μηχανικούς να εισβάλουν στον κόσμο της στατικής, και τους πολιτικούς μηχανικούς στον κόσμο της γεωμετρίας.

Η παρούσα εργασία δίνει έμφαση στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δικτυωτών χωροκατασκευών και πιο συγκεκριμένα στις ομάδες των πλεγμάτων (grids), των κυλινδρικών χωροκατασκευών (barrel vaults) και των θολωτών χωροκατασκευών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι νέες κατασκευαστικές τεχνικές και τα νέα δομικά υλικά, σε συνδυασμό με τη βιομηχανική και τεχνολογική εξέλιξη της νέας δεκαετίας, είχαν μεγάλη επιρροή στη σύγχρονη αρχιτεκτονική.

Μια από τις πιο ορατές αλλαγές είναι η μεγάλη τάση που παρατηρείται στη χρήση των χωροδικτυωμάτων. Η τάση αυτή αναπτύχθηκε χάριν αρχιτεκτονικών προτιμήσεων ενάντια στα καθιερωμένα συστήματα των ' 'δοκών-υποστυλωμάτων' ' των προηγούμενων δεκαετιών, αλλά και εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν. Οι δομοστατικοί μηχανικοί συνειδητοποίησαν εδώ και χρόνια πως τα χωροδικτυώματα απαιτούν πολύ λιγότερα υλικά από τα συμβατά γραμμικά συστήματα και πως αν σχεδιαστούν σωστά είναι αρκετά οικονομικότερα.

Για να βελτιωθεί η γνώση των τελευταίων εξελίξεων σε οποιοδήποτε ερευνητικό πεδίο είναι ωφέλιμο, αν όχι απολύτως απαραίτητο να εκτιμηθεί η ιστορική του εξέλιξη. Η ιστορία (ή η μελέτη όσων έχουν προηγηθεί). Καθώς οι χωροκατασκευές είναι, σε πολλές περιπτώσεις, σχετικά νέες προσθήκες στο κατασκευαστικό λεξιλόγιο των αρχιτεκτόνων και των πολιτικών μηχανικών, η μελέτη της εξέλιξής τους είναι πιο σημαντική, αλλά λιγότερο εμπεριστατωμένη. Πολλές από αυτές τις εξελίξεις έχουν λάβει χώρα κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων αιώνων (οφειλόμενες στην εισαγωγή νέων υλικών και στην εμφάνιση καινοτόμων κατασκευαστικών συστημάτων με σκοπό την πλήρη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων τους) και οι περισσότερες από αυτές είναι ακόμη σε εξέλιξη. Αν και το πληροφοριακό υλικό που είναι διαθέσιμο για τις χωροκατασκευές είναι πολύ, δεν είναι τόσο εκτεταμένο ή λεπτομερές όσο είναι για τις συμβατικές κατασκευές.

2. ΓΕΝΙΚΑ

Ο όρος χωροδικτυώματα αναφέρεται σε ένα δομικό σύστημα στο οποίο ο μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων αποτελείται από τρεις διαστάσεις. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις ' 'επίπεδες κατασκευές, όπως ένα σχέδιο ζευκτού (plan truss), που αφορά κυρίως δύο δι-

αστάσεις. Προκειμένου να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι, στην περίπτωση των επίπεδων κατασκευών οι εξωτερικές φορτίσεις όπως και οι εσωτερικές δυνάμεις είναι στο ίδιο επίπεδο. Αυτό είναι το επίπεδο που επίσης περιέχει την ίδια την κατασκευή, τόσο στην αρχική αφόρτιστη κατάσταση, όσο και στην παραμορφωμένη φορτισμένη κατάσταση. Στην περίπτωση του χωροδικτυώματος, ο συνδυασμός του σχηματισμού εξωτερικές φορτίσεις, εσωτερικές δυνάμεις και μετατοπίσεις της κατασκευής εκτείνεται πέραν ενός μεμονωμένου επιπέδου.

Ο παραπάνω ορισμός είναι ο ' 'επίσημος' ' ορισμός ενός χωροδικτυώματος. Παρ' όλα αυτά, στην πράξη, ο όρος χωροδικτυώματα χρησιμοποιείται απλά όταν αναφερόμαστε σε έναν αριθμό από οικογένειες κατασκευών, όπως είναι τα επίπεδα χωροδικτυώματα, τα κυλινδρικά, οι θόλοι, οι πύργοι, τα καλωδιωτά (cable net), οι μεμβράνες, τα πτυχωτά συστήματα (foldable systems) και οι εφελκυσόμενες κατασκευές. Τα χωροδικτυώματα καλύπτουν μια τεράστια ποικιλία σχημάτων και κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως το ατσάλι, το αλουμίνιο, το ξύλο, το σκυρόδεμα, σύνθετα ινοπλισμένα, γυαλί ή συνδυασμό των παραπάνω. Η χρήση τους είναι ευρύτατη για την κατασκευή αθλητικών σταδίων, γυμναστηρίων, πολιτιστικών κέντρων, αιθουσών θεάτρου, εμπορικών κέντρων, σιδηροδρομικών ή άλλων σταθμών, υπόστεγων αεροσκαφών, κέντρων αναψυχής κ.α.

Οι χωροκατασκευές καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος μορφών και κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά, όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο, το ξύλο, το σκυρόδεμα, τα σύνθετα υλικά με ίνες, το γυαλί, ή ένα συνδυασμό των παραπάνω. Οι χωροκατασκευές κατασκευάζονται συνδέοντας αξονικά σωληνοειδή δοκάρια, χρησιμοποιώντας σφαιρικούς κόμβους. Τα συστήματα αυτά μεταφέρουν τα φορτία αποκλειστικά μέσω αξονικών δυνάμεων. Κωνικά τμήματα συγκολλούνται στα σωληνοειδή δοκάρια τα οποία κατόπιν συνδέονται μέσω των σφαιρικών κόμβων.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των χωροκατασκευών περιγράφονται παρακάτω:

- Επειδή οι χωροκατασκευές είναι τρισδιάστατες κατασκευές, οι οποίες λειτουργούν σε δύο διευθύνσεις, αποτελούν μια πολύ οικονομική λύση για την κάλυψη μεγάλων ανοιγμάτων.
- Δίνουν τη δυνατότητα κάλυψης ανοιγμάτων ως και 100m χωρίς τη χρήση ενδιάμεσων στύλων.

- Παρέχουν μεγάλη ευελιξία στην επιλογή των σημείων στηρίξεων και επιτρέπουν την εφαρμογή διαφορετικών γεωμετρικών σχημάτων και εμβαδών.
- Η διαδικασία σχεδιασμού, κατασκευής και τοποθέτησης μπορεί να ολοκληρωθεί σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, λόγω της χρήσης προκατασκευασμένων μελών. Ακριβώς για τον ίδιο λόγο είναι εύκολη η μεταφορά των μελών και η τοποθέτηση της κατασκευής σε σημεία μακριά από τον τόπο παραγωγής της.
- Οι χωροκατασκευές είναι ελαφρύτερες από τις αντίστοιχες κατασκευές με κοινό χάλυβα ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό, πέρα της οικονομίας σε υλικό, έχουμε και οικονομία από τη χρήση θεμελιώσεων μικρότερων διαστάσεων.
- Επίσης, λόγω του μικρού βάρους τους, οι χωροκατασκευές έχουν άριστη συμπεριφορά σε περίπτωση σεισμού.
- Δεν είναι απαραίτητη η κάλυψη του κάτω μέρους της οροφής, μιας και αποτελούν κατασκευές υψηλής αισθητικής.
- Δεν απαιτούνται επιπλέον κατασκευές για τη στήριξη του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- Λόγω της υψηλής αισθητικής τους, οι χωροκατασκευές είναι ιδανικές για συστήματα φεγγιτών με επικάλυψη γυαλιού ή πολυκαρβονικών φύλλων.
- Παρέχουν διάφορες εναλλακτικές αρχιτεκτονικές λύσεις για σύνθετα γεωμετρικά σχήματα.

Τα χωροδικτυώματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες ονομαστικά:

- Στα δικτυωτά χωροδικτυώματα (lattice space structures) που αποτελούνται από ασυνεχή επιμήκη στοιχεία.
- Στα συνεχή χωροδικτυώματα (continuous space structures) που αποτελούνται από επί μέρους στοιχεία όπως οι πλάκες, τα κελιά και οι μεμβράνες και
- Στα διμορφικά χωροδικτυώματα (biform space structures) που αποτελούνται από συνδυασμό των συνεχών και ασυνεχών στοιχείων.

Μπορούμε, επίσης, να τα διακρίνουμε σε τρεις μεγάλες οικογένειες:

- Στην πρώτη οικογένεια ανήκουν τα χωρικά δικτυώματα που περιλαμβάνουν τα δικτυώματα μιας στρώσης, διπλής ή πολλαπλής στρώσης και χρησιμοποιούνται με τη μορφή

καννάβων, θόλων ή κυλίνδρων.

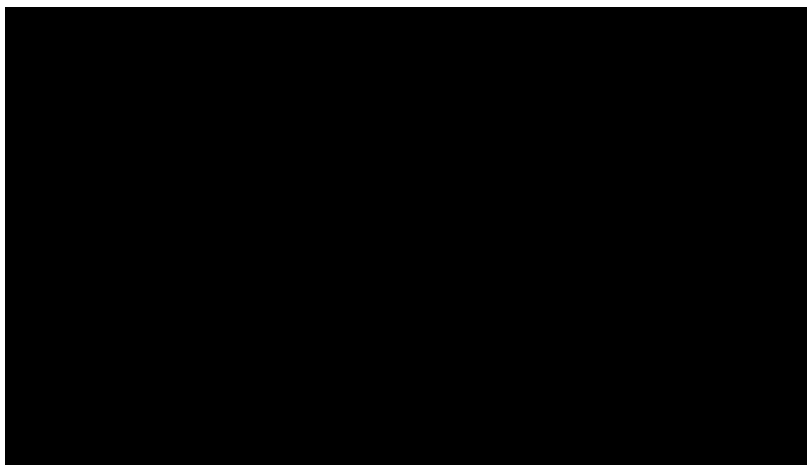
- Στη δεύτερη οικογένεια ανήκουν οι εφελκούμενες κατασκευές, όπως προεντεταμένα καλωδιωτά συστήματα και μεμβράνες.
- Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν οι υβριδικές κατασκευές, που είναι συνδυασμός των χωρικών κατασκευών και των εφελκούμενων κατασκευών.

3. ΕΠΙΠΕΔΑ ΧΩΡΟΔΙΚΤΥΩΜΑΤΑ

Το επίπεδο χωροδικτύωμα που αποτελείται από μία ή περισσότερες επίπεδες στρώσεις στοιχείων. Ένα μονής στρώσης χωροδικτύωμα αποτελείται από έναν επίπεδο σχηματισμό συμπαγών αλληλοσυνδεόμενων δοκών. Το εξωτερικό σύστημα φορτίσεως αυτού του χωροδικτυώματος αποτελείται από δυνάμεις κάθετες στο επίπεδό του και ροπές των οποίων οι άξονες συμπίπτουν με το επίπεδο. Ο λόγος που κατατάσσονται τα δικτυώματα αυτά στα χωροδικτυώματα είναι γιατί η εξωτερική φόρτιση και οι μετατοπίσεις δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με το υπόψη δικτύωμα.

Το μοντέλο των δύο κατευθύνσεων (two-way pattern) (σχήμα 1.α) είναι το πιο απλό των επίπεδων δικτυωμάτων. Αποτελείται από δύο ομάδες αλληλοσυνδεόμενων δοκών που κατευθύνονται παράλληλα με τις συνοριακές γραμμές. Το διαγώνιο μοντέλο (diagonal pattern) (σχήμα 1.β) αποτελείται από δύο παράλληλες ομάδες που τοποθετούνται πλάγια με προσοχή ως προς τις συνοριακές γραμμές. Το μοντέλο αυτό εμφανίζει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης ακαμψίας που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της κάμψης. Υπάρχουν ακόμη δικτυώματα τριών και τεσσάρων κατευθύνσεων (three-way and four-way pattern) (σχήμα 1.γ-1.δ). Με μετακίνηση των στοιχείων μπορούν να προκύψουν διάφορες μορφές δικτυωμάτων από τα βασικά μοντέλα του σχήματος 1. Κάποια τέτοια παραδείγματα φαίνονται στο σχήμα 2. Κατά το σχεδιασμό τους θα ήταν εύλογη η απορία για το αν υπάρχουν περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλα σχήματα χωροδικτυωμάτων. Η απάντηση είναι πως το κάθε μοντέλο έχει τα δικά του χαρακτηριστικά. Από την άλλη δεν υπάρχει κάποιο μοντέλο με σίγουρα καλή ή κακή συμπεριφορά και η επιλογή στη χρήση είναι ένας συνδυασμός παραγόντων, όπως το σχήμα και το μέγεθος των συνόρων, οι

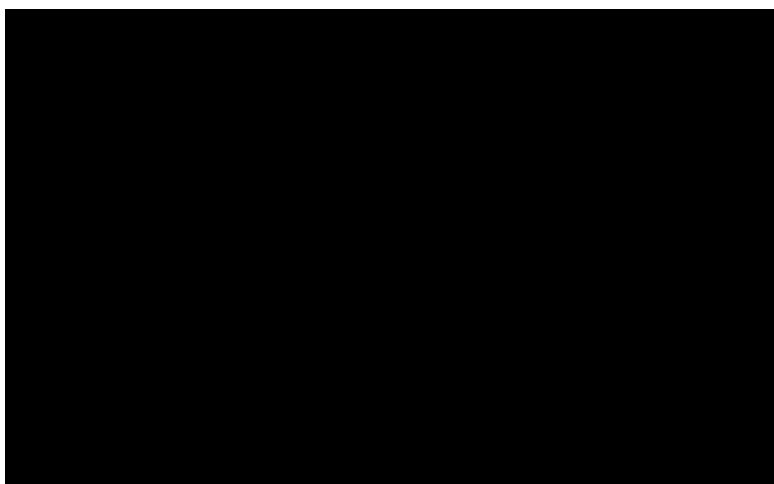
θέσεις στηρίξεων, τα χαρακτηριστικά φορτίσεως, τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν και η επιθυμητή, τέλος, συμπεριφορά της κατασκευής.



Σχήμα 1: Μερικά βασικά μοντέλα

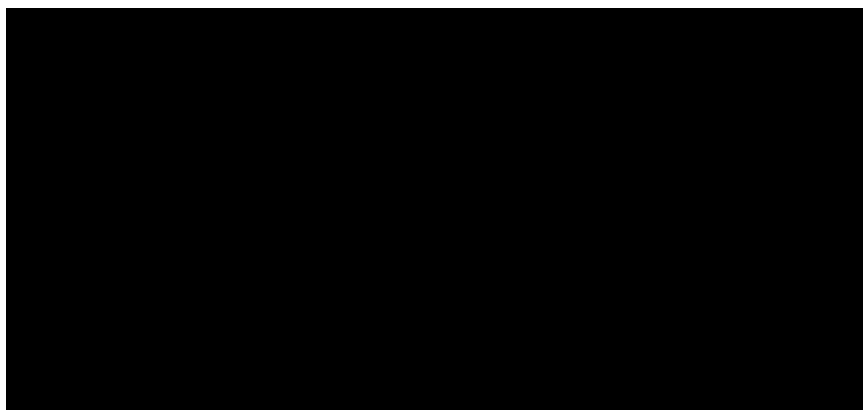
4. ΕΠΙΠΕΔΑ ΧΩΡΟΔΙΚΤΥΩΜΑΤΑ ΔΙΠΛΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Τα διπλής στρώσης (double layer grids) είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα προκατασκευασμένων χωροδικτυωμάτων και από τα πιο συνηθισμένα μοντέλα χωρικών δικτυωμάτων. Χρησιμοποιούνται σήμερα διεθνώς για να καλύψουν μεγάλα ανοίγματα βιομηχανικών κτιρίων, αθλητικών κέντρων, εκκλησίες ή χώρους εκθεμάτων.



Σχήμα 2: Μοντέλα που προέκυψαν από τη μετακίνηση των στοιχείων

Τα χωροδικτυώματα διπλής στρώσης είναι μια λογική εξέλιξη των επίπεδων δικτυωμάτων μιας στρώσης. Αποτελούνται από δύο (το ελάχιστο) παράλληλες στρώσεις στοιχείων που αλληλοσυνδέονται μεταξύ τους με ένα πλέγμα στοιχείων, είτε σε ευθεία, είτε πλαγίως, σχηματίζοντας κάποια γωνία και φορτίζονται με δυνάμεις κάθετα στο επίπεδό τους. Κάποια παραδείγματα χωροδικτυωμάτων διπλής στρώσης φαίνονται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3: Παραδείγματα χωροδικτυωμάτων διπλής στρώσης

Χάρη στην αλληλοσύνδεση αυτή, τα συγκεντρωμένα φορτία που ασκούνται σε ένα τμήμα της κατασκευής, αναλαμβάνονται όχι μόνο από τα άμεσα φορτισμένα μέλη, αλλά και από στοιχεία που απέχουν από το σημείο φορτίσεως. Στην πραγματικότητα, η αποτελεσματικότητα μιας κατασκευής κρίνεται πολλές φορές από την ικανότητά της να αναλάβει και να καταναείμει όσον το δυνατό περισσότερο το ασκούμενο φορτίο. Με τον τρόπο αυτό, μειώνονται οι υψηλές τάσεις στα απευθείας φορτισμένα μέλη, ενώ αυξάνονται στα πιο απομακρυσμένα στοιχεία, επιτυγχάνοντας έτσι μια ανακατανομή των τάσεων σε ολόκληρη την κατασκευή.

Όπως στα επίπεδα χωροδικτυώματα μιας στρώσης, έτσι και εδώ υπάρχουν διάφορα μοντέλα με δοκούς κάθετες ή διαγώνιες. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι οι δοκοί έχουν διάφορα μήκη L , οπότε και αν ακόμη έχουν τις ίδιες διαστάσεις διατομής και την ίδια ακαμψία EI , η σχετική τους δυσκαμψία EI/L διαφέρει σημαντικά. Αυτό σημαίνει πως οι γωνιακές κοντύτερες δοκοί, εξαιτίας της μεγαλύτερης τους σχετικής δυσκαμψίας, παρέχουν ενδιάμεσες στηρίξεις στις μακρύτερες διαγώνιες δοκούς, οι οποίες έτσι γίνονται συνεχείς δοκοί με προβόλους στα άκρα. Με τον τρόπο αυτό, μειώνονται σημαντικά οι ροπές στα μέσα των ανοιγμάτων των διαγώνιων δοκών.

Η σύγκριση λοιπόν των διαγραμμάτων των καμπτικών ροπών μεταξύ των κάθετων δοκών και των διαγωνίων δείχνει ότι στις πρώτες είναι μεγαλύτερες από ότι στις δεύτερες που εμφανίζουν τόσο θετικές, όσο και αρνητικές ροπές. Αυτό εξηγεί, επίσης, τις μικρότερες παραμορφώσεις των διαγώνιων δοκών εν συγκρίσει με τις κάθετες. Σαν κανόνας, είθισται να χρησιμοποιούνται τα μοντέλα των τριών κατευθύνσεων στις περιπτώσεις μεγάλων ανοιγμάτων ή μεγάλων συγκεντρωμένων φορτίων. Εμφανίζουν ακόμη το πλεονέκτημα της καλύτερης ανακατανομής των τάσεων. Χρησιμοποιώντας όμως περισσότερα υλικά, δημιουργείται ένα σύνθετο σύστημα, στο οποίο ο κανονικός σχηματισμός των τριών διευθύνσεων απλοποιείται παραλείποντας κάθε δεύτερο μέλος και παράγεται έτσι μια κατασκευή που αποτελείται από ισόπλευρα τρίγωνα και κανονικά εξάγωνα. Περαιτέρω απλούστευση θα οδηγήσει σε εξαγωνικό κάνναβο, κάτι που σπάνια χρησιμοποιείται. Τα μοντέλα των τεσσάρων διαστάσεων είναι συνδυασμός των κάθετων και διαγώνιων δοκών.

Τα επίπεδα δικτυώματα μιας στρώσης χρησιμοποιούνται για ανοίγματα έως 10μ. Για μεγαλύτερα ανοίγματα, μέχρι και 100μ, χρησιμοποιούνται επίπεδα δικτυώματα διπλής στρώσης. Τα χωροδικτυώματα διπλής στρώσης ανήκουν στην κατηγορία των σκελετικών κατασκευών (skeletal structures) και αποτελούνται από μεγάλο αριθμό γραμμικών μελών που συνδέονται στους κόμβους. Ενώ τα απλής στρώσης χωροδικτυώματα δέχονται και καμπτικές ροπές, τα μέλη των επίπεδων χωροδικτυωμάτων διπλής στρώσης είναι σχεδόν αποκλειστικά υπό τη δράση αξονικών δυνάμεων (η ελαχιστοποίηση των ροπών οδηγεί στην πλήρη εκμετάλλευση της αντοχής όλων των μελών).

Τα χωροδικτυώματα διπλής στρώσης έχουν μεγάλη πρακτική αξία καθώς είναι ευρεία η χρήση τους εξαιτίας των πολλών τους πλεονεκτημάτων:

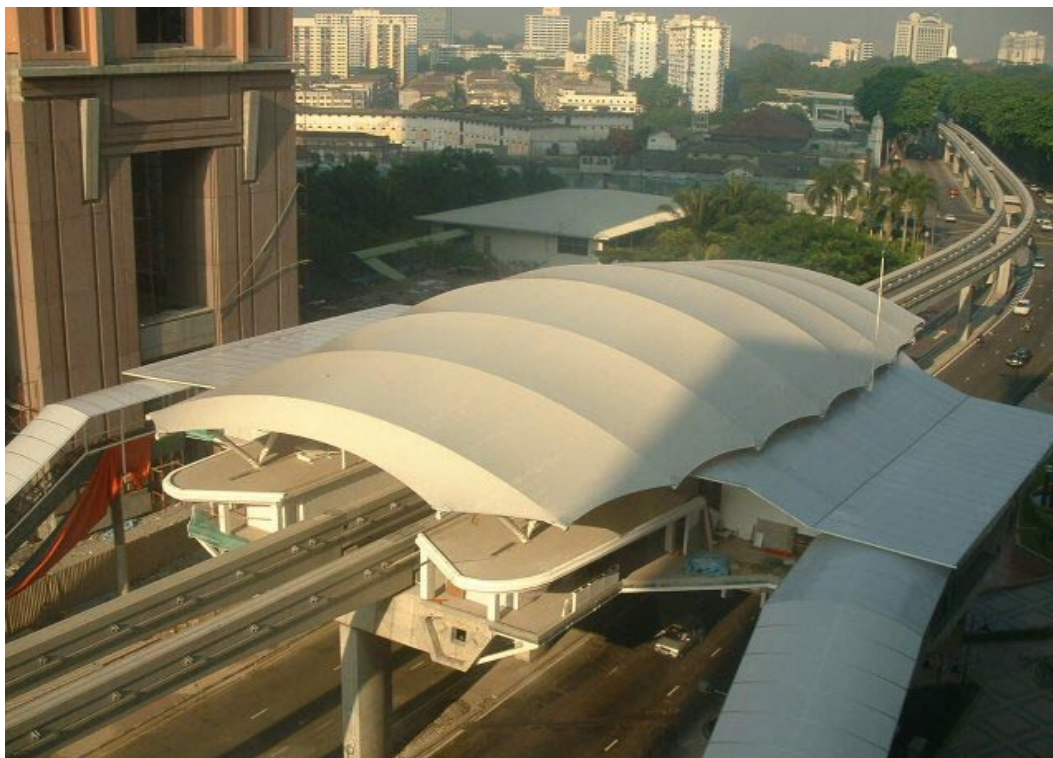
- Αποτελούν τυπικά παραδείγματα κατασκευών τριών κατευθύνσεων στις οποίες τα εξωτερικά φορτία κατανέμονται ισότιμα.
- Σαν κανόνας, είναι υπερστατικά μοντέλα, συνεπώς ο λυγισμός οποιουδήποτε θλιβόμενου μέλους κάτω από ένα μεγάλο συγκεντρωμένο φορτίο δεν θα οδηγούσε σε ολική κατάρρευση της κατασκευής.
- Η μεγάλη τους ακαμψία οδηγεί σε σχετικά μικρές μετατοπίσεις.

- Έχουν μεγαλύτερη αντίσταση στη φωτιά από τις συμβατές κατασκευές.
- Μπορούν να συναρμολογηθούν από προκατασκευασμένα κομμάτια εξασφαλίζοντας την ακρίβεια και την ταχύτητα της κατασκευής. Το μικρό μέγεθος των στοιχείων διευκολύνει, επίσης, το χειρισμό και τη μεταφορά τους.
- Χαρακτηρίζονται από απομακρυσμένες και τυχαίες περιοχές στηρίξεων. Το γεγονός αυτό προσφέρει ευελιξία στο σχεδιαστή ως προς τη σχεδίαση και την τοποθέτηση των υποστυλωμάτων.
- Το διάστημα μεταξύ των στρώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση και τη διατήρηση των μηχανολογικών και ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, όπως η θέρμανση, η ψύξη και ο εξαερισμός.
- Η ξηρά μέθοδος κατασκευής επιτρέπει τη δόμηση υπό κάθε είδους καιρικές συνθήκες.
- Ανταποκρίνονται καλύτερα σε εναέριες ή τρομοκρατικές επιθέσεις και εκρήξεις από οποιοδήποτε άλλο δομικό σύστημα. Το ίδιο θετική είναι η απόκρισή τους και στις σεισμικές δυνάμεις.
- Εξασφαλίζουν, τέλος, την αισθητική και την ευελιξία των μορφών στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι επίπεδων χωροδικτυωμάτων διπλής στρώσης:

- Το κρυσταλλικό πλέγμα (lattice or truss grids) που αποτελείται από κάθετα αλληλοσυνδεόμενα πλέγματα δημιουργώντας έναν κανονικό κάνναβο. Περιέχει δύο παράλληλους καννάβους, όμοια σχεδιασμένους, με τη μια στρώση απευθείας πάνω από την κορυφή της άλλης.
- Με πραγματικά διαστήματα (true space grids) που αποτελούνται από ένα συνδυασμό προκατασκευασμένων σκελετικών πυραμίδων με τριγωνικές, τετραγωνικές, πενταγωνικές ή εξαγωνικές βάσεις. Είναι τα συχνά καλούμενα συμμετρικά δικτυώματα (offset grids) που περιέχουν δύο παράλληλους καννάβους απόλυτα συμμετρικούς αλλά και όμοιους.

5. ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΧΩΡΟΔΙΚΤΥΩΜΑΤΑ



Εικόνα 1: KL MONORAIL - KUALA LUMPUR, MALAYSIA

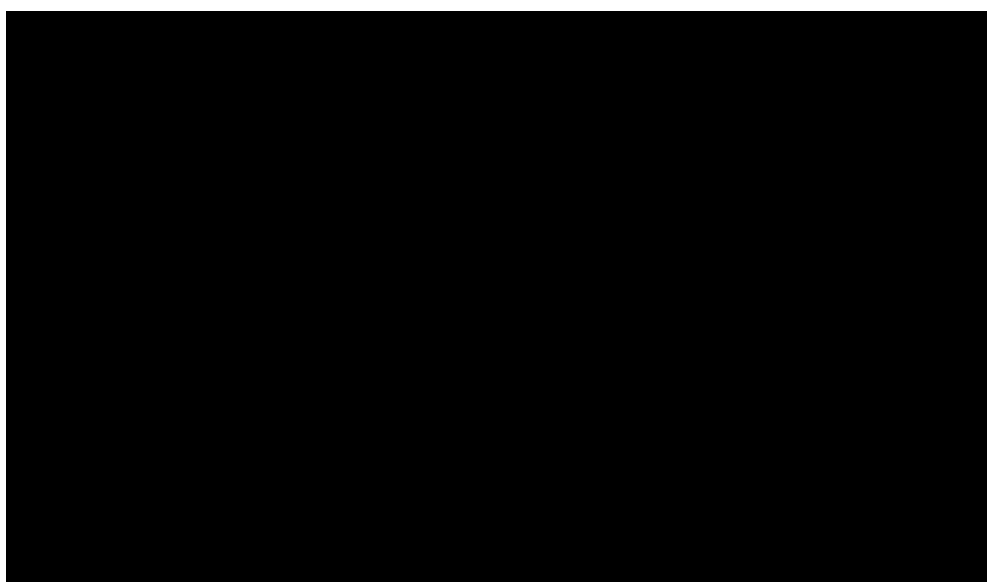
Τα κυλινδρικά δικτυώματα προέρχονται δημιουργώντας τόξο κατά μήκος μιας διεύθυνσης. Το αποτέλεσμα είναι ένας κυλινδρικός τύπος που μπορεί να περιλαμβάνει μία, δύο ή περισσότερες στρώσεις από στοιχεία. Μερικά παραδείγματα από κυλινδρικούς σχηματισμούς δείχνονται στο σχήμα 4. Το σχήμα 4a δείχνει μια απλή κυλινδρική στρώση που προέρχεται, δημιουργώντας τόξο με διαγώνιο επίπεδο πλέγμα. Η κυλινδρική με διαγώνια πατέντα αναφέρεται συχνά σαν κυλινδρική με παχιά μεμβράνη. Η κυλινδρική του σχήματος 4b είναι όμοια με τη μία του σχήματος 4a, αλλά έχει την τριών γραμμών πατέντα. Ένα κυλινδρικό διπλής στρώσης φαίνεται στο σχήμα 4c με αμφότερες την κορυφή και τη βάση στρώσεις να έχουν μια δύο γραμμών πατέντα. Επίσης, η κυλινδρική του σχήματος 4d έχει τη στρώση της και τη στρώση της βάσης με αλληλοσυνδεόμενα δικτυακά στοιχεία. Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση η διάταξη των στοιχείων έχει σαν αποτέλεσμα τα δεμένα σφιχτά κυλινδρικά, δηλαδή, ένα κυλινδρικό που αποτελείται από τεμνόμενα καμπυλωμένα πλαίσια.

Το σχήμα του διασταυρωμένου τμήματος ενός κυλινδρικού μπορεί να διαφέρει κατά μήκος των διαμηκών αξόνων. Παραδείγματα αυτού φαίνονται στα σχήματα 4e και 4f. Η

επιφάνεια του κυλινδρικού με παχιά μεμβράνη του σχήματος 4e είναι ένα τμήμα ενός υπερβολοειδούς εκ περιστροφής. Επίσης, η επιφάνεια του κυλινδρικού του σχήματος 4f είναι ένα τμήμα ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής.

Ένα παράδειγμα ενός σύνθετου κυλινδρικού φαίνεται στο σχήμα 4g. Ένα σύνθετο κυλινδρικό αποτελείται από δύο ή περισσότερα κυλινδρικά που συνδέονται μαζί κατά μήκος των πλευρών τους. Το σύνθετο κυλινδρικό του σχήματος 4g προέρχεται συνδυάζοντας τρία κυλινδρικά όμοια με το ένα του σχήματος 4b.

Τα διασταυρωμένα τμήματα των κυλινδρικών στο σχήμα είναι κυκλικά. Ωστόσο, ένα κυλινδρικό μπορεί να έχει ένα διασταυρωμένο τμήμα που έχει ελλειπτικά, παραβολικά ή αρκετά άλλα σχήματα.



Σχήμα 4 : Παραδείγματα κυλινδρικών

Η γρήγορη αποδοχή των απλής και διπλής στρώσης καννάβων οδήγησε στην ανάπτυξη των χωρικών πλαισίων (spaceframes) για καμπύλες επιφάνειες όπως κυλινδρικές και θόλοι. Ένα παράδειγμα ενός προκατασκευασμένου κυλινδρικού απλής στρώσης ήταν το διάσημο σιδερένιο κυλινδρικό σχεδιασμένο από τον Joseph Paxton. Το κυλινδρικό κτίστηκε πάνω στο κέντρο του καθολικού ναού του Crystal Palace για τη Μεγάλη Έκθεση του 1851, στο Hyde Park, London, UK. Αυτή η κατασκευή αποτελείται από έναν ορθογωνικό κάνναβο από προκατασκευασμένες modular ημικυκλικής πλευράς και διαμήκη μέλη, stiffened από λεπτές διαγώνιες σιδερένιες ράβδους.

Ένα άλλο πολύ γνωστό παράδειγμα μιας επιτυχημένης χρήσης κυλινδρικού είναι το υπόστεγο αεροπλάνων που κτίστηκε το 1935, στη Cecchignola, κοντά στη Ρώμη. Το υπόστεγο καλύπτει μια περιοχή 102.5 μέτρα x 39.6 μέτρα και υποστηρίζεται σε μόνο έξι σημεία. Το κυλινδρικό σχεδιάστηκε από το διάσημο Ιταλό σχεδιαστή Pier Luigi Nervi. Μερικά μεγάλης έκτασης κυλινδρικά κτίστηκαν από τον Nervi, χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένες αρθρωτές οπλισμένου σκυροδέματος μονάδες. Αυτές οι προκαλουπωμένες μονάδες αλληλοσυνδέονται σε κάθε πλευρά διαμέσου συγκόλλησης των προεξέχοντων σιδερένιων οπλισμένων ράβδων στα κομβικά σημεία. Πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος καλουπώθηκαν (cast) σαν τη στρώση της κορυφής, που έγινε ένα αναπόσπαστο τμήμα της cylindrical κυλινδρικής κατασκευής.

Το 1942 το σύστημα MERO έγινε το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο σύστημα χωροκατασκευής. Αναπτυγμένο από τον Dr Mengerlinghausen, αυτό το σύστημα επιτρέπει πάνω από δεκαοκτώ ράβδους να είναι συνδεδεμένες στον ίδιο κόμβο χωρίς καμιά εκκεντρικότητα. Το σύστημα MERO έχει χρησιμοποιηθεί για πολυάριθμες κατασκευές παντού στον κόσμο. Μία από τις πιο αξιόλογες κατασκευές κτισμένες χρησιμοποιώντας το σύστημα MERO είναι η σκεπή του σταδίου στο Split στην Κροατία για τους Μεσογειακούς Αγώνες το 1979. Δύο ευρείας έκτασης κυλινδρικά διπλής στρώσης σχεδιάστηκαν σε αμφιέριστες 45 μέτρων πάνω από την περιοχή των θεατών και υποστηρίχθηκαν μόνο κατά μήκος της περιμέτρου. Κάθε κυλινδρικό έχει μια έκταση σχεδόν 215 μέτρα. Το χωρικό πλαίσιο (spaceframe) βασίζεται σε ένα 3 μέτρα x 3 μέτρα άρθρωμα (module), με ένα κατασκευαστικό βάθος των 2.3 μέτρων. Διαφανείς ακριλικές θολωτές μονάδες χρησιμοποιούνται σαν επικάλυψη.

6. ΘΟΛΩΤΕΣ ΧΩΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Οι μεγάλες εκτάσεις έχουν συναρπάσει πάντα τους αρχιτέκτονες και τους μηχανικούς. Οι θόλοι παρέχουν μια εύκολη και οικονομική μέθοδο μεγάλων περιοχών υλικού κατασκευής σκεπής και χρησιμοποιούνται συχνά από τους σχεδιαστές που αντιλαμβάνονται τα πλεονεκτήματα και την εντυπωσιακή ομορφιά αυτής της μορφής κατασκευής. Οι θόλοι έχουν χρησιμοποιηθεί στην αρχιτεκτονική από τους νεότερους χρόνους. Πιθανώς, η

ενωρίτερη ένδειξη της χρήσης του θόλου δίνεται από ένα ανάγλυφο της Ασσυρίας που βρέθηκε στα ερείπια του παλατιού του Senna-Cheribbo στη Nineveh (705-681 π.Χ) και δείχνει μια ομάδα κτιρίων που πιστεύεται ότι είχε καλυφθεί με ημισφαιρικούς και καθορισμένους θόλους.



Εικόνα 2: *The Eden Project- Cornwall, England*

Η ανάπτυξη των θόλων έχει συνδεθεί πολύ με την ανάπτυξη των διαθέσιμων υλικών. Στην αρχαιότητα, οι θόλοι χτίστηκαν στην πέτρα, η πλινθοδομή αντικατέστησε βαθμιαία τη λιθοδομή. Η ξυλεία ήταν το κύριο υλικό κατασκευής σκεπής που χρησιμοποιείται στις μέσες ηλικίες και μερικοί θόλοι ξυλείας από αυτήν την περίοδο υπάρχουν ακόμα, συνήθως στη Γερμανία, τη Γαλλία, την Ιταλία, τη Ρωσία και Σκανδιναβία. Χρησιμοποιήθηκαν συχνά ως εξωτερική προστατευτική κάλυψη πέρα από τον κύριο θόλο(masonry dome).

Οι μεγάλες εκτάσεις που θα μπορούσαν να καλυφθούν με τους θόλους υποκινούσαν πάντα τη φαντασία των αρχιτεκτόνων και στον 19^ο αιώνα διάφορα πολύ μεγάλα κτίρια έκθεσης καλύφθηκαν από ένα θόλο. Ένας αποφασιστικός παράγοντας σε αυτήν την τάση

ήταν η εισαγωγή του σιδήρου, η οποία άνοιξε μια νέα συναρπαστική εποχή για το δομικό μηχανικό και τον αρχιτέκτονα, που ήταν γρήγορο να αντιληφθούν τη δυνατότητα και τα πλεονεκτήματα της σχετικά μεγάλης δύναμης και του συγκριτικά ελαφρού βάρους.

Ο σίδηρος χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην κατασκευή θόλων το 1811, όταν οι Belanger και Brunet κάλυψαν το κεντρικό μέρος της αγοράς καλαμποκιού στο Παρίσι με ένα θόλο σιδήρου. Πολύ ενδιαφέρον προκλήθηκε μεταξύ των μηχανικών και των αρχιτεκτόνων από αυτή την κατασκευή αν και δεν ήταν πολύ περισσότερο από μια προσαρμογή των μεθόδων κατασκευής ξυλείας στη χρήση του επεξεργασμένου σιδήρου.

Η εισαγωγή του χάλυβα, με τις πολύ βελτιωμένες ιδιότητες υψηλής δύναμής του, αποδείχθηκε μια θεμελιώδης επιρροή στην ανάπτυξη των διάφορων τύπων ενισχυμένων θόλων και χρήσών τους για τις μεγάλες εκτάσεις. Το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε εκτενώς από τους Ρωμαίους για την κατασκευή των θόλων, αλλά το απλό σκυρόδεμα, αν και ισχυρό στη θλίψη, είναι πολύ αδύνατο στον εφελκυσμό, έτσι θόλοι μη-οπλισμένου σκυροδέματος έπρεπε να γίνουν πολύ παχιοί. Παραδείγματος χάριν, το πάχος να αναπηδήσει του θόλου σκυροδέματος που κατασκευάζεται στην αρχή αυτού του αιώνα για να καλύψει τον καθεδρικό ναό του Westminster ήταν 0,91m για μια έκταση 18,3m.

Προσθέτοντας οπλισμό χάλυβα στο σκυρόδεμα προκειμένου να αντέχουν στις εφελκυστικές δυνάμεις ανοίχθηκε ένα νέο συναρπαστικό πεδίο της δομικής μηχανικής. Ένας από τους πρώτους οπλισμένους θόλους σκυροδέματος ήταν ο διάσημος ραβδωτός θόλος που κτίσθηκε το 1912 πέρα από την εκατονταετή αίθουσα στο Wroclaw, Πολωνία, σχεδιασμένο από τον Max Berg. Αυτός ο θόλος ήταν ο πρώτος και είναι ακόμα ο μεγαλύτερος οπλισμένου σκυροδέματος ραβδωτός θόλος. Καλύπτει μια κυκλική περιοχή 65 m στη διάμετρο και υποστηρίζεται σε τέσσερα λοξά τόξα που δημιουργούνται από τη διασταύρωση του κάθετου κυλίνδρου με σφαιρικές αψίδες. Ο κεντρικός θόλος ενσωματώνει τριάντα δύο ακτινωτές πλευρές που αλληλοσυνδέονται από πέντε παράλληλα δαχτυλίδια. Οι τέσσερις σφαιρικές πλευρές αψίδων λειτουργούν σαν στηρίγματα - πολύ όμοια με τη δράση τους είναι η St Sophia στην Κωνσταντινούπολη. Αυτή η μορφή κατασκευής αποδείχθηκε, εντούτοις, όχι απαραίτητα βαριά και δεν υιοθέτησε πλήρως τα πλεονεκτήματα του σκυροδέματος.

Ο πρώτος shell dome οπλισμένου σκυροδέματος, εφευρέθηκε από τον Dr Walter Bauersfeld, κύριος μηχανικός στις εργασίες Zeiss στην Jena και κτίστηκε το 1922. Ήταν το πρώτο παγκοσμίως ελαφρού βάρους, χαλύβδινο κατασκευαστικά δομικό πλαίσιο, το οποίο καλύφθηκε με ενισχυμένο τσιμέντο, δημιουργώντας την πρώτη λεπτού κελύφους κατασκευή σκυροδέματος στην ιστορία του πολιτικού μηχανικού. Αυτός ο θόλος σημείωσε μια τεράστια πρόοδο γιατί είχε μια καθαρή έκταση 25m, αλλά αποτελούνταν από κελύφος οπλισμένου σκυροδέματος μόνο 60.3mm πάχους. Αυτή η κατασκευή, που καλύπτει ένα πλανητάριο, ήταν μια άμεση επιτυχία και, κατά συνέπεια, οι πολυάριθμοι οπλισμένου σκυροδέματος shell domes έχουν κτιστεί, συμπεριλαμβανομένου ενός δεύτερου στην Jena με μια διάμετρο 40m , αλλά ακόμα με ένα πάχος μόνο 60.3mm.

Εντούτοις, ο αρχικός μεγάλος ενθουσιασμός των σχεδιαστών για τη χρήση των κελύφων οπλισμένου σκυροδέματος άρχισαν βαθμιαία να πεθαίνουν, μόλις πραγματοποιήθηκαν τα μειονεκτήματα αυτού του τύπου κατασκευής – κελύφη οπλισμένου σκυροδέματος απαιτούν πολύπλοκο και πολύ ακριβό τύπο δουλειάς, είναι αργά στην κατασκευή και συχνά όχι πραγματικά οικονομικά στο τελικό κόστος τους. Αυτό ήταν ο χρόνος όταν εκτιμήθηκαν τα πλεονεκτήματα του χάλυβα, των κραμάτων αλουμινίου και των επίσης οπλισμένων ινών γυαλιού πλαστικών. Η περίοδος του τελευταίου τετάρτου του αιώνα έχει χαρακτηριστεί ειδικά σε όλο τον κόσμο λόγω της τολμηρής και επινοητικής χρήσης των metal-braced domes.

Οι θόλοι παρουσιάζουν ειδικό ενδιαφέρον για τους μηχανικούς και τους αρχιτέκτονες δεδομένου ότι αυτοί περιβάλλουν μια μέγιστη ποσότητα χώρου με μια ελάχιστη επιφάνεια και έχει αποδειχθεί ότι είναι πολύ οικονομικοί στην κατανάλωση κατασκευαστικών υλικών. Οι θόλοι είναι, επίσης, εξαιρετικά κατάλληλοι για τα αθλητικά στάδια, τις αίθουσες συνελεύσεων, τα κέντρα έκθεσης, τις πισίνες και τα βιομηχανικά κτίρια, στα οποία οι μεγάλες ανεμπόδιστες περιοχές είναι αναγκαίες και όπου η ελάχιστη παρέμβαση από τις εσωτερικές υποστηρίξεις απαιτείται. Η παροχή ανεμπόδιστης θέας για μεγάλο αριθμό ανθρώπων είναι η πρωταρχική απαίτηση στις αθλητικές αίθουσες και μπορεί εύκολα να ικανοποιηθεί μέσω της υιοθέτησης ενός domical σχήματος.

Ένας θόλος είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας synclastic επιφάνειας στην οποία

η καμπυλότητα οποιουδήποτε σημείου είναι της ίδιας ένδειξης σε όλες τις κατευθύνσεις. Οι synclastic επιφάνειες καλούνται, επίσης, επιφάνειες της θετικής Gaussian καμπυλότητας και δεν είναι αναπτύξιμες, δηλ. οι domic επιφάνειες δεν μπορούν να ισιωθούν σε ένα επίπεδο χωρίς το τέντωμα ή στένεμά τους. Αυτή η ιδιότητα είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους, στην πράξη, οι θόλοι δεν μπορούν να κτιστούν από μέλη όλα με το ίδιο μήκος, ακόμη και οι γεωδαιτικοί θόλοι απαιτούν μέλη από διαφορετικά μήκη.

Οι περισσότεροι θόλοι που κτίζονται στην πράξη έχουν μια επιφάνεια που μπορεί να παραχθεί από την περιστροφή μιας επίπεδης καμπύλης γύρω από μια κάθετη γραμμή. Η περιστρεφόμενη καμπύλη καλείται μεσημβρινό της και τα οριζόντια τμήματα είναι γνωστά ως παράλληλοι. Οποιαδήποτε καμπύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεσημβρινός, ένας κύκλος προκαλεί μια σφαίρα, μια έλλειψη ένα ελλειψοειδές και μια παραβολή έναν περιστροφικό παραβολοειδή. Οι τρεις προαναφερόμενες επιφάνειες είναι όλες synclastic.

Θεωρητικά είναι, επίσης, δυνατό να παραχθούν domic επιφάνειες που γεννιούνται από μετατροπή. Αυτό συμβαίνει όταν γλιστρά μια καμπύλη A σε μια άλλη καμπύλη B, συνήθως στη σωστή γωνία με αυτή, συγχρόνως παραμένοντας παράλληλη. Δεδομένου ότι οποιοσδήποτε συνδυασμός καμπυλών μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μια μεγάλη ποικιλία από επιφάνειες είναι εφικτή από μετατροπή, αλλά στην πρακτική πολιτικού μηχανικού πολύ λίγοι σκελετικοί θόλοι έχουν κτιστεί έχοντας μια μεταφραστική επιφάνεια, αν και δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι μερικές από αυτές τις επιφάνειες θα είχαν μια ειδική αρχιτεκτονική έφεση. Στην πράξη, οι περισσότεροι θόλοι είναι σφαιρικοί, καλύπτοντας κυκλικές περιοχές.

Τα περισσότερα πρόωρα κτίρια εμφανίζονται να έχουν κτιστεί σε ένα κυκλικό σχέδιο και οι θόλοι αποδείχθηκαν μια εύκολη και κατάλληλη μέθοδος υλικού κατασκευής οροφής από αυτούς. Εντούτοις, αν και δεν υπάρχει αμφιβολία ότι ο θόλος άρχισε μόνο ως χρηστική μορφή υλικού κατασκευής σκεπής, η domic μορφή έγινε ένα θρησκευτικό σύμβολο που συνδέεται στις ειδωλολατρικές, πρόωρες χριστιανικές και ισλαμικές περιόδους με τους τάφους, τα αρτοφόρια, τα βαπτιστήρια, τις εκκλησίες, τα μουσουλμανικά τεμένη και τις βασιλικές αίθουσες ακροατηρίων. Μια μελέτη από τον Baiwin Smith (1950) δείχνει ότι ο θόλος είχε μια ειδική σχέση μεταξύ της αρχιτεκτονικής και θρησκευτικών ιδεών.

Απέδειξε ότι ο θόλος είναι όχι μόνο μια πρακτική μορφή τεκτονικής, αλλά κατέχει μια ειδική συμβολική αξία που τον έκανε το εξυψωμένο χαρακτηριστικό γνώρισμα τριών μεγάλων μορφών της αρχιτεκτονικής: Βυζαντινής, Ισλαμικής και Ινδικής.

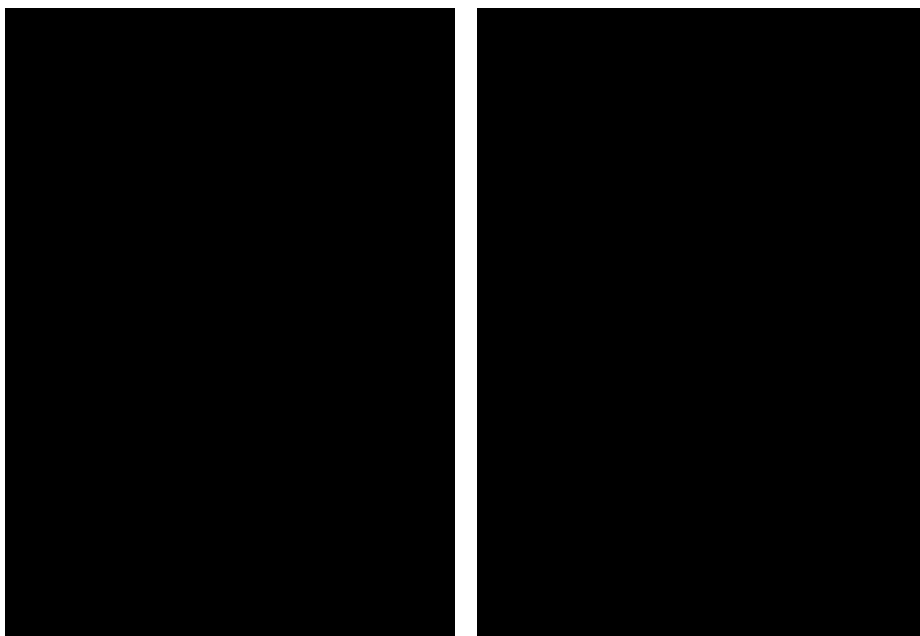
Ο θόλος είναι ένα κατασκευαστικό σύστημα που αποτελείται από μία ή περισσότερες στρώσεις στοιχείων που είναι δημιουργημένα με τόξα σε όλες τις διευθύνσεις. Η επιφάνεια ενός θόλου μπορεί να είναι ένα τμήμα μια απλής επιφάνειας όπως μιας σφαίρας ή ενός παραβολοειδούς, ή μπορεί να αποτελείται από μπαλώματα από διαφορετικές επιφάνειες. Μερικοί κοινοί χρησιμοποιούμενοι βασικοί απλής στρώσης σχηματισμοί θόλου φαίνονται στο σχήμα 5. Ο θόλος που φαίνεται στο σχήμα 5a είναι ένας πλευρικός θόλος. Ένας πλευρικός θόλος αποτελείται από έναν αριθμό διχοτομημένων πλευρών και δακτυλίων. Μια πλευρά είναι ένα γκρουπ στοιχείων που απλώνονται κατά μήκος μιας 'νότιας' γραμμής και ο δακτύλιος είναι ένα γκρουπ στοιχείων που αποτελούν ένα οριζόντιο πολύγωνο. Ο πλευρικός θόλος δεν θα είναι κατασκευαστικά σταθερός εάν δεν είναι σχεδιασμένος σαν άκαμπτο-αρθρωτό σύστημα. Όταν ο αριθμός των δακτυλίων είναι μεγάλος, τότε εκεί θα μπορούσε να είναι ένα πρόβλημα όσον αφορά τον συνωστισμό των στοιχείων κοντά στην κορυφή. Ένας τρόπος να αποφύγουμε αυτό το πρόβλημα είναι να μειώσουμε τα ανώτερα τμήματα από κάποιους από τους δακτυλίους. Αυτή η λειτουργία αναφέρεται σαν καλλωπισμός. Ένα παράδειγμα ενός καλλωπισμένου πλευρικού θόλου φαίνεται στο σχήμα 5b, όταν κάθε άλλη πλευρά είναι καλλωπισμένη από την στάθμη του τετάρτου δακτυλίου από την κορυφή.

Μία τροποποιημένη μορφή ενός πλευρικού θόλου προέρχεται στηρίζοντας τα τετράπλευρα πλαίσια του θόλου. Το αποτέλεσμα είναι ένας σχηματισμός θόλου που αναφέρεται σαν ο θόλος του Schwedler (μετά τον 19^ο αιώνα γερμανός μηχανικός J.W.Schwedler που έκτισε πολλούς θόλους αυτού του είδους). Ένα απλό παράδειγμα του θόλου του Schwedler φαίνεται στο σχήμα 5c. Ένα άλλο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 5d. Αυτός ο σχηματισμός θόλου επίσης περιλαμβάνει καλλωπισμό για να αποφύγουμε συνωστισμό στοιχείων στο ανώτερο τμήμα του θόλου.

Ένα παράδειγμα θόλου παχιάς μεμβράνης φαίνεται στο σχήμα 5e. Ο θόλος παχιάς μεμβράνης έχει μια διαγώνια πατέντα και μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερους

δακτυλίου. Ένα παράδειγμα ενός καλλωπισμένου παχιάς μεμβράνης θόλου με δακτυλίους φαίνεται στο σχήμα 5f.

Οι σχηματισμοί θόλου που φαίνονται στα σχήματα 5g και 5h είναι δύο παραδείγματα της οικογένειας θόλων που αναφέρονται σαν diamatic θόλοι. Ο θόλος που φαίνεται στο σχήμα 5g είναι ένα παράδειγμα ενός βασικού diamatic τύπου αποτελούμενος από τριγωνικούς τομείς. Η πατέντα του diamatic θόλου του σχήματος 5h προέρχεται από μια πυκνή έκδοση του θόλου του σχήματος 5g, μετακινώντας κάθε άλλη γραμμή των στοιχείων με έναν τρόπο όμοιο με αυτόν που φαίνεται στο σχήμα 2c.



Σχήμα 5: Παραδείγματα θόλων απλής στρώσης

Οι θόλοι που φαίνονται στα σχήματα 5i και 5j αντιπροσωπεύουν δύο παραδείγματα της οικογένειας των grid θόλων. Ένας grid θόλος προέρχεται προβάλλοντας μία επίπεδου πλέγματος πατέντα πάνω σε μια καμπυλωμένη επιφάνεια. Ο grid θόλος του σχήματος 5i προέρχεται από την προβολή μιας πυκνής έκδοσης της πατέντας του σχήματος 2a πάνω σε μια σφαιρική επιφάνεια. Ο grid θόλος του σχήματος 5j προέρχεται με όμοιο τρόπο χρησιμοποιώντας μια πυκνή έκδοση της πατέντας του σχήματος 2b. Οι grid θόλοι κανονικά είναι σχετικά ρηχοί, με την αύξηση της αναλογίας μέτρησης γίνονται μικρότεροι από ότι οι άλλοι τύποι θόλων. Ένας σχηματισμός γεωδαιτικού θόλου φαίνεται στο σχήμα 5k. Ο θόλος αυτού του είδους προέρχεται σχεδιάζοντας πατέντες στις πλευρές ενός πολύε-

δρου και προβάλλοντας το αποτέλεσμα του σχηματισμού πάνω σε καμπυλωμένη επιφάνεια. Ο θόλος του σχήματος 5k προέρχεται σχεδιάζοντας μια τριγωνική πατέντα σε πέντε γειτονικές πλευρές ενός εικοσαέδρου (20πλευρο κανονικό πολύγωνο) και προβάλλοντας το αποτέλεσμα πάνω σε μία σφαίρα που είναι ομόκεντρη με το εικοσάεδρο. Ο γεωδαιτικός θόλος του σχήματος 5i προέρχεται με όμοιο τρόπο με την αρχική πατέντα διαλεγμένη έτσι ώστε το αποτέλεσμα του θόλου να έχει εμφάνιση κερήθρας.

Οι σχηματισμοί που φαίνονται στα σχήματα 5 αντιπροσωπεύουν τις βασικές πατέντες θόλου, αλλά υπάρχουν περισσότερες άλλες πατέντες θόλου που προέρχονται από παραλλαγές βασικών τύπων. Επίσης, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από πατέντες θόλων διπλής στρώσης (και πολλαπλής στρώσης) που μπορεί να προέρχονται από συνδυασμούς των βασικών πατέντων. Σ' αυτό συμπεριλαμβάνονται οι truss θόλοι που αποτελούνται από διασταυρούμενα καμπυλωμένα υποστηρίγματα. Ένα σημαντικό σημείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, είναι ότι κάποιος πρέπει να είναι προσεκτικός στην χρήση θόλων απλής στρώσης, εκτός αν το αρθρωτό σύστημα παρέχει επαρκή ακαμψία για τις συνδέσεις και τα στοιχεία να αντέχουν σε κάμψη και διάτμηση επιπροσθέτως με τις αξονικές δυνάμεις. Διαφορετικά, οι κατασκευές θα έχουν διάθεση να αστοχούν από φαινόμενα 2^{ης} τάξης (λυγισμός). Το ίδιο εφαρμόζεται και στην περίπτωση κυλινδρικών απλής στρώσης.

Κυλινδρικά χωροδικτυώματα και θολωτές χωροκατασκευές έχουν συχνά χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό για να δημιουργήσουν πιο σύνθετους κατασκευαστικούς τύπους. Για παράδειγμα, το κτίριο για την Διεθνή Έκθεση Ανθοκομίας στο Liverpool είναι μια σύνθεση από δύο ημιθόλους και ένα κυλινδρικό. Οι δύο θόλοι απλής στρώσης είναι χωρισμένοι από ένα κυλινδρικό διπλής στρώσης. Ποικίλοι τύποι από απλής και διπλής στρώσης σχηματισμών και συνδυασμών από trussed patterns έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για θόλους. Επίσης, stressed skin domes όπου η επικάλυψη είναι συνδεδεμένη με ενισχυμένα μέλη (braced members) και τύπους, ένα ολόκληρο τμήμα από το load carrying system, έχει χρησιμοποιηθεί. Μία άλλη κατηγορία από θόλους που λέγονται επιφανειακοί θόλοι (surface domes) είναι κατασκευασμένοι χρησιμοποιώντας λεπτό χάλυβα, αλουμίνιο ή οπλισμένα πλαστικά ελάσματα από ίνες γυαλιού που αλληλοσυνδέονται για να σχηματίσουν το κύριο bracing system.

Ο μεγαλύτερος παγκοσμίως απλής στρώσης αλουμινένιος θόλος κτίστηκε το 1981. Ο θόλος σχεδιάστηκε από τον Don Richter με μια έκταση των 126 μέτρων και ένα ύψος των 40 μέτρων. Ο θόλος σχεδιάστηκε να στεγάσει ένα τεράστιο υδροπλάνο. Μια τριγωνική bracing pattern χρησιμοποιήθηκε για τον θόλο και 0.127mm λεπτού αλουμινίου panels χρησιμοποιήθηκαν για να επικαλύψουν την κατασκευή.

Τριγωνικοί σχηματισμοί διπλής στρώσης έχουν χρησιμοποιηθεί για να κατασκευάσουν δύο από τους μεγαλύτερους θόλους παγκοσμίως. Ο New Orleans Superdome είναι ο μεγαλύτερος παγκοσμίως θόλος με μια καθαρή έκταση των 213 μέτρων και ο δεύτερος μεγαλύτερος θόλος είναι ο Houston Astrodome, με μια καθαρή έκταση των 200 μέτρων. Και οι δύο θόλοι σχεδιάστηκαν από τον Dr G R Kiewitt.

Ένα παράδειγμα ενός trussed dome είναι αυτό του Indraprastha Stadium που κτίστηκε για τους Ασιατικούς Αγώνες στο New Delhi, India το 1982. Ο θόλος έχει μια διάμετρο των 150 μέτρων, κάνοντας το τον τρίτο μεγαλύτερο θόλο στον κόσμο και το μεγαλύτερο εσωτερικό στάδιο στην Ασία. Το στάδιο ολοκληρώθηκε σε χρόνο ρεκόρ των 22 μηνών από τον χρόνο του αρχικού σχεδιασμού του μέχρι την ημέρα των επίσημων εγκαίνιών του. Το στάδιο έχει μια ικανότητα θέσεων των 25000 θεατών και μια αρένα μεγέθους των 78 μέτρων x 60 μέτρων, προμηθευμένη με ευκολίες που απαιτούνται για Ολυμπιακά επίπεδα. Ο θόλος καλύπτοντας το στάδιο δύναται να συρρικνωθεί 100 τόνους ηχομονωτικών εξωτερικών τοίχων, 150 μέτρων μάκρος και 40 μέτρων ύψος, καθιστώντας ικανή την υποδιαίρεση του τεράστιου σταδίου σε δύο ανεξάρτητες περιοχές.

Ο χαλύβδινος θόλος μοιάζει με folded plate structure, αποτελούμενος αρχικά από πλαίσια(trusses) απλωμένα ακτινικά από ένα κεντρικό οκταγωνικό συμπιεσμένο δακτύλιο ο 40 μέτρων σε διάμετρο. Ο συμπιεσμένος δακτύλιος από μόνος του φτιάχνεται από ένα πλέγμα αποτελούμενο από πλαίσια(trusses).

Στο σχέδιο, η οροφή είναι σαν ένα αστέρι οκτώ σημείων μέσα σε κύκλο. Κορυφογραμμές στεγών(roof ridges) και troughs που εκτείνονται από το κέντρο στην περίμετρο σχηματίζονται από χάλυβα work of lattice trusses. Η επικάλυψη που χρησιμοποιείται είναι αυλακωμένα φύλλα αλουμινίου. Η οροφή υποστηρίζεται από οκτώ ψηλούς οπλισμένου σκυροδέματος πύργους 40 μέτρων τοποθετημένοι κατά μήκος της περιμέτρου.

Αυτοί οι πύργοι επίσης δρουν σαν κύριοι πυρήνες εξυπηρέτησης(service cores),σκάλες στέγασης, υπηρεσίες κλιματισμού και φωτισμού. Περίπου 1800 τόνοι από χάλυβα κατασκευάστηκαν επί τόπου.(on site). Όλες οι αρχικής θέσεως αρθρώσεις σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν σαν βιδωτές αρθρώσεις(bolted joints) χρησιμοποιώντας υψηλού εφελκυσμού μπουλόνια (tensile bolts). Ωστόσο, η συγκόλληση υιοθετήθηκε για όλες τις συνδέσεις(shop connections) και ενώσεις(splicing).

Το διάσημο United States Pavilion στην έκθεση του Μόντρεαλ το 1967 είναι ένα εντυπωσιακό παράδειγμα ενός γεωδαιτικού θόλου διπλής στρώσης κτισμένο με σωληνοειδή χάλυβα.

Σχεδιασμένο από τον Buckminster Fuller, τα τρία τέταρτα σφαίρας είναι 76 μέτρων σε διάμετρο. Η εξωτερική στρώση του καννάβου είναι πλήρως τριγωνική και η εσωτερική στρώση είναι ένας εξαγωνικός κάνναβος.



Εικόνα 3: *The Eden Project- Cornwall, England*



Εικόνα 4: The Eden Project- Cornwall, England



Εικόνα 5: The Eden Project- Cornwall, England



Εικόνα 6: Tacoma Washington USA



Εικόνα 7: Tacoma Washington USA



Εικόνα 8: Tacoma Washington USA

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. J., *Shell Architecture*, Rheinhold, New York, 1963.
2. Melaragno M., *An Introduction to Shell Structures*, Van Nostrand Rheinhold, 1991.
3. Borrego J., *Space Grid Structures*, The Massachusetts Institute of Technology, 1968.
4. Bunni, U.K., Disney P., Makowski Z.S., *Multi-Layer Space Frames*, Constrado, April 1980.
5. Chilton J.C., *Space Grid Structures*, Architectural Press, Oxford, 2000.
6. Nooshin H., (ed), *Studies in Space Structures*, Multi Science Publishing Company Ltd, Essex, 1991.