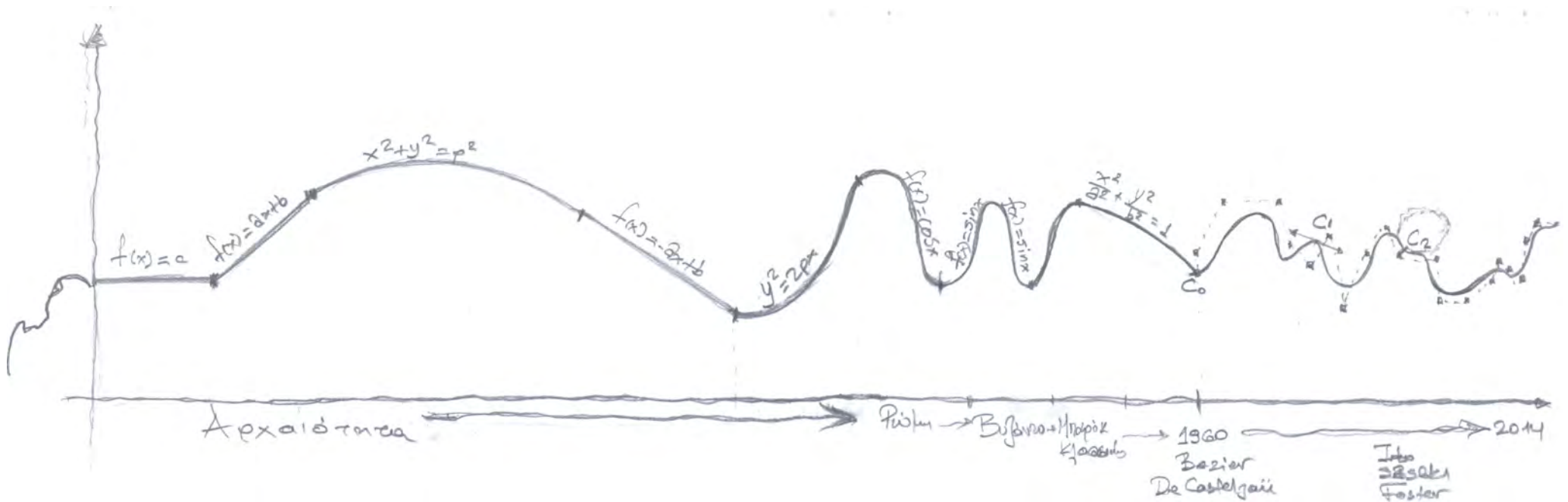


ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΚΑΙ ΟΓΚΩΝ



Διάλεξη της σπουδαστικής ομάδας

Ηλίας Παταγάνας (04107674)

Παντελής Στεφανής (04107673)

Επιβλέπων μέλος ΔΕΠ

Καθηγητής Δημήτρης Παπαλεξόπουλος

Ακαδ. έτος 2013-2014

Θερινό Εξάμηνο

Σημειώσεις του Αναγνώστη

A series of horizontal dotted lines for taking notes.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος.....	6
Σύντομα ιστορικά στοιχεία καμπύλων μορφών στην αρχιτεκτονική.....	8
Από την Αρχαιότητα έως τον 20ο αιώνα	8
Παραμετρική παράσταση καμπυλών.....	12
Καμπύλες Bézier.....	12
Τετραγωνικές Καμπύλες Bézier.....	12
Καμπύλες Bezier n-οστού βαθμού.....	13
Πολυώνυμα Bernstein.....	14
Ιδιότητες Καμπυλών Bezier.....	15
Ομαλή Συνένωση Καμπυλών Bézier.....	15
Έργα παραμετρικού σχεδιασμού. Γεωμετρική & κατασκευαστική Ανάλυση.....	18
Εισαγωγή.....	18
Τογο Ito. Το κρεματόριο “Meiso no Mori ” στην Kakamigahara της Ιαπωνίας.....	18
Το τελικό προϊόν της μελέτης ως αποτέλεσμα της συνεργασίας Αρχιτέκτονα & Πολιτικού Μηχανικού.....	20
Τα στάδια κατασκευής του έργου.....	22
Αρχική Χωροστάθμιση - Χαράξεις.....	22
Θεμελίωση.....	24
Πλάκες & Τοιχοποιίες.....	24
Προσωρινές Κατασκευές για τη διευκόλυνση της εργασίας (Πλατφόρμες εργασίας).....	24
Δεύτερο στάδιο χαράξεων.....	24
Δομική ανάλυση της κατασκευής και χάραξη των κατασκευαστικών στοιχείων στα προσωρινά επίπεδα.....	26
Βασικές - διαμήκεις νευρώσεις του ξυλότυπου οροφής.....	26
Δευτερεύουσες - εγκάρσιες νευρώσεις του ξυλότυπου οροφής.....	28
Ευλότυπος των Κωνικών υποστηλωμάτων.....	28
Τοποθέτηση οπλισμού και σκυροδέτηση.....	30
Αφαίρεση του ξυλότυπου.....	30
Εξωτερικά Υαλοστάσια.....	30
MOS Architects. Το κουκλοθέατρο στο « Le Corbusier’s Carpenter Center».....	32
Εισαγωγικά.....	32
Από το ψηφιακό μοντέλο στην κατασκευή.....	32
Από τον υπολογιστή στην προκατασκευή και το εργοτάξιο.....	32
Βελτιστοποίηση της ψηφιακής σχεδίασης και της κατασκευαστικής διαδικασίας.....	34

<i>Arata Isozaki. Εθνικό συνεδριακό κέντρο στη Ντόχα</i>	36
Συνθετικά στοιχεία.....	36
Η στατική λειτουργία της πρόσοψης του κτιρίου – Γενικά στοιχεία.....	36
Βασικά στάδια κατασκευής του έργου.....	38
Χάραξη του οικοπέδου και στήσιμο των πυλώνων.....	38
Κατασκευή και εγκατάσταση οροφής.....	38
Δενδροειδή Υποστυλώματα.....	40
Ψηφιακός Σχεδιασμός.....	40
Από την οθόνη στο εργοτάξιο. Αρχικές προσεγγίσεις.....	40
Η τελική επιλογή.....	42
Εξαγωγή των τεμαχίων της κατασκευής από το Rhino.....	44
Ανάλυση της επιφάνειας σε μικρότερα τμήματα.....	44
Δημιουργία επίπεδων δισδιάστατων μορφών που προκύπτουν από το τρισδιάστατο μοντέλο.....	46
Μεταφορά και τοποθέτηση των κλαδιών στο κτήριο.....	46
Απομάκρυνση των βοηθητικών πυλώνων.....	48
Σκυροδέτηση πλάκας.....	50
Τοποθέτηση εξωτερικού κελύφους.....	52
Υαλοστάσια.....	52
Συμπεράσματα	54
Σχεδιασμός και οικοδομική ανάλυση.....	54
Ο ρόλος του αρχιτέκτονα.....	54
Κόστος.....	54
Υλικά.....	54
Ενεργειακό Κόστος.....	54
Τεχνολογία.....	54
Πλεονεκτήματα.....	54
Βιβλιογραφία	56

Πρόλογος

Σκοπός της διάλεξης είναι η γεωμετρική ανάλυση καθώς και η προσέγγιση της μεθόδου κατασκευής επιφανειών και όγκων με σύνθετη καμπυλότητα. Τα σύγχρονα αρχιτεκτονήματα που φέρουν τέτοιου είδους γεωμετρικά στοιχεία χαρακτηρίζονται συνήθως ως «παραμετρικές κατασκευές», αφού το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των συνθετικών επιλογών του αρχιτέκτονα έχει ως πυρήνα λειτουργίας την διαρκή μεταβολή στις παραμέτρους των καμπύλων γραμμών από τις οποίες παράγονται οι σύνθετες καμπύλες επιφάνειες και όγκοι. Η μεγάλη εξέλιξη των «παραμετρικών» αρχιτεκτονημάτων εντοπίζεται στις τελευταίες 4-5 δεκαετίες και συμβαδίζει σε μεγάλο βαθμό με την εξέλιξη της πληροφορικής και του Hardware. Ωστόσο, με βάση μια πιο εμπειρική προσέγγιση, οι παραμετρικές επιφάνειες έχουν τις ρίζες τους πολύ παλιότερα, ακόμη και στην αρχαία εποχή με πιο χαρακτηριστικό εκπρόσωπο τα πλοία.

Ξεκινώντας, λοιπόν, από την ιστορική αφετηρία των συγκεκριμένων μορφών θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια πολύ σύντομη ανασκόπηση στις πιο βασικές και χαρακτηριστικές μορφές έως το 1950 περίπου και στη συνέχεια να εξετάσουμε τις σύγχρονες μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής. Χαρακτηριστικός σταθμός αποτελεί η μαθηματική μοντελοποίηση των καμπύλων γραμμών και επιφανειών στην αυτοκινητοβιομηχανία από τους Γάλλους Μηχανικούς P. de Casteljau (μηχανικός στην αυτοκινητοβιομηχανία Citroën) και P. Bézier (μηχανικός στην αυτοκινητοβιομηχανία Renault) που περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Με βάση το παραπάνω θεωρητικό υπόβαθρο στη συνέχεια θα εξετάσουμε από τη σκοπιά τόσο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού όσο και της κατασκευαστικής μεθόδου τρία πολύ χαρακτηριστικά έργα της τελευταίας δεκαετίας. Το πρώτο είναι το κρεματόριο στην Kakamigahara της Ιαπωνίας (Toyo Ito, 2006), το δεύτερο είναι το κοιτοβόθαι

τρο Puppet Theater στο Carpenter Centre for the Visual Arts (MOS Architects, 2004) και το τελευταίο έργο που θα εξετάσουμε είναι το Εθνικό συνεδριακό κέντρο στην πανεπιστημιούπολη της Doha (Arata Isozaki, 2008)

Σε ό,τι έχει να κάνει με το σχεδιασμό των παραπάνω κτιρίων θα προσπαθήσουμε με όσα στοιχεία διαθέτουμε να αναγνώσουμε διεξοδικά τη λογική της αρχιτεκτονικής σύνθεσης με παραμετρικά καμπύλα στοιχεία και κυρίως με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο του κεφαλαίου 3. Για την κατασκευή τους θα προσεγγίσουμε τις δυσκολίες που προκύπτουν κατά την «μεταφορά» του τρισδιάστατου μοντέλου του από τον υπολογιστή στο εργοτάξιο, το ρόλο του αρχιτέκτονα κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τις μεταβολές στον αρχικό σχεδιασμό με βάση τις στατικές απαιτήσεις της κατασκευής, το κόστος κατασκευής (οικονομικό και ενεργειακό), το χρόνο που απαιτείται και την τεχνολογία των υλικών και των ηλεκτρονικών και μηχανικών μέσων (εργαλεία, Η/Υ, μηχανήματα). Επίσης θα εστιάσουμε ιδιαίτερα στις κατασκευαστικές μεθόδους με τις οποίες επιτυγχάνεται η σύνθετη καμπυλότητα σε τμήματα του κάθε έργου.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διάλεξης παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τη σπουδή των τριών έργων και ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της κατασκευαστικής οργάνωσης, τόσο για τα συγκεκριμένα έργα, όσο και για τα «παραμετρικά αρχιτεκτονήματα» εν γένει.



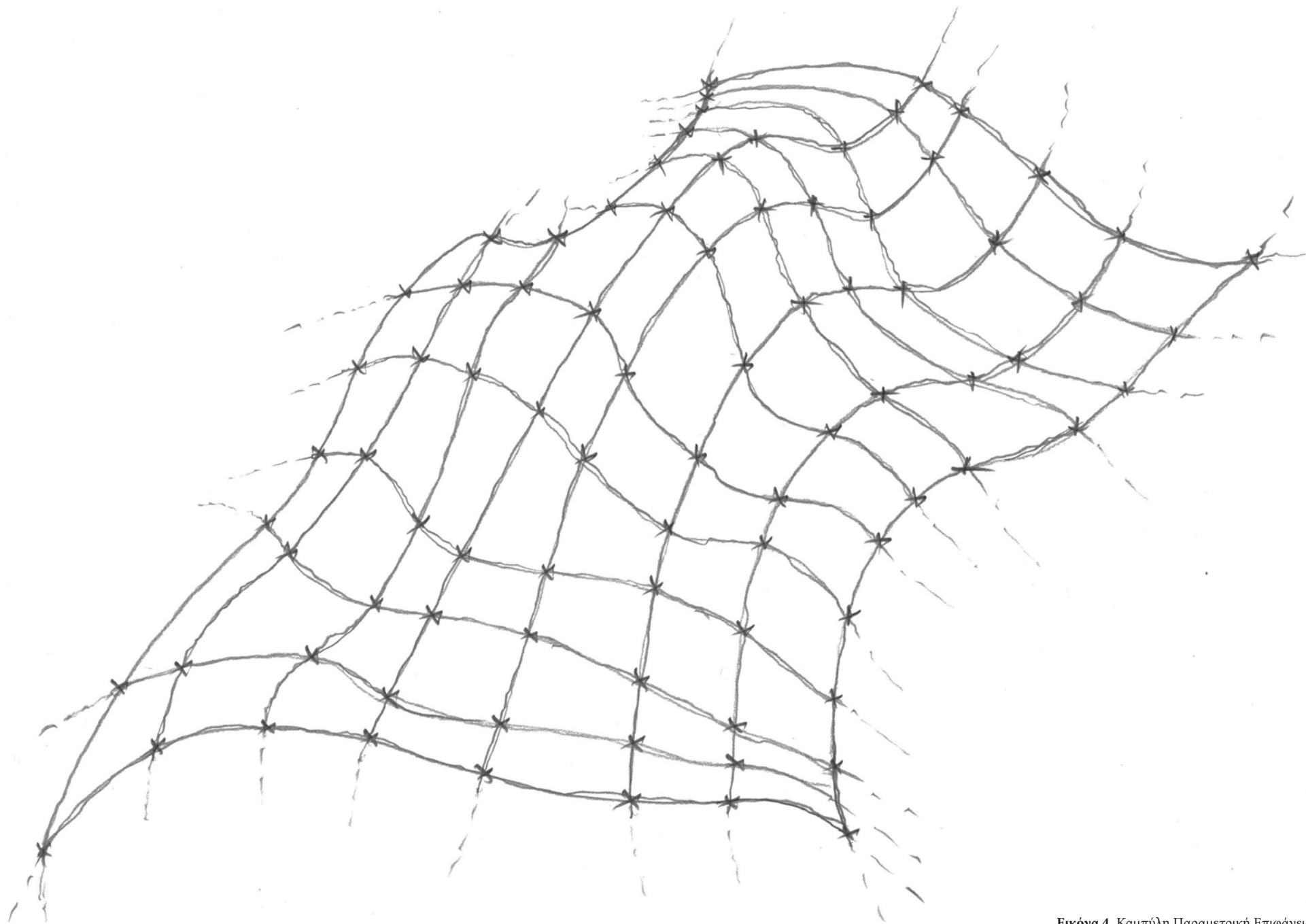
Εικόνα 1. Το κρεματόριο “Meiso no Mori” στην Kakamigahara της Ιαπωνίας



Εικόνα 2. Το κοιτοβόθαι στο Carpenter Centre for the Visual Arts



Εικόνα 3. Το Εθνικό συνεδριακό κέντρο στην πανεπιστημιούπολη της Doha



Εικόνα 4. Καμπύλη Παραμετρική Επιφάνεια

Σύντομα ιστορικά στοιχεία καμπύλων μορφών στην αρχιτεκτονική

Από την Αρχαιότητα έως τον 20ο αιώνα

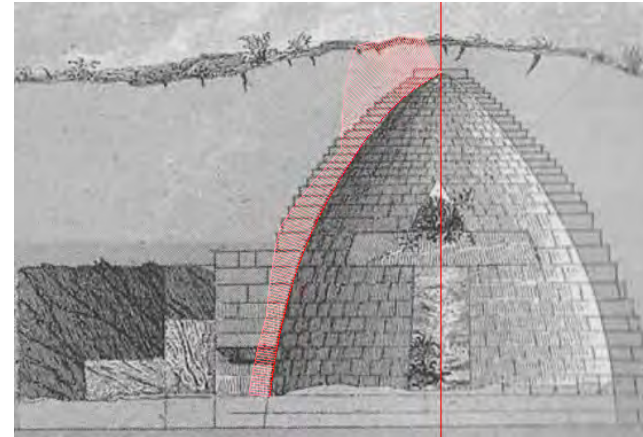
Η καμπύλη στην αρχιτεκτονική έτυχε ευρείας χρήσης από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Οι βασικοί λόγοι που οδήγησαν τους τότε αρχιτέκτονες στην επιλογή καμπύλων μορφών ποικίλουν ανάλογα με τα διαθέσιμα υλικά, τα οικονομικά δεδομένα, τις αισθητικές και λειτουργικές απαιτήσεις του κάθε κτηρίου.

Στην αρχαία Ελλάδα συναντάμε λίγες θολωτές κατασκευές, όπως ο τάφος του Ατρέα, οι σύριγγες στην Ακρόπολη της Τύρινθας, ο Θόλος της Επιδαύρου, το Πρωτανείο στους βόρειους πρόποδες της Αθηναϊκής Ακρόπολης και άλλα. Αντίθετα, στην αρχαία Ρώμη τα τόξα και οι θόλοι είναι ένα από τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής της. Το βασικό στοιχείο που ενισχύει την κατασκευή καμπύλων μορφών είναι η μαζική χρήση ξυλότυπων στους οποίους εφαρμόζονται διάφορα υλικά, όπως χυτά κονιάματα, τούβλα κλπ, χωρίς ωστόσο να εγκαταλείπεται η μαστορική των λίθινων κατασκευών με κλειδιά. Ο βασικός λόγος χρήσης των καμπύλων κατασκευών είναι η γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων για τα οποία δεν υπάρχει δυνατότητα κατασκευής με το σύστημα δοκού επί στυλών, όπως υδραγωγεία, γέφυρες, θέρμες, κτίρια θρησκευτικών λειτουργιών. Ακόμη μαζικότερη χρήση θολωτών κατασκευών συναντάται στη βυζαντινή περίοδο στη ναοδομία αλλά και σε κτίρια μεγάλης κλίμακας. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη βυζαντινή περίοδο επιτυγχάνεται ο γεωμετρικά βέλτιστος συγκερασμός τετραγωνικής κάτοψης με ημισφαιρικό τρούλο, χωρίς τις απλοποιήσεις των προηγούμενων περιόδων (σφαιρικός τρούλος πάνω σε οκταγωνική κάτοψη) με τη χρήση των σφαιρικών τριγώνων (λοφίων). Η απουσία φυσικής ξυλείας

(για την κατασκευή στεγών) ήταν εν γένει σοβαρός λόγος για τον οποίο η Ελληνική παραδοσιακή (κυρίως των νησιών) αρχιτεκτονική έχει να δώσει πολύ πλούσιο υλικό για τη μελέτη των θολωτών κατασκευών.

Αν ασχοληθούμε με τη γεωμετρία των θολωτών κατασκευών για όλες τις παραπάνω περιόδους θα διαπιστώσουμε ότι οι καμπύλες επιφάνειες είναι είτε τμήματα κυλίνδρου (τόξα, σταυροθόλια κλπ), είτε τμήματα σφαιρας (τρούλοι, λοφία κλπ), είτε προέρχονται από καμπύλες εκ περιστροφής (τάφος του Αγαμέμνονα). Όλες οι καμπύλες στις οποίες αναλύονται οι θολωτές αυτές κατασκευές είναι αυστηρές καμπύλες που προέρχονται από την Ευκλείδεια γεωμετρία και φέρουν μια μαθηματική εξίσωση που τις περιγράφει από την αρχή έως το τέλος τους (κύκλος, έλλειψη, παραβολή, υπερβολή, κλπ). Σε καμιά περίπτωση δεν συναντάμε καμπύλες κατασκευές που να διαμορφώνονται από διασταυρούμενες «ελεύθερες» καμπύλες στο χώρο των οποίων η καμπυλότητα να αλλάζει φορά. Μεγάλης κλίμακας κατασκευές με ελεύθερη-σύνθετη καμπυλότητα και στις δύο διευθύνσεις, με άλλα λόγια η κάθε τομή τόσο στον άξονα Χ-Χ' όσο και στον άξονα Υ-Υ' να διαφέρει από κάθε άλλη τομή στον ίδιο άξονα, συναντάμε μόνο στην ναυπηγική της κάθε περιόδου και σε μικρής κλίμακας κατασκευές (γλυπτική, κιονόκρανα, αρχιτεκτονικά μέλη κλπ).

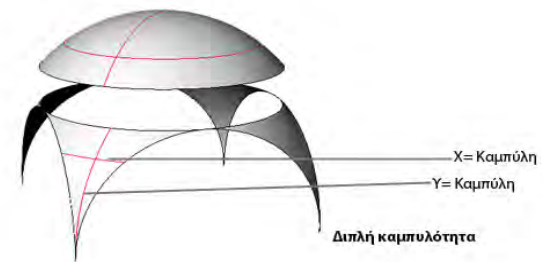
Στη σύγχρονη εποχή, η σύνθετη καμπυλότητα συναντάται μαζικά αρχικά στην αεροναυπηγική και ακολούθως στο σχεδιασμό του κελύφους αυτοκινήτων. Η μαθηματική μοντελοποίηση σύνθετων καμπύλων και επιφανειών χρονολογείται περίπου στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και οδεύει παράλληλα με την ευρεία διάδοση Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και κατασκευαστικών μηχανών καθοδηγούμενων από αυτούς (CNC Manufacturing, CAD/CAM). Το μαθηματικό υπόβαθρο διατυπώθηκε από τους P. de



Εικόνα 5. Ο τάφος του Ατρέα. Ο όγκος του προκύπτει από την περιστροφή τμήματος παραβολής γύρω από τον άξονα που ορίζει το κέντρο της βάσης του



Εικόνα 6. Καμπύλες μορφές στην αρχιτεκτονική της Ρωμαϊκής περιόδου. Η αψίδα του Τίτου στη Ρώμη



Εικόνα 7. Σύνθετη καμπυλότητα επιφανειών σε αρχιτεκτονικές μορφές της Βυζαντινής περιόδου. Τα σφαιρικά τρίγωνα



Εικόνα 8. Παραδοσιακό σπίτι με καμάρες στο Αιγαίο

Casteljau (μηχανικός στην αυτοκινητοβιομηχανία Citroën) και P. Bézier (μηχανικός στην αυτοκινητοβιομηχανία Renault).

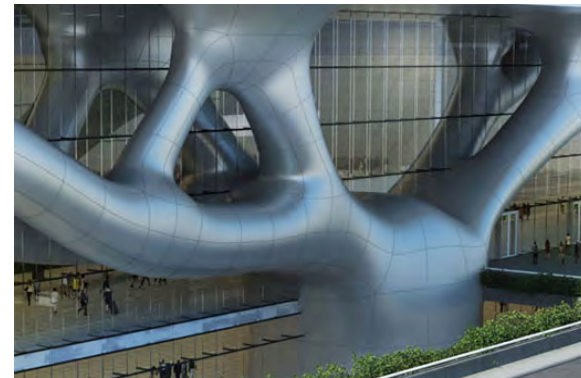
Η αυτοματοποιημένη μαζική παραγωγή στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροπορική βιομηχανία, καθώς και τα πρωτοποριακά εργαλεία ψηφιακού σχεδιασμού έδωσαν αρκετά ερείσματα στους σύγχρονους αρχιτέκτονες για το σχεδιασμό ρευστών επιφανειών και όγκων. Ο σχεδιασμός τέτοιων δομών είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μόνο με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή καθώς υπάρχει η δυνατότητα αφενός της τρισδιάστατης ψηφιακής αναπαράστασης των σχεδιαζόμενων στοιχείων και αφετέρου της ανάλυσης της μορφής τους σε επιμέρους γεωμετρικά στοιχεία. Σε σχέση με την κατασκευή των παραμετρικών αρχιτεκτονημάτων η κατασκευή των επιμέρους δομικών στοιχείων επιτυγχάνεται ακριβέστερα με τη χρήση μηχανών CNC που συνεργάζονται με τα σχεδιαστικά προγράμματα. Ακόμα όμως και με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας υπάρχουν παράγοντες που καθιστούν οικονομικά ασύμφορη την κατασκευή τέτοιων κτηρίων σήμερα. Ωστόσο, η τάση για τρισδιάστατο παραμετρικό σχεδιασμό και ψηφιακή αυτοματοποιημένη κατασκευή δομικών στοιχείων (3d Plotting, 3d Routing) κατά τη γνώμη μας θα αποτελεί όχι μόνο προοπτικό αντικείμενο γνώσης για το σύγχρονο αρχιτέκτονα αλλά και αντικείμενο οικιακής ενασχόλησης για αρκετές καθημερινές λειτουργίες των ανθρώπων του 21ου αιώνα (βλ. κεφάλαιο συμπερασμάτων).



Εικόνα 9. Massimiliano Fuksas. Το μνημείο της οικογένειας Nardini στην Ιταλία



Εικόνα 10. Frank O. Gehry. Το συναυλιακό κέντρο της Walt Disney στο Los Angeles των Ηνωμένων Πολιτειών



Εικόνα 11. Arata Isozaki. Το Εθνικό συνεδριακό Κέντρο στη Doha. Φωτορεαλιστική αναπαράσταση της εισόδου με τα “δενδροειδή υποστυλώματα”



Εικόνα 12. Ένα ιστορικό αυτοκίνητο. Το Renault 4CV. Το εξωτερικό του κελύφος αποτελείται από παραμετρικές επιφάνειες διαφορετικών βαθμών συνέχειας κατά τόπους.

Παραμετρική παράσταση καμπυλών

Με τη χρήση παραμετρικών καμπυλών επιτυγχάνεται με απλό μαθηματικό τρόπο ο ορισμός μιας καμπύλης οποιουδήποτε βαθμού κάνοντας χρήση σημείων ελέγχου και φυσικά το τελικά παραγόμενο σχήμα έχει σαφή εξάρτηση από τα επιθυμητά σημεία ελέγχου. Η παραμετρική παράσταση των καμπυλών διαφέρει από την αλγεβρική παράσταση καμπυλών είτε απλής μορφής $y=f(x)$ όπως για παράδειγμα είναι η ευθεία $y=ax+b$ είτε πευλεγμένης μορφής $g(x,y)=0$ όπως είναι η ευθεία $ax+by+c=0$. Οι συντεταγμένες κάθε σημείου της καμπύλης δίνονται με δύο ξεχωριστές εξισώσεις και με τη βοήθεια μιας νέας και ανεξάρτητης παραμέτρου t η οποία κινείται εντός εξ' αρχής ορισμένου αριθμητικού διαστήματος. Συγκεκριμένα, οι συντεταγμένες μιας καμπύλης αποδίδονται ως εξής:

$$x=x(t)$$

$$y=y(t)$$

για $t \in (-\infty, +\infty)$ ή $t \in [a, b]$, ενώ για κάθε τιμή της παραμέτρου t υπάρχει ένα μοναδικό σημείο της καμπύλης το οποίο αποδίδεται ως :

$$\bar{P}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}$$

με βάση τα παραπάνω μπορούμε εύκολα να αναπαραστήσουμε παραμετρικά την εξίσωση μιας ευθείας η οποία διέρχεται από τα (επίσης

με παραμετρικό τρόπο αναπαριστώμενα) σημεία

$$\bar{P}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \text{ και } \bar{P}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}. \text{ Ξεκινώντας από}$$

την αλγεβρική αναπαράσταση της ευθείας καταλήγουμε στο παρακάτω σύστημα

$$\begin{aligned} x(t) &= (1-t)x_1 + tx_2 \\ y(t) &= (1-t)y_1 + ty_2 \end{aligned} \quad \text{καθώς}$$

$$t \in (-\infty, +\infty)$$

το οποίο μπορεί να αποκτήσει την παρακάτω συνεπιγυμένη μορφή:

$$\bar{P}(t) = (1-t)\bar{P}_1 + t\bar{P}_2 \quad \text{καθώς}$$

$t \in (-\infty, +\infty)$ Εάν περιοριστεί το διάστημα εντός του οποίου κινείται η παράμετρος t με δυο σταθερές τιμές τότε η εξίσωση $\bar{P}(t)$ αναπαριστά ένα ευθύγραμμο τμήμα $\bar{P}_1\bar{P}_2$, ενώ ταυτόχρονα η παραμετρική εξίσωση παρεμβολής των σημείων \bar{P}_1 και \bar{P}_2 είναι η:

$$\bar{P}(t) = (1-t)\bar{P}_1 + t\bar{P}_2 \quad \text{καθώς } t \in [0, 1] \quad [1]$$

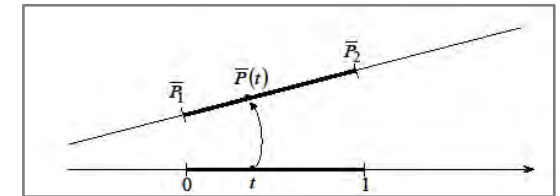
για τις οριακές τιμές $t=0$ και $t=1$ μας δίνει αντίστοιχα τα σημεία \bar{P}_1 και \bar{P}_2 .

Η παραμετρική εξίσωση [1] για την αναπαράσταση του ευθύγραμμου τμήματος $\bar{P}_1\bar{P}_2$ έχει ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι της

αλγεβρικής αναπαράστασης τα σημαντικότερα από τα οποία είναι:

- Η δυνατότητα περιγραφής κλειστών καμπυλών.
- Η ανεξαρτησία των συντεταγμένων μεταξύ τους με βάση την οποία μπορεί να γίνει άμεση εφαρμογή συσχετισμένων μετασχηματισμών.
- Η ευκολία επέκτασης σε περισσότερες διαστάσεις.
- Η σχετική ανεξαρτησία από το σύστημα συντεταγμένων.

Εικόνα 13. Ευθύγραμμο τμήμα αναπαριστώμενο με παραμετρική εξίσωση



Καμπύλες Bézier

Τετραγωνικές Καμπύλες Bézier

Πρόκειται για καμπύλες παρεμβολής τριών σημείων \bar{P}_0, \bar{P}_1 και \bar{P}_2 οι οποίες κατασκευάζονται ως εξής: Αρχικά πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων \bar{P}_0 και \bar{P}_1 . Το προϊόν της παρεμβολής είναι ένα νέο σημείο το \bar{P}_0 . Ακολούθως γίνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων \bar{P}_1 και \bar{P}_2 και προκύπτει

το σημείο \bar{P}_1 . Προφανώς οι γραμμικές παρεμβολές πραγματοποιούνται για συγκεκριμένο λόγο t ο οποίος κινείται εντός του διαστήματος $[0,1]$ και στις ακραίες τιμές $t=0$ και $t=1$ συμπίπτει με τα σημεία \bar{P}_0 και \bar{P}_1 αντίστοιχα για την πρώτη παρεμβολή και με τα σημεία \bar{P}_1 και \bar{P}_2 στη δεύτερη περίπτωση. Στη συνέχεια γίνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων \bar{P}_0 και \bar{P}_1 με τον ίδιο ακριβώς λόγο t με τον οποίο έγιναν οι αρχικές παρεμβολές, οπότε προκύπτει το σημείο \bar{P}_0^2 το οποίο αποτελεί και το επιθυμητό σημείο της τετραγωνικής καμπύλης Bézier. Η παραπάνω παρεμβολή γίνεται για πλήθος τιμών ¹ της παραμέτρου $t \in [0,1]$ και έτσι προκύπτει η τετραγωνική καμπύλη.

Η μαθηματική - παραμετρική έκφραση τόσο των αρχικών γραμμικών παρεμβολών όσο και της τελικής μπορούν να εκφραστούν με βάση τη σχέση [1] ως εξής:

Παρεμβολές των σημείων \bar{P}_0, \bar{P}_1 και \bar{P}_1, \bar{P}_2 αντίστοιχα²

$$\bar{P}_0^1(t) = (1-t)\bar{P}_0 + t\bar{P}_1$$

$$\bar{P}_1^1(t) = (1-t)\bar{P}_1 + t\bar{P}_2, \quad t \in [0,1]$$

Παρεμβολή των σημείων $\bar{P}_0^1(t)$ και $\bar{P}_1^1(t)$ με τον ίδιο λόγο t το προϊόν της οποίας είναι μια

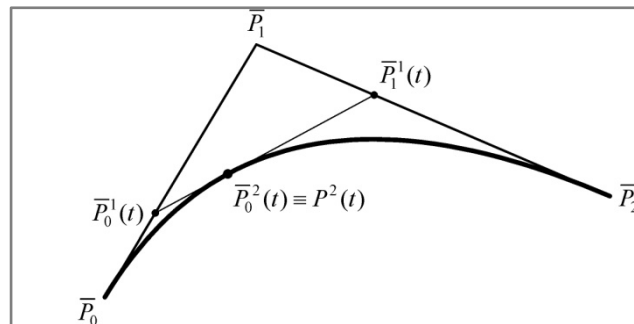
τετραγωνική συνάρτηση των αρχικών σημείων \bar{P}_0, \bar{P}_1 και \bar{P}_2 .

$$\begin{aligned} \bar{P}_0^2(t) &= (1-t)\bar{P}_0^1 + t\bar{P}_1^1 \\ &= (1-t)^2\bar{P}_0 + 2t(1-t)\bar{P}_1 + t^2\bar{P}_2 \end{aligned}$$

και κάνοντας χρήση του αθροίσματος σειράς και του διωνύμου του Νεύτωνα προκύπτει τελικά

$$\bar{P}_0^2(t) = \sum_{i=0}^2 \binom{2}{i} t^i (1-t)^{2-i} \bar{P}_i$$

[2].



Εικόνα 14. Τετραγωνική Καμπύλη Bézier. Τα σημεία \bar{P}_0, \bar{P}_1 και \bar{P}_2 αποτελούν σημεία ελέγχου της καμπύλης

Καμπύλες Bézier n-οστού βαθμού

Πριν κάνουμε τη γενίκευση του τρόπου παρεμβολής για τις καμπύλες Bézier n-οστού βαθμού καλό είναι να περιγράψουμε τη διαδικασία που ακολουθείται για τις κυβικές καμπύλες Bézier ώστε να είναι ακόμη πιο

εύκολη η κατανόηση του γενικευμένου αλγορίθμου κατασκευής.

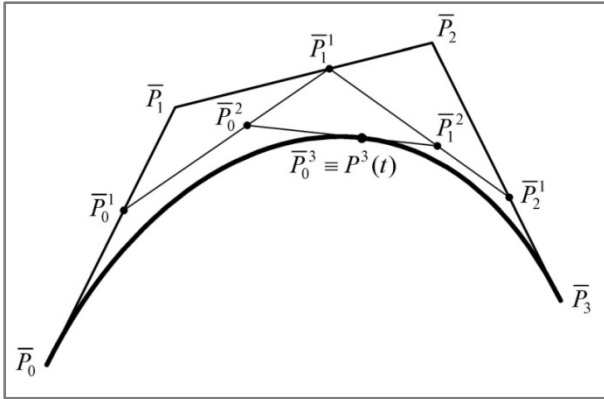
Για την κατασκευή μιας κυβικής καμπύλης Bézier απαιτούνται τέσσερα σημεία ελέγχου $\bar{P}_0, \bar{P}_1, \bar{P}_2$ και \bar{P}_3 . Ακολουθώντας κατ'αναλογία τη διαδικασία για τις τετραγωνικές καμπύλες έχουμε τα εξής βήματα:

Αρχικά παρεμβάλλουμε τα σημεία \bar{P}_0 και \bar{P}_1 για συγκεκριμένη τιμή του t οπότε λαμβάνουμε το σημείο \bar{P}_0^1 . Στη συνέχεια παρεμβάλλουμε τα σημεία \bar{P}_1 και \bar{P}_2 για την ίδια ακριβώς τιμή του t με την οποία παρεμβλήθηκαν τα σημεία \bar{P}_0 και \bar{P}_1 , οπότε λαμβάνουμε το σημείο \bar{P}_1^1 .

Ακολουθώς παρεμβάλλονται τα σημεία \bar{P}_2 και \bar{P}_3 (φυσικά για την ίδια τιμή του t) οπότε λαμβάνουμε το σημείο \bar{P}_2^1 . Στη συνέχεια παρεμβάλλονται (ανά ζεύγη) τα σημεία \bar{P}_0^1, \bar{P}_1^1 και \bar{P}_1^1, \bar{P}_2^1 (τα οποία αποτελούν τα προϊόντα των προηγούμενων παρεμβολών) για τον ίδιο λόγο t και προκύπτουν αντίστοιχα τα σημεία \bar{P}_0^2 και \bar{P}_1^2 . Αν στα δύο τελευταία σημεία ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία τότε προκύπτει το σημείο $\bar{P}_0^3(t)$ της κυβικής καμπύλης Bézier για το δοσμένο λόγο t . Την παραπάνω διαδικασία μπορούμε να τη δούμε γραφικά στην εικόνα που ακολουθεί.

¹ Ένας Ηλεκτρονικός Υπολογιστής πραγματοποιεί αυτή τη διαδικασία εκατομμύρια φορές ανάλογα με τον αλγόριθμο που υπαγορεύεται από το εκάστοτε λογισμικό.

² Τα σημεία \bar{P}_0, \bar{P}_1 και \bar{P}_2 ονομάζονται σημεία ελέγχου της καμπύλης



Εικόνα 15. Γραφική αναπαράσταση κυβικής καμπύλης Bezier

Γενικεύοντας τον αλγόριθμο κατασκευής μπορούμε να πούμε ότι μια καμπύλη Bezier βαθμού n , $P^n(t)$ μπορεί να κατασκευαστεί από $n+1$ το πλήθος σημεία ελέγχου $\bar{P}_0, \bar{P}_1, \dots, \bar{P}_n$ και η τελική παραμετρική της έκφραση θα είναι:

$$P^n(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \bar{P}_i \quad \text{για } t \in [0,1].$$

[3].

Η τελευταία μαθηματική σχέση είναι ασύμφορη υπολογιστικά σε σχέση με το υπολογιστικό "κόστος" που έχει η αλγοριθμική προσέγγιση της βηματικής γραμμικής παρεμβολής. Για την αριθμητική εφαρμογή εύρεσης σημείου μιας καμπύλης Bezier σε μια δοσμένη παράμετρο t αρχικά τίθενται

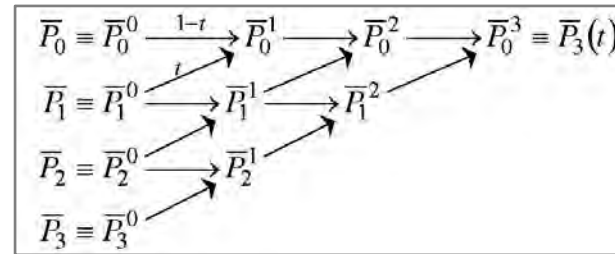
$\bar{P}_i^0(t) = \bar{P}_i$, για $i = 0, 1, \dots, n$ όπου n το πλήθος των σημείων ελέγχου της καμπύλης

και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η επαναληπτική σχέση

$$\bar{P}_i^r(t) = (1-t)\bar{P}_i^{r-1}(t) + t\bar{P}_{i+1}^{r-1}(t) \quad \text{για}$$

$r=1, 2, \dots, n$ και $i=0, 1, \dots, n-r$ οπότε και προκύπτει το ζητούμενο σημείο $\bar{P}_0^n(t) = P^n(t)$

Η παραπάνω αλγοριθμική - υπολογιστική μέθοδος καλείται τρίγωνο του De Casteljau και σχηματική της αναπαράσταση για μια κυβική καμπύλη Bezier φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 16. Τρίγωνο του De Casteljau για κυβική καμπύλη Bezier

Πολυώνυμα Bernstein

Στην εξίσωση [3] (γενικευμένη εξίσωση της καμπύλης Bezier) οι συντελεστές $\sum_{i=0}^n \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$ των \bar{P}_i είναι τα πολυώνυμα Bernstein:

$$B_i^n(t) = \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad \text{τα}$$

οποία έχουν ορισμένες πολύ χρήσιμες ιδιότητες. Πριν αναφερθούμε σε αυτές ας δούμε τις τιμές για ορισμένα πολυώνυμα:

Πολυώνυμα Bernstein 2^{ου} βαθμού

$$B_0^2(t) = \binom{2}{0} t^0 (1-t)^{2-0} = (1-t)^2$$

$$B_1^2(t) = \binom{2}{1} t^1 (1-t)^{2-1} = 2t(1-t)$$

$$B_2^2(t) = \binom{2}{2} t^2 (1-t)^{2-2} = t^2$$

Πολυώνυμα Bernstein 3^{ου} βαθμού

$$B_0^3(t) = \binom{3}{0} t^0 (1-t)^{3-0} = (1-t)^3$$

$$B_1^3(t) = \binom{3}{1} t^1 (1-t)^{3-1} = 3t(1-t)^2$$

$$B_2^3(t) = \binom{3}{2} t^2 (1-t)^{3-2} = 3t^2(1-t)$$

$$B_3^3(t) = \binom{3}{3} t^3 (1-t)^{3-3} = t^3$$

Η γενικευμένη εξίσωση της καμπύλης Bezier με χρήση των πολυωνύμων Bernstein γίνεται

$$P^n(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t) \bar{P}_i$$

Ιδιότητα 1^η: Τα πολυώνυμα Bernstein αποτελούν βάση του διανυσματικού χώρου των πολυωνύμων βαθμού n , δηλαδή οποιοδήποτε πολυώνυμο $f(t)$ το οποίο είναι βαθμού n γράφεται υπό τη μορφή

$$f(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t) c_i, \quad \text{όπου } c_i \text{ κατάλληλοι}$$

συντελεστές, επομένως κάθε πολυωνυμική

καμπύλη

$$f(t) = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_2 t^2 + a_0 t + a$$

βαθμού n μπορεί να γραφεί σε μορφή καμπύλης Bezier.

Ιδιότητα 2^η: Για κάθε n ισχύει ότι $B_i^n(t) \geq 0$

$$\text{και } \sum_{i=0}^n B_i^n(t) = 1$$

Ιδιότητα 3^η: Τα πολυώνυμα Bernstein είναι συμμετρικά ως προς t και $1-t$ δηλαδή

$$B_j^n(t) = B_{n-j}^n(1-t)$$

Ιδιότητες Καμπολών Bezier

Ιδιότητα της κυρτής περιβάλλουσας: Οι καμπύλες Bezier είναι συσχετισμένοι κυρτός συνδυασμός των σημείων ελέγχου αυτής και επομένως βρίσκεται εντός της κυρτής περιβάλλουσας που αυτά ορίζουν.

Ιδιότητα του αναλλοίωτου: Οι καμπύλες Bezier είναι συνδυασμός γραμμικών παρεμβολών των σημείων ελέγχου της και έτσι παραμένει αναλλοίωτη κάτω από συσχετισμένους μετασχηματισμούς. Για να μετασχηματισθεί μια καμπύλη Bezier αρκεί να μετασχηματίσουμε τουλάχιστον ένα σημείο ελέγχου της.

Ιδιότητα του αναλλοίωτου κάτω από συσχετισμένους μετασχηματισμούς της παραμέτρου: Αν μετασχηματίσουμε τη μεταβλητή t σε u , έστω $t \in [0, 1] \rightarrow u \in [a, b]$ και $u = a + (b - a)t$, τότε

$$\bar{P}_i^r(t) = \frac{b-u}{b-a} \bar{P}_i^{r-1}(t) + \frac{u-a}{b-a} \bar{P}_{i+1}^{r-1}(t)$$

Ιδιότητα της κατασκευαστικής συμμετρίας ανεξάρτητα με τη φορά σχεδίασης: Η καμπύλη παραμένει ίδια εάν η σχεδίασή της πραγματοποιηθεί αρχίζοντας από το τελικό σημείο ελέγχου και καταλήξει στο αρχικό.

Ιδιότητα της γραμμικής ακρίβειας: Στην περίπτωση που τα σημεία ελέγχου μιας καμπύλης Bezier είναι συνευθειακά, τότε η καμπύλη γίνεται ευθύγραμμο τμήμα.

Ιδιότητα της παρεμβολής των ακραίων σημείων: Η καμπύλη διέρχεται από τα ακραία σημεία ελέγχου \bar{P}_0 και \bar{P}_n για τις τιμές $t=0$ και $t=1$ αντιστοίχα.

Ομαλή Συνένωση Καμπολών Bézier

Πολλές φορές προκύπτει η ανάγκη να συνενωθούν ομαλά δύο καμπύλες Bézier εκ των οποίων κάθε μια για παράδειγμα μπορεί να αποτελεί το περιγράμμα του κελύφους ενός αρχιτεκτονικού όγκου σε κάποιο επίπεδο τομής. Η αύξηση της ευελιξίας των καμπολών πραγματοποιείται είτε με αύξηση του βαθμού των συνοριακών καμπολών είτε με ομαλή συνένωση καμπολών μικρού βαθμού συνήθως 3^{ου} ή 4^{ου}. Επειδή η πρώτη μέθοδος (αύξηση βαθμού) συνεπάγεται συνήθως αστάθεια αλλά και ταυτόχρονη αύξηση της πολυπλοκότητας κατά κανόνα είναι πιο δόκιμη η χρήση της δεύτερης μεθόδου. Η γεωμετρική συνέχεια δύο πολυωνυμικών καμπολών $F(t)$, $t \in [t_0, t_1]$

και $G(t)$, $t \in [t_1, t_2]$ ενώνονται με συνέχεια C^r στο σημείο t_1 αν οι παράγωγοι r τάξης είναι ίσες στο t_1 , δηλαδή εάν $F^{(r)}(t_1) = G^{(r)}(t_1)$. Η γεωμετρική συνέχεια βαθμού C^r στο σημείο t_1 συνεπάγεται και γεωμετρική συνέχεια για όλους τους υποδεέστερους βαθμούς, δηλαδή $C^r \Rightarrow C^m$ για $0 \leq m \leq r$. Εξ' άλλου για ένα πολυώνυμο βαθμού k η παράγωγος βαθμού k ισούται με μια σταθερά, ενώ όλες οι παράγωγοι μεγαλύτερου βαθμού εκφυλλίζονται και προφανώς το ενδιαφέρον για τις παραγώγους των πολυωνύμων βαθμού k περιορίζεται μέχρι τον $k-1$ βαθμό. Έστω καμπύλες Bézier $P^n(t)$, $t \in [0, 1]$ και $Q^m(t)$, $t \in [1, 2]$ με σημεία ελέγχου $\bar{P}_0 \dots \bar{P}_n$ και $\bar{Q}_0 \dots \bar{Q}_m$ αντιστοίχα. Έστω ότι επιθυμούμε ένωση με συνέχεια βαθμού C^2 :

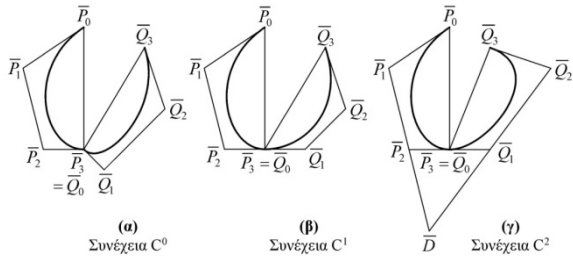
Αρχικά όλες οι παράγωγοι κατώτερου βαθμού πρέπει να είναι ίσες, άρα για τη συνέχεια βαθμού C^0 έχουμε ότι $P_n = Q_0$, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να είναι εξασφαλισμένη η συνέχεια βαθμού C^1 , δηλαδή ότι $n(\bar{P}_n - \bar{P}_{n-1}) = m(\bar{Q}_1 - \bar{Q}_0) \Leftrightarrow \bar{Q}_1 - \bar{P}_n = \frac{n}{m}(\bar{P}_n - \bar{P}_{n-1})$, με άλλα λόγια το σημείο \bar{Q}_1 πρέπει να ανήκει στην ευθεία που ορίζουν τα σημεία \bar{P}_{n-1} και $\bar{P}_n \equiv \bar{Q}_0$ και να βρίσκεται στη απόσταση που ορίζεται. Τέλος για την

εξασφάλιση της συνέχειας C^2 πρέπει να ισχύει

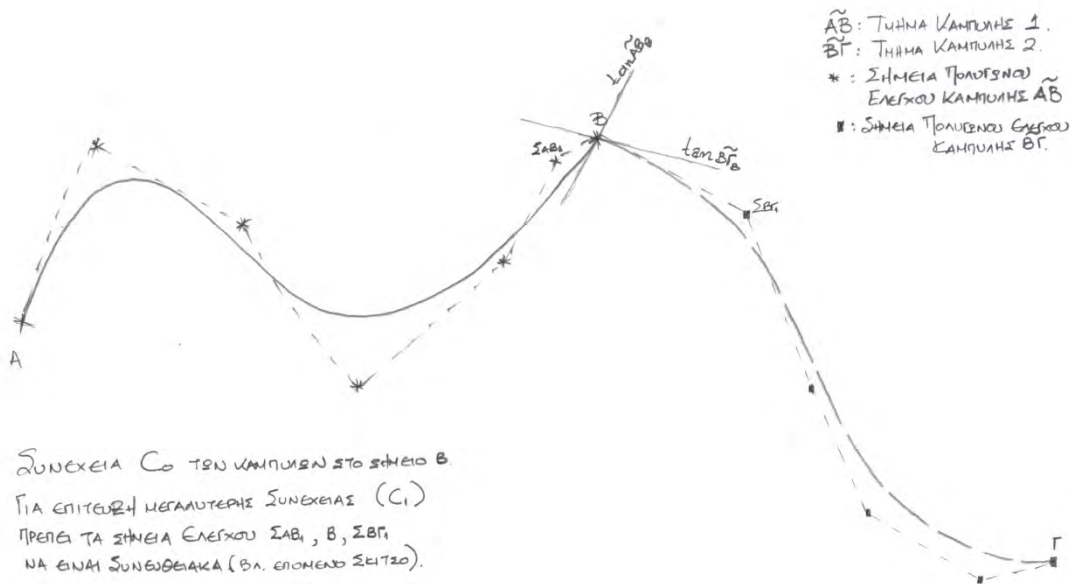
$$n(n-1)(\bar{P}_n - 2\bar{P}_{n-1} + \bar{P}_{n-2}) = m(m-1)(\bar{Q}_2 - 2\bar{Q}_1 + 2\bar{Q}_0)$$

Η τελευταία σχέση μας καθορίζει το σημείο

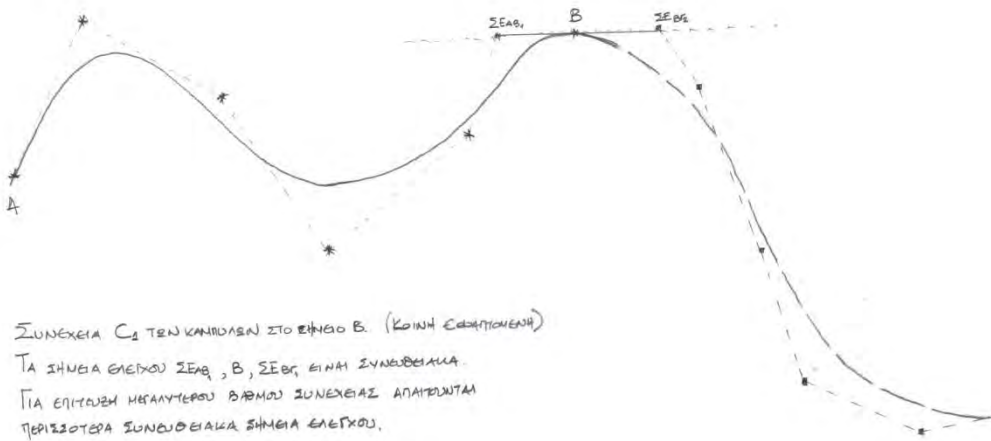
\bar{Q}_2 .



Εικόνα 17. Ομαλή Συνένωση Καμπυλών Bezier. Στο σχήμα φαίνονται οι ενώσεις καμπυλών Bezier με γεωμετρική συνέχεια C^0, C^1, C^2 αντίστοιχα.



Εικόνα 17α. Συνέχεια σημείου (C_0)καμπυλών Bezier



Εικόνα 17α. Συνέχεια εφαπτομένης (C_1) καμπυλών Bezier

Έργα παραμετρικού σχεδιασμού. Γεωμετρική & κατασκευαστική Ανάλυση

Εισαγωγή

Με βάση τα προηγούμενα μαθηματικά εργαλεία θα αναλύσουμε τον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής τριών σύγχρονων έργων των οποίων η μορφή παράχθηκε από παραμετρικές καμπύλες και επιφάνειες. Το βασικά κριτήρια επιλογής των τριών αρχιτεκτονημάτων ήταν αφ' ενός το συνθετικό τους ενδιαφέρον και αφ' ετέρου η υλικότητά τους προκειμένου να εξετάσουμε πώς πραγματοποιείται η κατασκευαστική οργάνωση του κάθε κτηρίου. Πρόκειται για το κρεματοτήριο στην Kakamigahara το οποίο σχεδιάστηκε από τον Ιάπωνα αρχιτέκτονα Toyo Ito, η κατασκευή του οποίου ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 2006 και το υλικό που κυριαρχεί στα παραμετρικά στοιχεία του έργου είναι το ωπλισμένο σκυρόδεμα, το κουκλοθέατρο Puppet Theater στο Carpenter Centre for the Visual Arts (MOS Architects, 2004) που είναι κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά (Plexiglas) και το Εθνικό συνεδριακό κέντρο στη Doha (Arata Isozaki, 2008) στο οποίο τα καμπύλα στοιχεία είναι κατασκευασμένα από μέταλλο.

Toyo Ito. Το κρεματοτήριο "Meiso no Mori" στην Kakamigahara της Ιαπωνίας

Σε αυτό το σημείο θα ασχοληθούμε με ένα χαρακτηριστικό έργο στο οποίο κυριαρχεί το ωπλισμένο σκυρόδεμα στα αδιαφανή οικοδομικά μέλη. Πρόκειται για το κρεματοτήριο στην Kakamigahara το οποίο σχεδιάστηκε από τον Ιάπωνα αρχιτέκτονα Toyo Ito, η κατασκευή του οποίου ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 2006. Το κρεματοτήριο φέρει το όνομα "Meiso no Mori Crematorium" (Δά-

σος του διαλογισμού)

Συνθετικά στοιχεία

Η σύνθεση του κρεματορίου έγινε εντός υφιστάμενου πάρκου στην πόλη Kakamigahara. Βασικός άξονας της σύνθεσης αποτέλεσε η στέγη του κτιρίου της οποίας τα υψόμετρα προσδιορίστηκαν από τις ανάγκες που φιλοξενούνται από κάτω. Ο αρχιτέκτονας προσπάθησε -σε σχέση με την ένταξη του κτιρίου στο υφιστάμενο περιβάλλον αλλά και σε σχέση με τη λειτουργία του - να δώσει μια όσο το δυνατόν φυσική και ρευστή μορφή στον όγκο του κτιρίου. Σε ένα σημείο της παρουσίασης του έργου αναφέρει χαρακτηριστικά ότι η βασική συνθετική ιδέα για την ογκοπλαστική του κτιρίου ήταν τα σύννεφα που είχε δει αρκετές φορές που επισκέφθηκε τον χώρο τα οποία ήθελε να προσεγγίσει σαν μορφή αφού η συγκεκριμένη γεωμετρία θεωρούσε ότι πετυχαίνει τόσο την ένταξη στο φυσικό τοπίο, αλλά ταυτόχρονα βρίσκεται κοντά και στη λειτουργία του κτιρίου (μεταφυσική, θρησκεία). Το εμβαδό του κρεματορίου είναι ίσο με 2270 μ² και είναι τοποθετημένο εντός οικοπέδου 6670 μ². Εν γένει το κτίριο είναι ισόγειο με μεταβλητό ύψος λόγω της μορφής της στέγης, αλλά, σε ορισμένα τμήματά του περιλαμβάνει δύο επίπεδα και φθάνει τα 11,50 μ. Οι χώροι που περιλαμβάνει το κτίριο από άποψη λειτουργίας μπορούν να διακριθούν στους χώρους υποδοχής, προετοιμασίας των συγγενών των θανόντων και «αποχαιρετισμού» των νεκρών οι οποίοι βρίσκονται στην Ανατολική πλευρά του. Κεντροβαρώς βρίσκονται οι χώροι στους οποίους πραγματοποιείται η καύση των νεκρών καθώς και αυτοί που περιέχουν τις ηλεκτρομηχανολογικές διατάξεις για την καύση. Τέλος, στο Βορειοδυτικό βραχίονα του κτηρίου βρίσκονται οι χώροι αναμονής των συγγενών για την παραλαβή των αποτεφρωμένων σωρών. Είναι



Εικόνα 18. Άποψη της καμπύλης-παραμετρικής στέγης του κρεματορίου.



Εικόνα 19. Η πορεία εισόδου στο κρεματοτήριο. Οι παρεμβάσεις που έγιναν στον περιβάλλοντα χώρο ήταν οι ελάχιστες δυνατές.



Εικόνα 20. Άποψη από το εσωτερικό. Το κάσμα των υαλοστασίων ακολουθεί την παραμετρική μορφή της στέγης στην άνω απόληξή του.



Εικόνα 21. Η μορφή της στέγης του κρεματορίου βρίσκεται σε άμεση σχέση με το φυσικό περιβάλλον

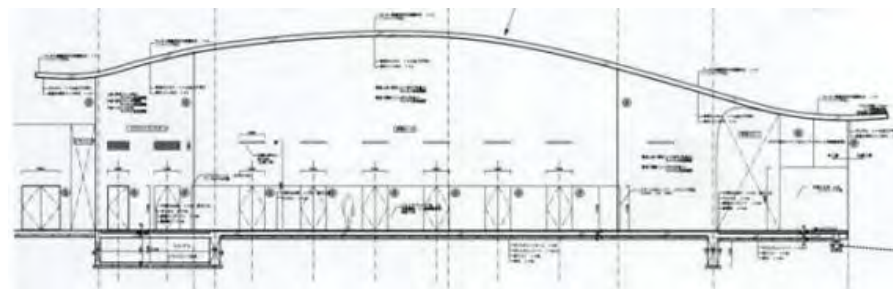
φανερό ότι η μορφή της στέγης του κτιρίου επηρεάστηκε σοβαρά από το απαιτούμενο ύψος των χώρων που βρίσκονται από κάτω της. Έτσι, για παράδειγμα, στο χώρο που θα τοποθετηθούν οι ηλεκτρομηχανολογικές διατάξεις, πολλές εκ των οποίων αναπτύσσονται καθ' ύψος τοποθετήθηκε δεύτερο επίπεδο και η στέγαση του κτιρίου φθάνει τα 11,50 μ. Η βασική συνθετική λογική που φαίνεται να ακολούθησε ο αρχιτέκτονας είναι αρχικά η επίλυση των κατόψεων και δευτερευόντως η μορφοποίηση της στέγης με βάση τις υψομετρικές ανάγκες του κάθε χώρου στην κάτοψη. Σε δεύτερο στάδιο, φυσικά, ενδέχεται να έγιναν αρκετές παρεμβάσεις για την εξομάλυνση των γενετειρών καμπυλών της στέγης, την επίτευξη ακόμη μεγαλύτερης γεωμετρικής λειότητας κλπ, οι οποίες όμως δεν ξέφυγαν από τα βασικά υψόμετρα που απαιτούσαν οι κατόψεις. Σημαντικό ρόλο, επίσης, στην τελική διαμόρφωση τόσο της οροφής όσο και των στοιχείων πλήρωσης έπαιξε η συνεργασία με τον Πολιτικό Μηχανικό του έργου Mutsuro Sasaki.

Το τελικό προϊόν της μελέτης ως αποτέλεσμα της συνεργασίας Αρχιτέκτονα & Πολιτικού Μηχανικού.

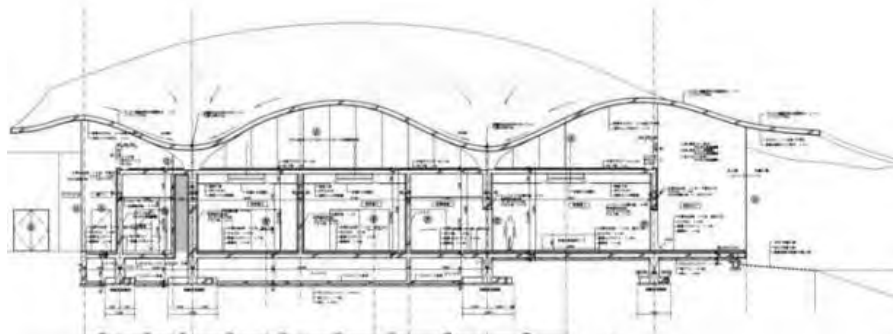
Αν μπορούμε να φανταστούμε τη σειρά του σχεδιασμού που έχει ως αποτέλεσμα την τελική γεωμετρία του κτιρίου τότε θα πρέπει να ξεκινήσουμε από το βασικό στοιχείο το οποίο προκύπτει από την κάτοψη του κτιρίου και τη βασική συνθετική επιλογή για μια ρέουσα μορφή, το οποίο είναι η στέγη του κρεματορίου. Ο αρχικός σχεδιασμός της μορφής έγινε πιθανότατα σε ένα προγραμματιστικό περιβάλλον όπως αυτό του Rhino τοποθετώντας αρχικά ένα επίπεδο σχήμα (πολυγωνικό κατά τόπους αλλά και καμπύλο σε άλλα σημεία) πάνω από τους χώρους που πρόκειται να στεγασθούν. Στη συνέχεια έγινε επανασχεδιασμός (rebuild-αναδόμηση)

του επιπέδου σχήματος με πλήθος γενετειρών ευθειών κατά τους δύο άξονες σχεδιασμού, τόσες ώστε να είναι δυνατή η κατά τόπους καμπύλωσή του μετατοπίζοντας τα σημεία ελέγχου της κάθε ευθείας προκειμένου να παραχθεί η καμπύλη που θα δώσει το επιθυμητό ύψος στον κάθε χώρο και την απαιτούμενη ρέουσα μορφή (Node stretching, Curvature Continuity, Precision point adjustment). Το τελικό προϊόν αυτής της διαδικασίας δόθηκε στον Πολιτικό Μηχανικό Mutsuro Sasaki ο οποίος χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που προσομοιάζει τη λογική της εξέλιξης και οργάνωσης οργανικών δομών από την πλευρά της μηχανικής πραγματοποίησε ορισμένες αλλαγές στο αρχικό γεωμετρικό μοντέλο της στέγης, πάντα σε συνεννόηση με τον Τογο Ιτο και σεβόμενος τις μορφολογικές απαιτήσεις του κτιρίου. Προϊόν της εν λόγω συνεργασίας ήταν και ο προσδιορισμός του πλήθους και της θέσης των υποστυλωμάτων (13 τον αριθμό, δώδεκα κωνικής μορφής και ένα ορθογωνικής) με βάση τα διαγράμματα της κύριας ροπής κάμψης της στέγης και το διάγραμμα κύριας φόρτισης της μεμβράνης της. Σε ό,τι αφορά στη διαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων του κελύφους, το πάχος της οροφής είναι ίσο με 20 εκατοστά ενώ το περιμετρικό υαλοστάσιο έχει πάχος 19 χιλιοστά. Σε όλη την προηγούμενη διαδικασία σημαντικό ρόλο έπαιξε η προσπάθεια να προκύψει ένα όσο το δυνατό οικονομικότερο έργο.

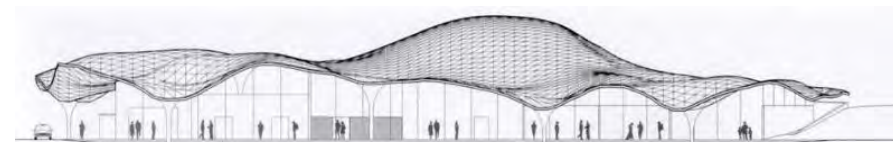
Ωστόσο, φαίνεται ορισμένα στοιχεία του έργου ενδεχομένως να υπαγορεύτηκαν από τα αποτελέσματα και τις απαιτήσεις της στατικής μελέτης με χαρακτηριστικό παράδειγμα την τοποθέτηση φέρουσας τοιχοποιίας σε σχήμα «Π» στη Νοτιοδυτική πλευρά του κτιρίου η οποία ακολουθεί κατά γράμμα την ισχυρά καταπονούμενη περιοχή της στέγης έτσι όπως αυτή εμφανίζεται στο διάγραμμα κύριας ροπής κάμψης. Η επιλογή για την κατασκευή της συγκεκριμένης τοιχοποιίας θα



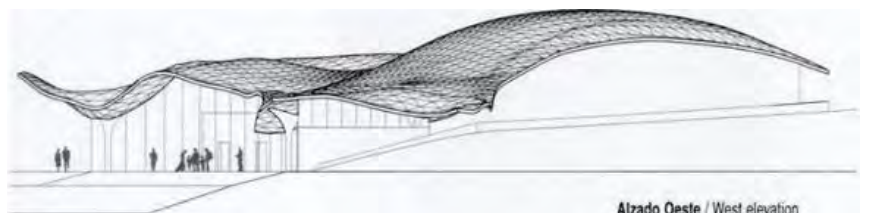
Εικόνα 22. Τομή A-A



Εικόνα 23. Τομή B-B



Εικόνα 24. Όψη κύριας εισόδου του κτιρίου



Εικόνα 25. Δυτική Όψη

Alzado Oeste / West elevation



Εικόνα 26. Κάτοψη ισόγειας στάθμης του κρεματορίου. Αν αντιπαραβληθεί η κάτοψη της στέγης γίνεται εύκολη ανάγνωση της μορφής της με βάση το απαιτούμενο ύψος του κάθε χώρου.

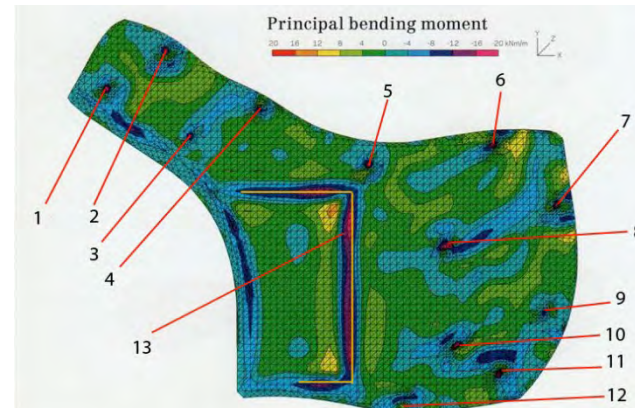
μπορούσαμε να πούμε ότι δεν αποτελούσε συνθετική επιλογή του Αρχιτέκτονα σε αρχικό στάδιο, αντίθετα φαίνεται να είναι περισσότερο προϊόν επιβολής από την στατική μελέτη του κτιρίου. Με αντίστοιχο τρόπο θα μπορούσαμε να διαπιστώσουμε την απουσία καννάβου σχετικά με τα κατακόρυφα φέροντα στοιχεία και την σχεδόν τυχαία οργάνωσή τους με βάση τις απαιτήσεις υποστήριξης της πλάκας οροφής κατά τόπους.

Τα στάδια κατασκευής του έργου

Εάν εξετάσουμε το έργο με βάση τη χρονολογική σειρά των εργασιών θα μπορούσαμε να πούμε ότι διαφέρει αρκετά από μια συμβατική κατασκευή.

Αρχική Χωροστάθμιση - Χαράξεις

Το πρώτο στάδιο είναι η χάραξη του κτιρίου στο οικόπεδο χρησιμοποιώντας τις γνωστές μεθόδους πολυγωνομετρίας (ορισμός τουλάχιστον 2 στάσεων) με βάση ένα αυθαίρετο - τοπικό σύστημα συντεταγμένων (χ,ψ,ζ) που ο αρχιτέκτονας όρισε. Η αρχή του εν λόγω συστήματος συντεταγμένων αποτελεί την υψομετρική αφετηρία (repair) με βάση την οποία γίνονται όλοι οι τελικοί έλεγχοι των υψών του κτιρίου αλλά και την οριζοντιογραφική αφετηρία. Με βάση το αυθαίρετο σύστημα είναι δυνατό να οριστούν στη συνέχεια περισσότερα τοπικά αυθαίρετα συστήματα που χρησιμεύουν για τοπικές χαράξεις (μακριά από την αρχή του αρχικού συστήματος) αλλά βρίσκονται σε εξάρτηση με το αρχικό. Είναι σημαντικό τα στοιχεία χάραξης των τοπικών συστημάτων να ελεγχθούν δειγματοληπτικά σε σχέση με την υψομετρική και οριζοντιογραφική αφετηρία προκειμένου να μην αποφευχθούν τυχόν λάθη (στροφές, ολισθήσεις κλπ).



Εικόνα 27. Διάγραμμα φορτίσεων της πλάκας οροφής. Στα παθογενή σημεία (μωβ) τοποθετήθηκαν τα υποστυλώματα και οι φέρουσες εσωτερικές τοιχοποιίες.



Εικόνα 28. Τομή υποστυλώματος. Το σύστημα απορροής ομβρίων φέρει υδρορόες στον πυρήνα των υποστυλωμάτων οι οποίες απολήγουν αρχικά σε φρεάτια. Οι υδρορόες τοποθετούνται πριν τη σκυροδέτηση.



Εικόνα 29. Σκυροδέτηση της εδαφόπλακας και της εσωτερικής και εξωτερικής τοιχοποιίας (φέρουσες) πριν από τη σκυροδέτηση των υποστυλωμάτων και της πλάκας οροφής.

Θεμελίωση

Αφού, λοιπόν χαράχθηκε το περίγραμμα του κελύφους του κτιρίου έγινε κατά τα γνωστά η εκοκαφή για την κατασκευή της θεμελίωσης. Στη συνέχεια, αφού έγινε η σκυρόστρωση και όλα τα περιμετρικά αποστραγγιστικά συστήματα, κατασκευάστηκε η πλάκα μπετού καθαριότητας πάνω στην οποία χαράχθηκε εκ νέου η θεμελίωση του κτιρίου. Τα θεμέλια και οι εδαφόπλακες δεν διαφέρουν από τις συμβατικές κατασκευές από άποψη γεωμετρίας και τρόπου δόμησης. Το μόνο στοιχείο για το οποίο δόθηκε ιδιαίτερη μέριμνα είναι οι εγκιβωτισμένοι αγωγοί απορροής ομβρίων οι οποίοι στη συνέχεια ανεβαίνουν στον πυρήνα των υποστυλωμάτων για να καταλήξουν στο ανώτατο σημείο τους στην πλάκα οροφής απ' όπου συλλέγουν τα βρόχινα νερά. Οι αγωγοί αυτοί χαράχθηκαν κατά την έννοια της οριζοντιογραφικής όδευσης και τοποθετήθηκαν πριν την σκυροδέτηση της θεμελίωσης.

Πλάκες & Τοιχοποιίες

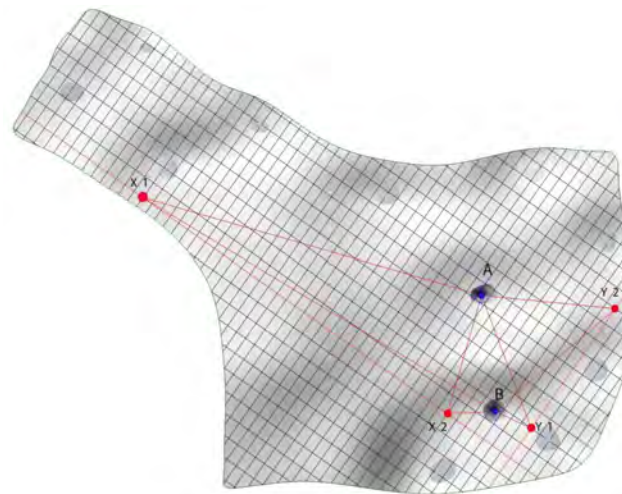
Σε αυτό το σημείο μπορούμε να παρατηρήσουμε αρκετές ιδιαιτερότητες σε ό,τι αφορά στη σειρά των κατασκευαστικών φάσεων του έργου σε σχέση με τις υπόλοιπες συμβατικές κατασκευές. Ενώ στα περισσότερα εργοτάξια δομείται αρχικά όλο το σύστημα των δοκών επί στύλων και στη συνέχεια ακολουθούν οι πληρώσεις του κελύφους και οι εσωτερικές τοιχοποιίες στο συγκεκριμένο έργο παρατηρούμε ότι η ανέγερση των εσωτερικών τοιχοποιιών (ενίοτε φερουσών) έγινε πριν την κατασκευή των υποστυλωμάτων και της πλάκας οροφής.

Προσωρινές Κατασκευές για τη διενκόνιση της εργασίας (Πλατφόρμες εργασίας)

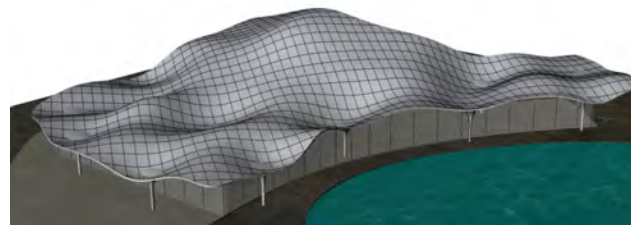
Λόγω του μεγάλου ύψους του κτιρίου και της απουσίας μόνιμου επιπέδου το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως επίπεδο εργασίας (πχ πλάκα ενδιάμεσου ορόφου) κατασκευάστηκαν δύο προσωρινές ορθογωνικές πλατφόρμες. Οι διαστάσεις της πρώτης είναι τέτοιες ώστε να εγγράφουν το περίγραμμα του κτιριακού κελύφους. Η δεύτερη πλατφόρμα τοποθετήθηκε στην περιοχή όπου το κτίριο έχει μεγάλο ύψος προκειμένου η εργασία να είναι ασφαλής και απρόσκοπη.

Δεύτερο στάδιο χάραξης

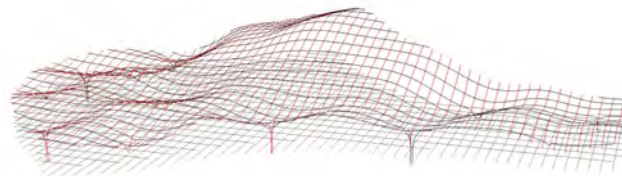
Στις διαμορφωμένες πλέον πλατφόρμες γίνεται εκ νέου χάραξη των κόμβων της επιφάνειας της στέγης αφού αυτές προβληθούν οριζοντιογραφικά πάνω στο κάθε επίπεδο εργασίας. Φυσικά για όλα τα σημεία δε χρησιμοποιείται το ίδιο σύστημα αξόνων (το αρχικά αυθαίρετα ορισμένο) αλλά τοπικά συστήματα συντεταγμένων προκειμένου η εργασία της χάραξης να είναι όσο πιο εύκολη γίνεται. Φυσικά, όπως έχουμε ξαναπεί, τα σημεία χάραξης που προέκυψαν από τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων ελέγχθηκαν δειγματοληπτικά σε σχέση με την οριζοντιογραφική και υψομετρική αφετηρία του αρχικού συστήματος προκειμένου να αποφευχθούν οι όποιες οριζόντιες ή κατακόρυφες μετατοπίσεις από τυχόν σφάλματα, αλλά και οι στροφές. Ειδική μέριμνα και σχολαστικός έλεγχος έγινε για τη σχετική θέση πλάκας και υποστυλωμάτων προκειμένου να εκμηδενιστεί το ενδεχόμενο στατικής διαταραχής σε σχέση με τη μελέτη του κτιρίου.



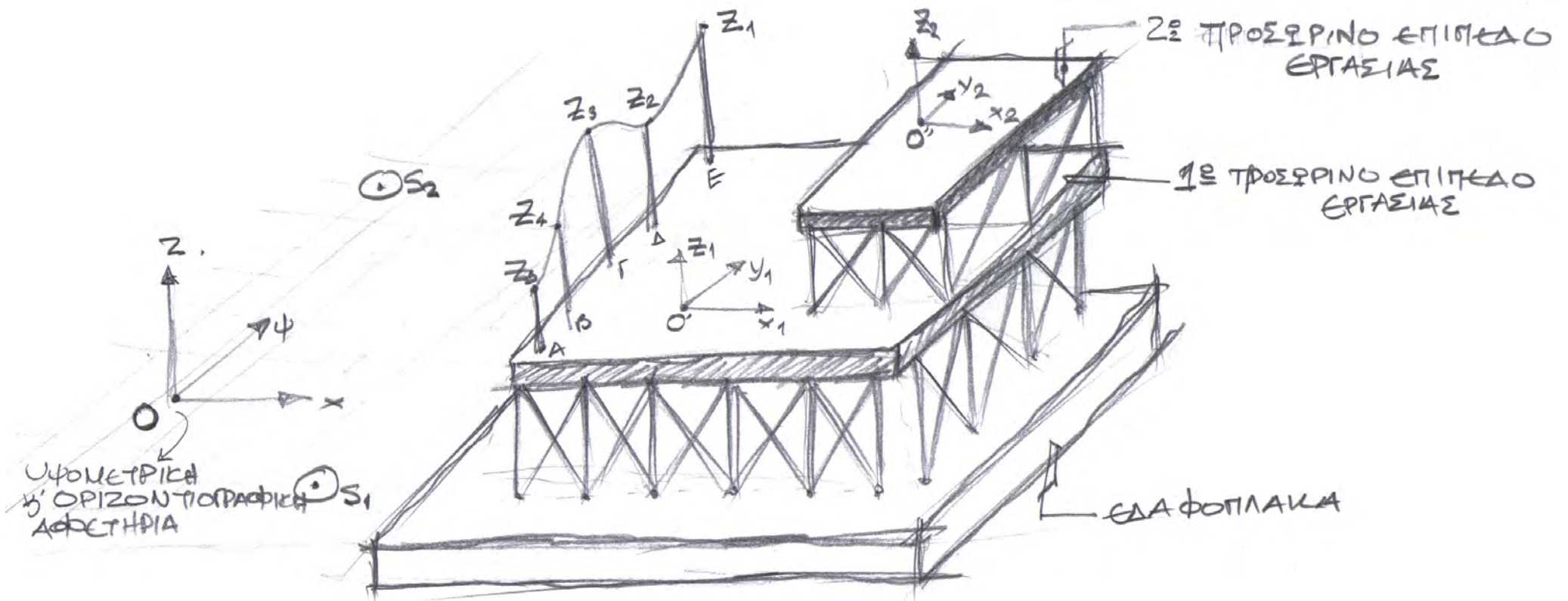
Εικόνα 30. Ορισμός τοπικού (αυθαίρετου) συστήματος συντεταγμένων



Εικόνες 31 & 32. Ψηφιακή ανάλυση της στέγης σε γενέτειρες καμπύλες. Οι καμπύλες είναι η προβολή ενός ορθοκανονικού κανάβου στην οροφή



Εικόνα 33. Προσωρινές πλατφόρμες εργασίας. Σε αυτές ορίζονται εκ νέου τοπικά συστήματα συντεταγμένων για επί τόπου χαράξεις & τοποθετήσεις για τις “σκαλωσιές”



- 1: Τοποθέτηση του αυθαίρετου Σ.Σ. $Ox\psi z$
- 2: Τοποθέτηση - Εξάρτηση των $O_1x_1\psi z_1$ ή $O_2x_2\psi z_2$
- 3: Χαράξη (οριζοντιογραφική) ή στη συνέχεια υψομετρική των $Ez_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_5$ με βάση το $O_1x_1\psi z_1$ ή δειγματοληπτικός

Εικόνα 34. Χαράξεις με βάση τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων πάνω στις προσωρινές πλατφόρμες και δειγματοληπτικός έλεγχος-επαλήθευση με βάση το αρχικό (υψομετρική-οριζοντιογραφική) αφετηρία.

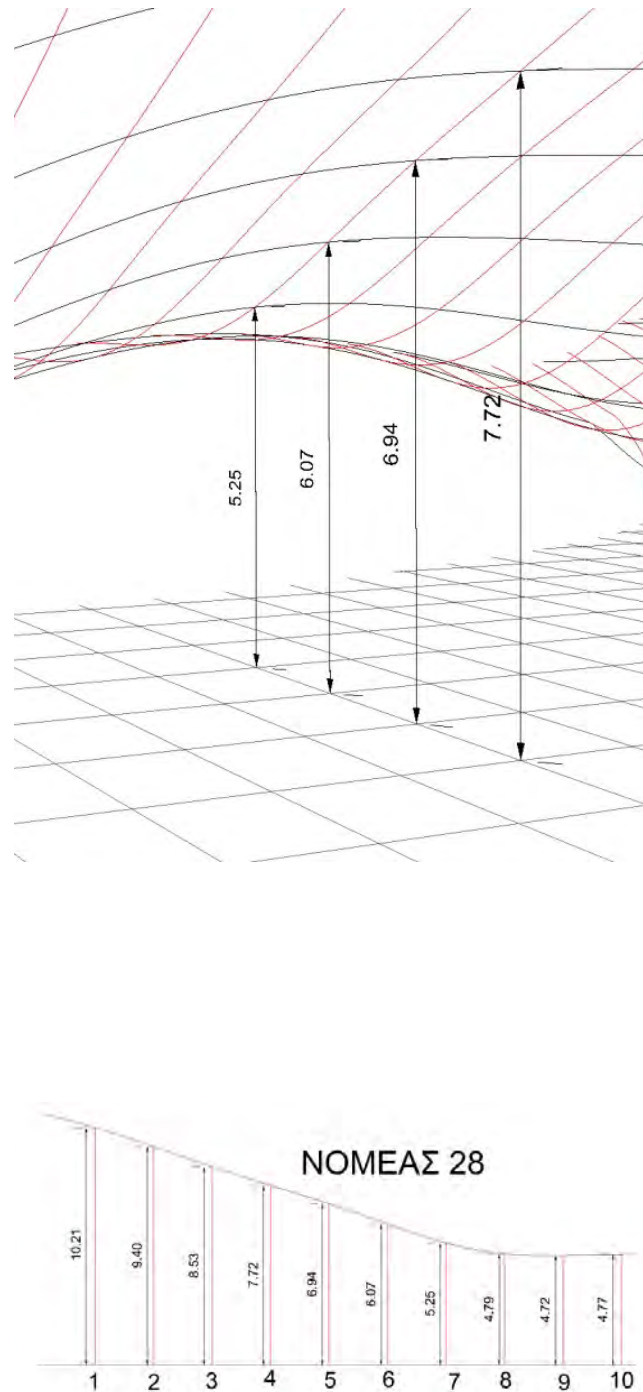
Δομική ανάλυση της κατασκευής και χάραξη των κατασκευαστικών στοιχείων στα προσωρινά επίπεδα

Σε αυτό το στάδιο θα ασχοληθούμε με τις μεθόδους χάραξης και τοποθέτησης των στοιχείων προσωρινής υποστήλωσης και των ξυλότυπων που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο. Για να κατανοήσουμε, όμως, τις επιλογές του Αρχιτέκτονα και της υπόλοιπης ομάδας θα πρέπει να ξεκινήσουμε από την οροφή η οποία είναι το σημαντικότερο στοιχείο της αρχιτεκτονικής μελέτης και της συνεργασίας όλης της ομάδας (κυρίως Αρχιτέκτονα – Πολιτικού Μηχανικού). Η τρισδιάστατη παραμετρική επιφάνεια της στέγης και συγκεκριμένα η κάτω στάθμη της πλάκας οροφής αποτελεί την αρχή, το σημείο «0», με βάση το οποίο άρχισε να προσεγγίζεται η λογική της εργοταξιακής οργάνωσης του κρεματορίου. Σε πρώτο (υπολογιστικό-ψηφιακό) στάδιο οργανώθηκε η παραμετρική επιφάνεια της στέγης αναλύθηκε σε γενέτειρες καμπύλες με βάση την προβολή ενός καρτεσιανού κανάβου οργανωμένου στο επίπεδο του μπετού καθαριότητας στο ισόγειο (υπολογιστικά η παραπάνω μέθοδος δεν είναι τίποτε άλλο από την ανάλυση της καμπύλης επιφάνειας σε γενέτειρες καμπύλες U και V σε ένα σχεδιαστικό περιβάλλον όπως π.χ. αυτό του Rhino ή του Autodesk Alias). Η ισοδιάσταση της πρώτης κατεύθυνσης (έστω U) είναι περίπου 1,5 μέτρο και αποτέλεσε τη βασική γραμμή νευρώσεων στην οποία τοποθετήθηκαν ξύλινοι δοκοί καμπύλης μορφής για τις ανάγκες της σκυροδέτησης. Η επιλογή της συγκεκριμένης απόστασης κάθε άλλο παρά τυχαία είναι, αφού υπαγορεύεται από πολλών ειδών κατασκευαστικούς περιορισμούς, όπως είναι η αντοχή των προσωρινών καμπύλων δοκών του ξυλότυπου, η ευχέρεια εργασίας και διέλευσης μεταξύ των μεταλλικών υποστηλωμάτων του εργοταξίου και άλλα. Η ισοδιάσταση

της δεύτερης κατεύθυνσης είναι μεγαλύτερη (περίπου 2,5μ) και στα σημεία (3700 τον αριθμό) διασταύρωσης (nodes) των καμπυλών της με αυτές της πρώτης κατεύθυνσης τοποθετήθηκαν τα μεταλλικά υποστυλώματα. Φυσικά, η επιλογή της συγκεκριμένης ισοδιάστασης, επίσης, δεν είναι τυχαία. Η τοποθέτηση των υποστυλωμάτων στα δύο οριζόντια προσωρινά επίπεδα εργασίας (1η πλατφόρμα εργασίας, 2η πλατφόρμα εργασίας) έγινε αφού προηγουμένως προσδιορισθεί το ύψος τους, μετρώντας την κατακόρυφη απόσταση του κάθε σημείου τομής των καμπυλών από το επίπεδο έδρασης τους. Φυσικά, η μέτρηση έγινε στο τρισδιάστατο μοντέλο του κτιρίου στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

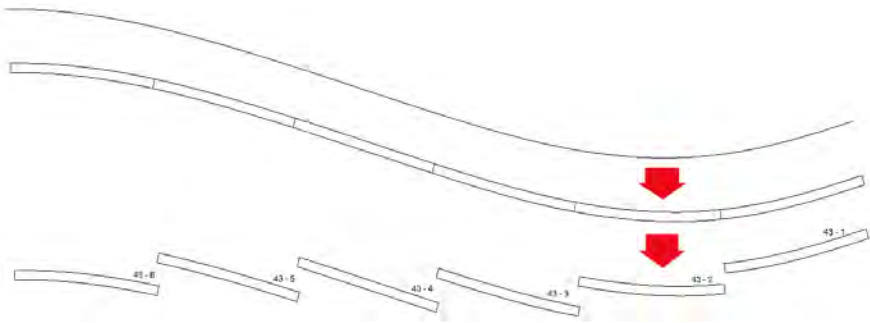
Βασικές - διαμήκεις νευρώσεις του ξυλότυπου οροφής

Ο τελικός στόχος της παραπάνω διαδικασίας ήταν να δημιουργηθεί ένα σύστημα υποστυλωμάτων πάνω στο οποίο θα εδράζεται ο νομέας - δοκάρι του ξυλότυπου. Οι εν λόγω νομείς-δοκοί παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον από άποψη κατασκευής και τοποθέτησης. Το μήκος του κάθε τμήματος του νομέα είναι λίγο περισσότερο από 2,5 μέτρα (2,5 μέτρα είναι η οριζοντιογραφική προβολή) ανάλογα με την κλίση της καμπύλης. Επίσης, έγινε μέριμνα ώστε τα τμήματα αυτά να χωρούν εντός ενός εμπορικού φύλλου ξυλείας (κόντρα πλακέ θαλάσσης) διαστάσεων 150x300x4εκ. και να χρησιμοποιηθούν μηχανήματα CNC για την κοπή των τεμαχίων. Για την κάθε κατασκευαστική μονάδα χρησιμοποιήθηκαν 3 τεμάχια κατά την έννοια του πάχους ώστε το τελικό τμήμα της δοκού να είναι σύνθετη ξυλεία αυξημένης αντοχής.

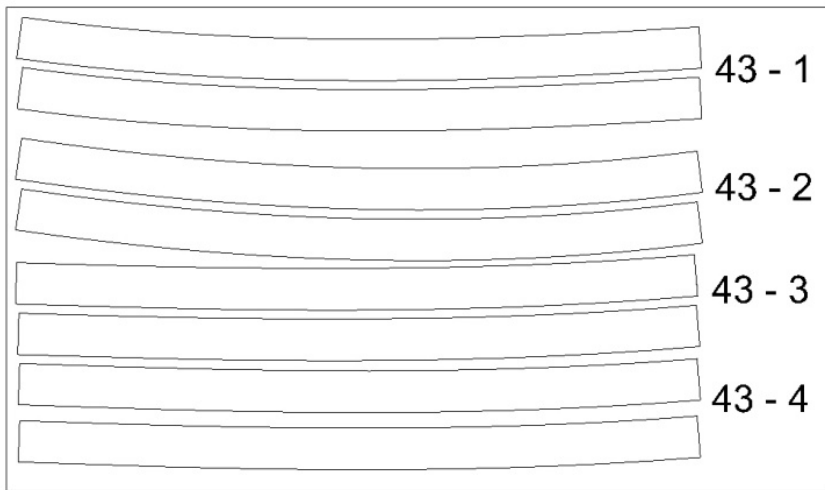


Εικόνα 35. Ψηφιακός προσδιορισμός του υψομέτρου κάθε κόμβου. Τα κατακόρυφα μεταλλικά υποστηλώματα τοποθετούνται με βάση τα υψόμετρα που εξάγονται από τον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή

Εικόνα 36. Διαμήκεις τομή νευρώσεως του ξυλότυπου με τα αντίστοιχα υψόμετρα στους κόμβους



Εικόνα 37.
Ανάλυση των
διαμήκων
νευρώσεων
σε μικρότερα
τεμάχια. Το
οριζοντιογραφικό
μήκος των
τεμαχίων
ισούται με την
οριζοντιογραφική
απόσταση μεταξύ
δύο διαδοχικών
κόμβων



Εικόνα 38. Κοπή
και σήμανση
τεμαχίων
διαμήκους
νεύρωσης με
CNC φρέζα



Εικόνα 39.
Σχηματική
αναπαράσταση
της σύνδεσης των
ξύλινων στοιχείων
που απαρτίζουν τη
διαμήκη νεύρωση



Εικόνα 40.
Στιγμιότυπο
της ανέγερσης
του ξυλότυπου
οροφής στο
εργοτάξιο



Εικόνα 41.
Άποψη του
ολοκληρωμένου
ξυλότυπου
οροφής από την
κάτω στάθμη του

Δευτερεύουσες – εγκάρσιες νευρώσεις του ξυλότυπου οροφής

Για τα εγκάρσια στοιχεία χρησιμοποιείται εύκαμπτη μαλακή ξυλεία η οποία τοποθετείται ανά 40 περίπου εκατοστά όπως δείχνουν οι φωτογραφίες και αποτελείται από 3 τάβλες πάχους 2 εκατοστών η μία πάνω στην άλλη. Οι τάβλες τοποθετούνται (με ηλώσεις) μιά-μιά για να καμπυλώνονται πιο εύκολα και πιο ομαλά και μετά μπαίνουν οι άλλες δύο για να ενισχύσουν τον φορέα. Η συγκεκριμένη κατασκευαστική μέθοδος δεν προσφέρει την ακρίβεια που θα επιτυγχανόταν αν κατασκευάζονταν όπως οι βασικές νευρώσεις. Προκύπτει, λοιπόν, το πρόβλημα σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή απόσταση των εγκάρσιων ενισχυτικών η οποία είναι ευθέως ανάλογη με την εξοικονόμηση υλικών και ωρών εργασίας.

Κατ' αρχάς θα πρέπει να εξετασθεί εάν ο βαθμός της γεωμετρικής απόκλισης από το υπολογιστικό μοντέλο κινείται εντός των ανεκτών ορίων τόσο από μορφολογική άποψη, αλλά, κυρίως από την άποψη της στατικής διαταραχής. Η πύκνωση των εγκάρσιων ενισχυτικών δημιουργεί ξυλότυπο αρκετά κοντά στη γεωμετρία του ψηφιακού μοντέλου, ενώ η αραιώσή του δημιουργεί αξιόλογες αποκλίσεις. Επιλέχθηκε η ισοδιάσταση του 1,5 μέτρου αφού έχει ως αποτέλεσμα απόκλιση ίση με 1 εκατοστό (σχεδόν αμελητέα) ενώ αν πχ χρησιμοποιηθεί ισοδιάσταση 3,5 μέτρων η οροφή έχει σημαντικές αποκλίσεις της τάξης των 10 εκ. κατά τόπους.

Σε σχέση με την επιλογή υλικότητας της ξυλείας για τις δευτερεύουσες νευρώσεις ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο μέτρο ελαστικότητας που έχουν οι τάβλες προκειμένου να καμπυλώνουν και να ακολουθούν όσο περισσότερο γίνεται την καμπύλη μορφή του ψηφιακού μοντέλου. Γι' αυτό επιλέχθηκε σχετικά μαλακή ξυλεία, μεγάλου μέτρου ελαστικότητας

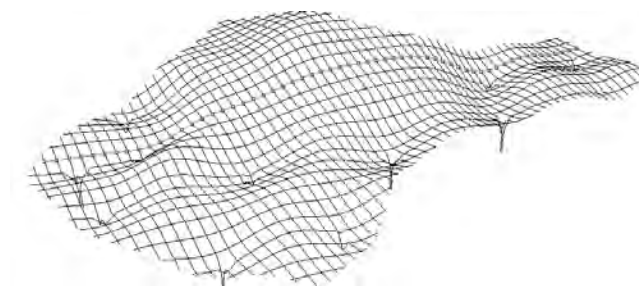
και συγκεκριμένα τάβλες ελάτης. Σε κάθε περίπτωση, ο ξυλότυπος οροφής στο σύνολό του έχει αντοχή μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για να αντισταθμιστεί το ίδιο βάρος του ωπλισμένου σκυροδέματος που θα εγχυθεί, το βάρος του εργαζόμενου προσωπικού και των μηχανημάτων της σκυροδέτησης (δονητές κλπ.), οι ενδεχόμενες τάσεις που αναπτύσσονται από ανεμοπιέσεις και όλα τα υπόλοιπα συγγενή φορτία. Πάνω από τις τάβλες τοποθετείται η τελική στρώση του ξυλότυπου η οποία αποτελείται από εύκαμπτες σανίδες μικρού πάχους οι οποίες καμπυλώνουν εύκολα και αποτελούν τη στεγανή λεκάνη στην οποία χύνεται το σκυρόδεμα αφού προηγουμένως τοποθετηθεί ο σιδηρός ωπλισμός.

Ξυλότυπος των Κωνικών υποστηλωμάτων

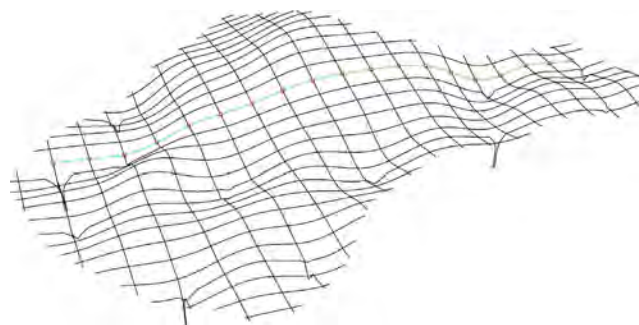
Για τα υποστυλώματα κατασκευάστηκαν ειδικοί ξυλότυποι από κόντρα πλακέ θαλάσσης, των οποίων οι νευρώσεις ακολουθούν τη γεωμετρία των γενετειρών καμπυλών του ψηφιακού μοντέλου των κατακόρυφων φερόντων στοιχείων. Γύρω από τις νευρώσεις τοποθετήθηκε εύκαμπτο σανίδωμα προκειμένου να δημιουργηθεί η επιφάνεια που θα συγκρατήσει το μπετόν της σκυροδέτησης. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο σημείο που η τελική στρώση του ξυλότυπου της οροφής συναντά τα κωνικά υποστυλώματα προκειμένου να εξασφαλισθεί συνέχεια καμπυλότητας δεύτερου βαθμού. Η κατασκευή των καλουπιών των υποστυλωμάτων έγινε με 4 τεταρτοκυκλικά τεμάχια προκειμένου να μπορούν να ξεκαλουπωθούν.



Εικόνα 42.
Λεπτομέρεια των εγκάρσιων νευρώσεων του ξυλότυπου οροφής από τρεις τάβλες καθ' ύψος



Εικόνα 43.
Διαμέριση της επιφάνειας της στέγης με ισοδιάσταση 1,5m. Η επιλογή της συγκεκριμένης διάστασης έχει ως αποτέλεσμα στην κατασκευή μικρές αποκλίσεις σε σχέση με το ψηφιακό μοντέλο

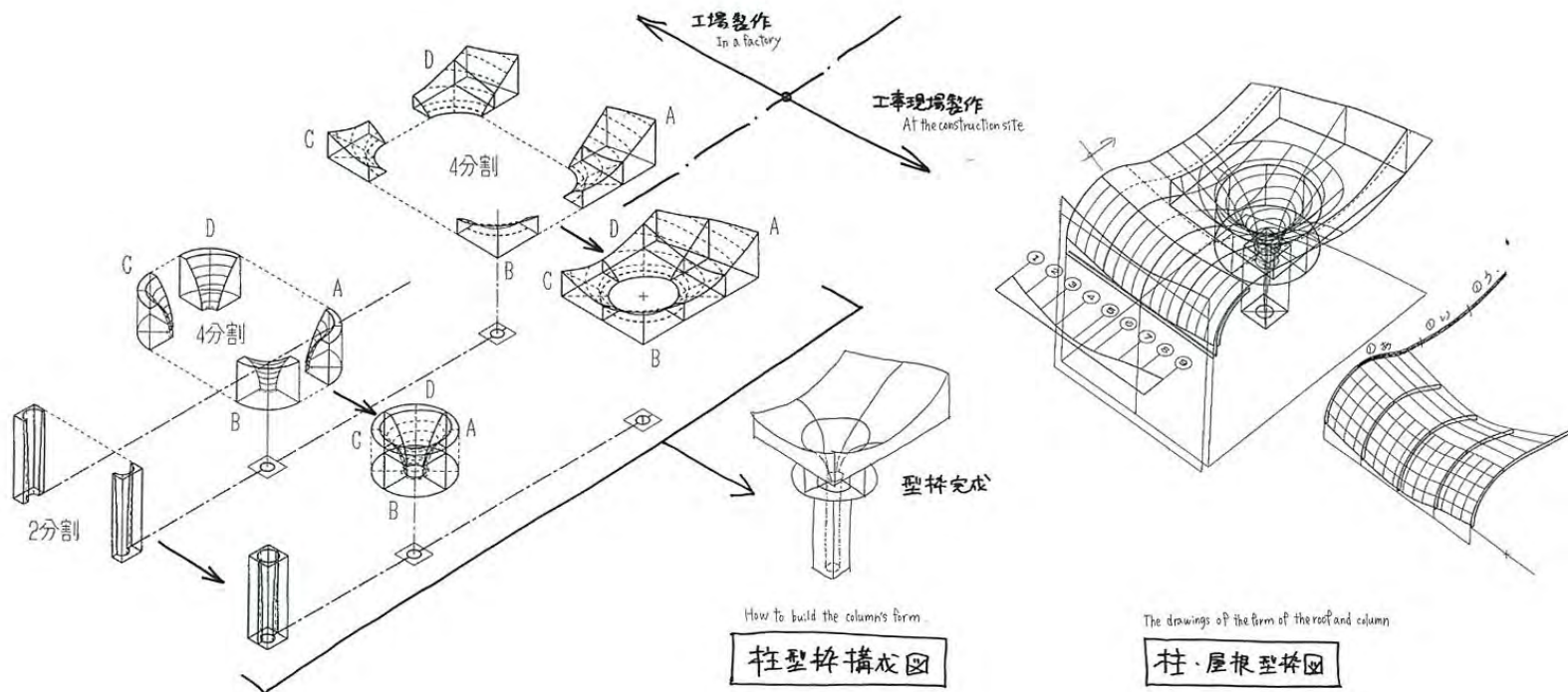
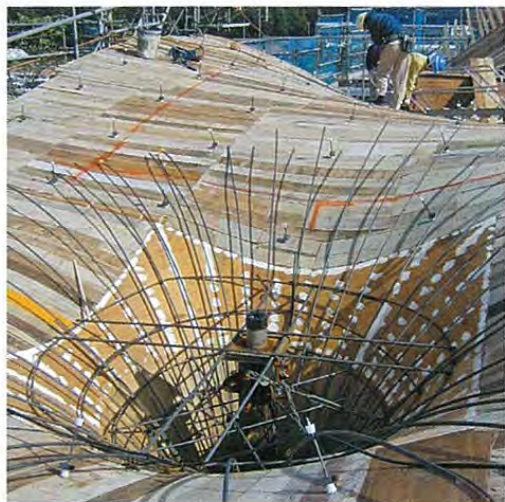


Εικόνα 44.
Διαμέριση της επιφάνειας της στέγης με ισοδιάσταση 3,5m. Οι αποκλίσεις σε σχέση με το ψηφιακό μοντέλο είναι αισθητές και ανεπιθύμητες



Εικόνα 45.
Λεπτομέρεια των αποκλίσεων με επιλογή ισοδιάστασης 3,50μ. Κατά τόπους είναι 10εκ.

Εικόνα 46. Ξυλότυποι κωνικών υποστηλωμάτων. Λεπτομέρειες ψηφιακού σχεδιασμού και κατασκευαστικής οργάνωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι επιφάνειες του υποστηλώματος και της στέγης έχουν γεωμετρική συνέχεια C_2 στο σημείο που συναντώνται



Τοποθέτηση οπλισμού και σκυροδέτηση

Η σκυροδέτηση του κτιρίου έγινε όπως και στις συμβατικές κατασκευές μόνο που στο σκυρόδεμα προστέθηκαν επιταχυντικοί καταλύτες προκειμένου να σταθεροποιηθεί σχετικά γρήγορα και να μη ρέει ανεξέλεγκτα πάνω στην καμπύλη επιφάνεια. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον έλεγχο του πάχους της πλάκας, η οποία πρέπει να είναι παντού 19 εκατοστά εκτός απ' τα σημεία στα οποία η πλάκα συναντά τα υποστυλώματα όπου το πάχος της αυξάνεται.

Αφαίρεση του ξυλότυπου

Ο τρόπος αφαίρεσης του ξυλότυπου μοιάζει με τη διαδικασία ξεκαλουπώματος στις τοξωτές και θολωτές κατασκευές. Η πλάκα οροφής έπρεπε να φορτιστεί ομοιόμορφα, γεγονός που απαιτούσε την ταυτόχρονη αφαίρεση των μεταλλικών στύλων ή την σταδιακή και κατανομημένη απομάκρυνσή τους. Οποιαδήποτε αυξημένη τοπική φόρτιση λόγω της ανομοιόμορφης απομάκρυνσης των μεταλλικών στύλων θα μπορούσε να προκαλέσει τοπική αστοχία και κατάρρευση της οροφής. Για την ακριβή μέθοδο αφαίρεσης του ξυλότυπου δεν έχουμε στοιχεία, αλλά μπορούμε να κάνουμε δυο υποθέσεις. Η πρώτη είναι ότι τοποθετήθηκε ένα υδραυλικό σύστημα κάτω από τις πλατφόρμες το οποίο επέτρεψε την ισοσταθμη καθ' ύψος υποχώρησή τους. Η δεύτερη είναι ότι αφαιρέθηκαν οι μεταλλικοί στύλοι με τέτοια σειρά ώστε η φόρτιση της πλάκας να είναι κατά το δυνατόν ομοιόμορφη σύμφωνα με τις υποδείξεις του Πολιτικού Μηχανικού.

Εξωτερικά Υαλοστάσια

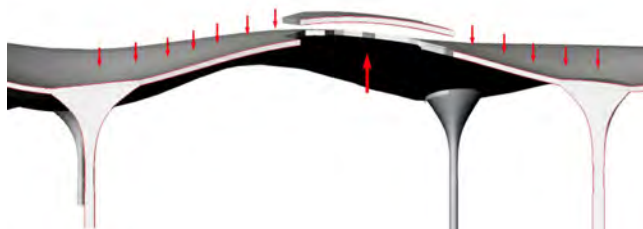
Η μορφή της άνω παρειάς των υαλοστασίων καθώς και εν γένει το σχήμα τους είναι και αυτά προϊόν παραμετρικής ψηφιακής σχεδίασης με βάση την οριογραμμή της στέγης, ενώ η παραγωγή τους (κοπή) σίγουρα απαιτήσε τη χρήση CNC μηχανών.



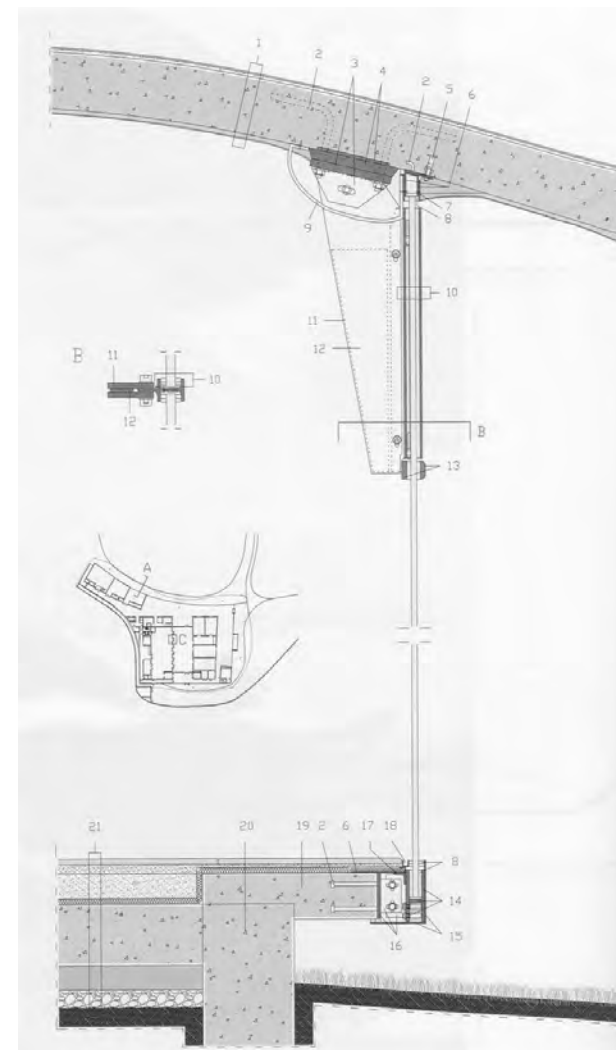
Εικόνα 47. Ψηφιακή αναπαράσταση του κατασκευαστικού μοντέλου του κτιρίου



Εικόνα 48. Ομοιόμορφη κατανομή φορτίων στην πλάκα



Εικόνα 49. Ανομοιόμορφη κατανομή φορτίων στην πλάκα. Στην περιοχή της αστοχίας εξακολουθούν να υπάρχουν μεταλλικά υποστυλώματα, ενώ έχουν αφαιρεθεί από τις γειτονικές



Εικόνα 50. Λεπτομέρεια εξωτερικών Υαλοστασίων



Εικόνα 51. Άποψη από το εσωτερικό του κτιρίου. Τα υαλοστάσια ακολουθούν την παραμετρική μορφή της στέγης

MOS Architects. Το κουκλοθέατρο στο « Le Corbusier's Carpenter Center»

Εισαγωγικά

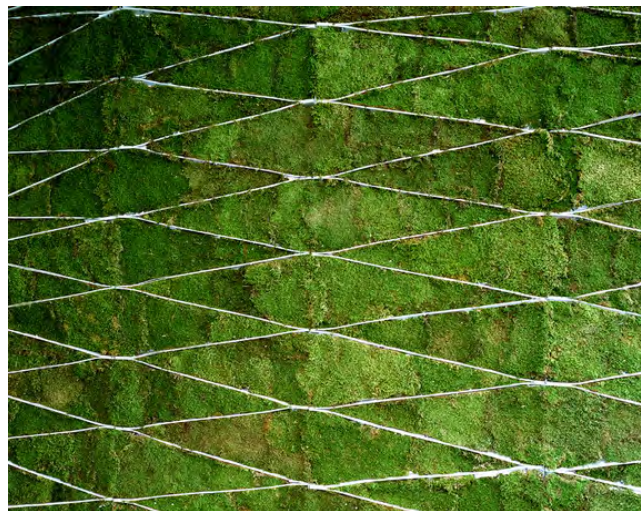
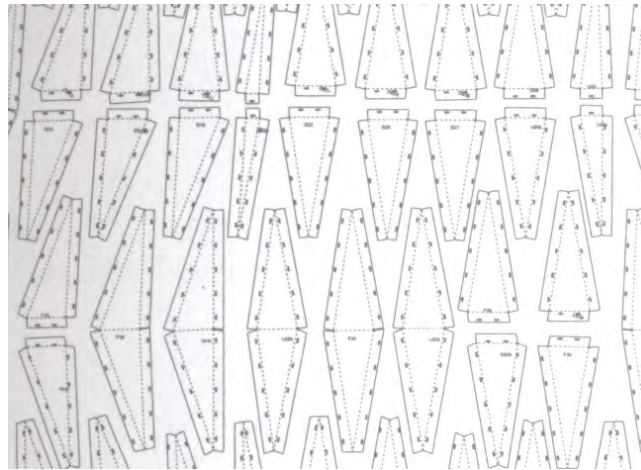
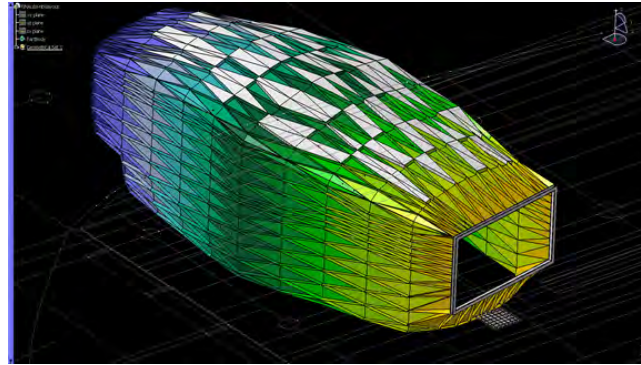
Το κουκλοθέατρο σχεδιάστηκε από τους MOS Architects σε συνεργασία με τον καλλιτέχνη Pierre Huyghe για την επέτειο των 40 χρόνων στο « Le Corbusier's Carpenter Center». Η μορφή του αρχιτεκτονήματος, αλλά και η κατασκευαστική του δομή είναι δανεισμένη από τη φόρμα ενός διαμαντιού. Πρόκειται για έργο σχετικά μικρών διαστάσεων στο οποίο το κέλυφος παίζει ταυτόχρονα το ρόλο του φέροντα οργανισμού. Δεδομένου ότι το θέατρο αποτελεί προσθήκη σε ισόγειο - υπόστεγο χώρο οι γενικές του διαστάσεις του επιλέχθηκαν ώστε να μην έχει επαφή με τα πλευρικά κυλινδρικά υποστυλώματα και την υπερκείμενη πλάκα και έτσι να μη διαταράζει τη στατική συμπεριφορά του υφιστάμενου κτηρίου.

Από το ψηφιακό μοντέλο στην κατασκευή

Ο αρχικός ψηφιακός σχεδιασμός αποτελούνταν από καμπύλες επιφάνειες που συνθέτανε τον ρευστό όγκο του κουκλοθέατρου. Στη συνέχεια, όμως, προκειμένου να αποδοθεί (στη μικρότερη κλίμακα της φόρμας του) το επίπεδο και γωνιώδες στοιχείο του διαμαντιού, οι καμπύλες επιφάνειες αναλύθηκαν (μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή) σε πολύγωνα στοιχεία και έτσι προέκυψε η τελική (ρευστή και ταυτόχρονα γωνιώδης) μορφή του όγκου.

Από τον υπολογιστή στην προκατασκευή και το εργοτάξιο

Οι 500 κατασκευαστικές μονάδες που συνθέτουν τη βασική δομή του παραμετρικού



Εικόνα 52. Η ρευστή μορφή του κουκλοθέατρου παραπέμπει σε διαμάντι και αναλύεται σε επιμέρους ευθύγραμμα γωνιώδη στοιχεία



Εικόνα 55. Κάτοψη του επιπέδου τοποθέτησης του κουκλοθέατρου

Εικόνα 53. Εξαγωγή των κατασκευαστικών μονάδων σε ψηφιακό καμβά και "εκτύπωσή" τους σε CNC μηχανή



Εικόνα 56. Μεταφορά των κατασκευαστικών μονάδων απλά μέσα

Εικόνα 54. Πλήρωση των φωλεών των δομικών στοιχείων με χλοοτάπητα



Εικόνα 57. Συναρμογή των τεμαχίων στο χώρο που θα τοποθετηθεί το θέατρο



Εικόνα 58. Το κουκλοθέατρο σε λειτουργία. Άποψη από το γειτονικό δρόμο του «Le Corbusier's Carpenter Center»

όγκου είναι τρίγωνα, τετράπλευρα και άλλα πολύπλευρα σχήματα τα οποία στις ακμές τους φέρουν ορθογώνιο στοιχείο με οπές που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση με τα γειτνιαζόμενα τεμάχια. Όλα τα τεμάχια φέρουν αυλάκωση στη γραμμή που χωρίζει τα ορθογώνια στοιχεία σύνδεσης από την υπόλοιπη επιφάνεια προκειμένου να είναι δυνατό το τσάκισμα (folding) των περιμετρικών ορθογωνικών στοιχείων και η επαφή τους - ανά δύο γειτονικά - προκειμένου να συνδεθούν. Αφού συναρμολογηθούν τα πάνελ (με χρήση απλών εργαλείων) αρχίζουν να λειτουργούν ως φέροντα στοιχεία τα οποία μεταφέρουν στα γειτονικά τους τάσεις και φορτίσεις μέσω της επιφάνειας συναρμογής τους. Επιπλέον, σκληραίνουν ακόμη περισσότερο με την εισαγωγή αφρώδους υλικού και αποκτούν την επιθυμητή ακαμψία, ενώ, ορισμένα εξ' αυτών αντιστρέφονται προκειμένου να αποκτήσουν τη λειτουργία λίθινων «κλειδιών». Η όλη συναρμολόγησή τους γίνεται με απλά εργαλεία. Στη συνέχεια ακολουθεί η πλήρωσή της εξωτερικής παρειάς των πάνελ με αντίστοιχα πολυγωνικά τεμάχια χλοοτάπητα τα οποία κόβονται επί τόπου στο εργοτάξιο. Λόγω του υλικού χρήσης η συγκεκριμένη κατασκευαστική μέθοδος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σχετικά εύκολη και ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις μικρής ή και μεσαίας κλίμακας αρχιτεκτονημάτων.

Βελτιστοποίηση της ψηφιακής σχεδίασης και της κατασκευαστικής διαδικασίας

Σε αυτό το σημείο θα θέλαμε να κάνουμε ορισμένες παρατηρήσεις σε σχέση με την οργάνωση των τεμαχίων, τη σειρά κοπής και συναρμογής τους αλλά και ορισμένες προτάσεις βελτιστοποίησης της όλης διαδικασίας. Τα προς συναρμογή τεμάχια είναι όλα μοναδικά. Είναι λογικό, λοιπόν, να απαιτείται κάποιου είδους αρίθμηση είτε αυτά παράγονται

μέσω χειροκίνητης κοπής είτε η κοπή τους γίνεται σε κάποιο CNC μηχάνημα. Θα μπορούσε πχ να γίνει αρίθμηση με βάση την κατασκευαστική σειρά που θα ακολουθήσει με κάποια επιπρόσθετη σήμανση στα γειτονικά ορθογώνια συναρμογής προκειμένου να μην υπάρχουν ασάφειες ή διαφορούμενα (ως προς την τοποθέτηση) τεμάχια για τον τεχνίτη. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η χειροκίνητη κοπή είναι μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διεργασία η οποία γίνεται ακόμα πιο επίπονη λόγω της ανυπαρξίας ομοειδών τεμαχίων.

Στα πλαίσια βελτιστοποίησης της όλης διαδικασίας θα πρέπει αρχικά να προσδιορίσουμε το επιθυμητό αρχιτεκτονικό αποτέλεσμα σε ό,τι έχει να κάνει με την τελική του μορφή και τα τεμάχια που την συνθέτουν. Τα γωνιώδη τεμάχια όσο μεγαλύτερα είναι έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή επιφανειών (ή όγκων) αρκετά μεγάλης τραχύτητας ακριβώς όπως η διαμέριση της καμπύλης μιας συνάρτησης. Όσο τα τεμάχια προσεγγίζουν τις στοιχειώδεις απειροελάχιστες διαστάσεις μιας «στοιχειώδους» επιφάνειας τόσο μεγαλύτερη είναι η προσέγγιση της γεωμετρικής λειότητας. Προκύπτει έτσι το ερώτημα (σε κάθε ξεχωριστή σύνθεση) σε σχέση με το μέγιστο επιθυμητό της απόκλισης από την τέλεια γεωμετρική λειότητα. Η απάντηση αυτού του ερωτήματος αρχίζει να προσεγγίζει την μέγιστη επιθυμητή διάσταση των στοιχειωδών τεμαχίων που απαρτίζουν την κατασκευή. Επιπλέον, αξίζει να γίνει προσπάθεια για τη χρήση ομοειδών τεμαχίων των οποίων τόσο η παραγωγή είναι αρκετά ευκολότερη (π.χ. χύτευση ή χειροκίνητη κοπή) όσο και η συναρμογή τους (χρήση ενός εργαλείου συνδεσμολογίας όπως ήλωση, πριτσίνια κλπ). Ωστόσο η χρήση ομοειδών τεμαχίων (Ελάχιστες δυνατές αναπαράξιμες μονάδες) ενδέχεται να οδηγήσει σε απλοποιήσεις (πιθανά ανεπιθύμητες) στο αρχιτεκτονικό αποτέλεσμα. Αυτό είναι αντικείμενο απόφασης του Αρχιτέκτονα κατά τη διαδικα-

σία επανεξέτασης της μελέτης στο στάδιο της κατασκευαστικής ανάλυσης ενός ψηφιακού μοντέλου.



Εικόνα 59. Λεπτομέρεια συναρμογής κατασκευαστικών μονάδων. Η σύνδεσή τους γίνεται με απλά εργαλεία και συνδετικά στοιχεία.

Arata Isozaki. Εθνικό συνεδριακό κέντρο στη Ντόχα

Συνθετικά στοιχεία

Το συνεδριακό κέντρο βρίσκεται στην πανεπιστημιούπολη της Ντόχα στο Κατάρ. Είναι το μεγαλύτερο συνεδριακό κέντρο της Μέσης Ανατολής και μπορεί στις 3 κύριες αίθουσές του να δεχτεί 7000 άτομα. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2006 και άνοιξε για το κοινό το 2011. Είναι ένα από τα ιδρύματα του Qatar Foundation ενός μη κερδοσκοπικού οργανισμού που ίδρυσε το 1995 ο εμίρης του Κατάρ Sheikh Hamad Bin Khalifa Al Thani. Το Qatar Foundation περιλαμβάνει περίπου 30 ιδρύματα μεταξύ των οποίων έξι πανεπιστήμια, ιατρικά και ερευνητικά κέντρα, σχολεία και καταστήματα. Το εθνικό συνεδριακό κέντρο προορίζεται να φιλοξενήσει συνέδρια, φεστιβάλ μουσικής και τεχνών καθώς και εκθέσεις αυτοκινήτων και πλοίων. Αρχιτέκτων του έργου είναι ο Ιάπωνας Arata Isozaki.

Διαρθρώνεται σε έξι ορόφους και έχει μήκος 250 και πλάτος 110 μέτρα. Η συνολική του επιφάνεια είναι 177.000 τ.μ. Τα «υποστυλώματα» στηρίζουν μια επίπεδη οροφή σε ύψος 20 μέτρων, η οποία στεγάζει τον χώρο υποδοχής και έχει πλάτος 30 και μήκος 250 μέτρα. Απαιτηση του εργοδότη ήταν η όψη να έχει αναφορές στο δέντρο sidra. Στην παράδοση του Κατάρ το δέντρο sidra θεωρείται ιερό και τα κλαδιά του πιστεύεται ότι οδηγούν στον έβδομο ουρανό. Φυτρώνει στις άγονες ερήμους και προσέφερε στους βεδουίνους τη σκιά, τους καρπούς του και τα φύλλα του για φαρμακευτικούς λόγους, είναι σύμβολο της ζωής και της γνώσης. Όλα αυτά επηρέασαν τις βασικές συνθετικές επιλογές του Αρχιτέκτονα σε σχέση με τη μορφή της εισόδου του κτηρίου εκτοξεύοντας το κόστος του κτηρίου σε σχέση με μια κατασκευή που φέρει συμβατικά υποστυλώματα.

Το κεντρικό κτήριο ανέλαβε να κατασκευάσει η BAYTUR Insaat Taahhut, το χώρο υποδοχής που περιλαμβάνει τα δενδροειδή υποστυλώματα και τη στέγη η βελγική εταιρία Victor Buysck, ενώ το συνολικό εργοταξιακό σχεδιασμό ανέλαβε η Buro Happold, μια διεθνής εταιρία μηχανικών. Τη στατική μελέτη έκανε ο Mutsuro Sasaki. Μια ομάδα μηχανικών της Buro Happold (SMART) ανέλαβε να αναλύσει την σύνθετη ενιαία επιφάνεια του δέντρου σε μικρότερα τμήματα. Τα τελικά αποτελέσματα των εργασιών της ομάδας στάλθηκαν στην Victor Buysck, η οποία αποφάσισε την κατασκευή των τμημάτων αυτών σε εργοστάσιο στη Μαλαισία και τα συναρμολόγησε τους επί τόπου στο εργοτάξιο. Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα αυτά τα στάδια είναι Rhino, ANSYS και SmartForm ένα πρόγραμμα της ομάδας SMART που είναι συμβατό με το Rhino και με το ANSYS.

Η στατική λειτουργία της πρόσοψης του κτηρίου - Γενικά στοιχεία

Το κτήριο ουσιαστικά χωρίζεται σε δύο μέρη, το κυρίως κτήριο που διαρθρώνεται σε έξι ορόφους και είναι μια συμβατική κατασκευή που χρησιμοποιεί το σύστημα της δοκού επί στύλων και την νότια πρόσοψη, η οποία είναι ένα υπόστεγο ύψους 20 μέτρων περικλειστο κατά το ήμισυ με υαλοστάσια. Τα κυριότερα δομικά στοιχεία αυτού του υπόστεγου είναι η θεμελίωση - κορμός, τα δενδροειδή «υποστυλώματα» - κλαδιά και η πλάκα της οροφής. Πρώτα άρχισε να κατασκευάζεται το κτήριο της υποδοχής. Στην περίπτωση του συνεδριακού κέντρου, ο τρόπος δόμησης και η σειρά των εργασιών είναι διαφορετικά από αυτό των συμβατικών κτηρίων (θεμελίωση, υποστυλώματα, πλάκα). Η κατασκευή του γίνεται με την ακριβώς αντίθετη διαδικασία (πλάκα οροφής, υποστυλώματα, θεμελίω-



Εικόνα 60.
25°18'57"N
51°25'55"E .
Το συνεδριακό κέντρο του πανεπιστημίου στη Doha.



Εικόνα 61.
Χωροθέτηση του συνεδριακού κέντρου στην ευρύτερη περιοχή



Εικόνα 62. Το ιερό δέντρο Sidra. Τα κλαδιά του σύμφωνα με την Αραβική παράδοση οδηγούν στον έβδομο ουρανό



Εικόνα 63. Arata Isozaki. Το Πανεπιστημιακό συνεδριακό Κέντρο στη Doha. Άποψη της εισόδου με τα “δενδροειδή υποστυλώματα”.

ση). Στην εύλογη ερώτηση γιατί επιλέγεται ο αντίστροφος τρόπος δόμησης ο οποίος μάλιστα επιβάλλει την προσωρινή κατασκευή μεγάλης κλίμακας πυλώνων πάνω στους οποίους θα πατήσει η πλάκα της οροφής, απαντούν οι διπλανές εικόνες από τις οποίες γίνεται αντιληπτή και η στατική λογική του κτηρίου. Οι κόμβοι των μεταλλικών κλαδιών της κατασκευής και της βάσης ωπλισμένου σκυροδέματος είναι τόσο ασθενείς που δεν θα μπορούσαν να αντέξουν ούτε το ίδιο βάρος του κλαδιού. Σε αυτό το σημείο υπάρχει άρθρωση και όχι πάκτωση. Άρα η οροφή ελκυστήρας πρέπει να τοποθετηθεί πρώτη και μετά τα μεταλλικά κλαδιά ώστε η βάση και όλο το σύστημα να δεχθεί ταυτόχρονη φόρτιση με την απομάκρυνση των πυλώνων και να λειτουργήσει σαν ένα τεράστιο δικτύωμα. Έτσι, η οροφή λειτουργεί σαν ελκυστήρας, που αναλαμβάνει εφελκυστικές τάσεις και τα κλαδιά είναι τα μέλη του τριγωνικού δικτύωματος που δέχονται θλιπτικές τάσεις. Η βάσεις που είναι και οι κορυφές του δικτύωματος αναλαμβάνουν να μεταφέρουν το βάρος όλης της κατασκευής στο έδαφος. Ο πολιτικός μηχανικός Mutsuro Sasaki εφάρμοσε για την στατική επίλυση τη λογική της frond end γεωμετρίας, μιας μεθόδου που χρησιμοποιείται στις αναρτήσεις των αγωνιστικών αυτοκινήτων cart και formula 1. Αφού εξετάστηκε η στατική λειτουργία της πρόσοψης θα περιγραφούν αναλυτικά τα στάδια και ο τρόπος κατασκευής του κτηρίου.

Βασικά στάδια κατασκευής του έργου

Χάραξη του οικοπέδου και στήσιμο των πυλώνων

Η χάραξη έγινε όπως και στις συμβατικές κατασκευές και στη συνέχεια κατασκευάστηκαν οι πυλώνες πάνω στους οποίους θα πατούσε η οροφή αλλά και οι βραχίονες των δέντρων. Ο σκελετός της πλάκας κατασκευ-

άστηκε στο έδαφος και μετά αναρτήθηκε στο ύψος που έπρεπε. Ο μηχανικός της Victor Buysck Robert Obbard αναφέρει ότι εάν η πλάκα κατασκευαζόταν εξολοκλήρου στην τελική της θέση, θα απαιτούνταν 104 πυλώνες, ενώ τώρα χρειάστηκαν μόνο 46.

Κατασκευή και εγκατάσταση οροφής

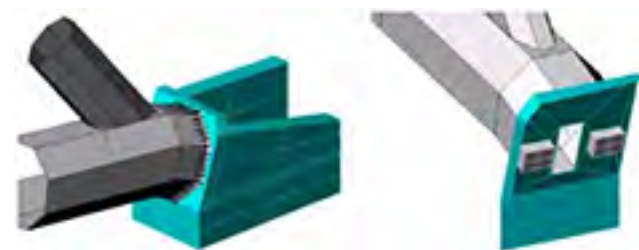
Η οροφή κατασκευάστηκε στο έδαφος σε δύο τμήματα και μετά αναρτήθηκε στο τελικό της ύψος. Πρώτα κατασκευάστηκε ο σκελετός της που περιείχε και τις βασικές δοκούς πάνω στις οποίες θα καταλήγουν τα κλαδιά του δένδρου και προορίζονται να αναλάβουν τις βασικές φορτίσεις της οροφής σε εφελκυσμό και κάμψη. Για την ενίσχυση των δοκών οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν 76 ράβδους προέντασης, Macalloy bars.

Πάνω στις δοκούς εγκαταστάθηκαν οι υποδοχές που θα συνδέουν την πλάκα με τους βραχίονες του δένδρου. Πρόκειται για μεγάλης κλίμακας μεταλλικούς συνδέσμους που για να τοποθετηθούν έπρεπε όλη η οροφή να σηκωθεί μερικά μέτρα από το έδαφος.

Το επόμενο στάδιο είναι η ανάρτηση της οροφής στους πυλώνες. Τα δύο τμήματα του επιπέδου τοποθετήθηκαν στην τελική τους θέση με τα άκρα τους να είναι κατά 625 χιλιοστά ψηλότερα από το κέντρο αρχικά για να έρθουν αργότερα στην ίδια ευθεία μόλις εφαρμοστεί και το βάρος των κλαδιών.



Εικόνα 64. Ο κόμβος των αντεστραμμένων δενδροειδών εκλυστήρων στο δάπεδο



Εικόνα 65. Σχηματική αναπαράσταση του κόμβου



Εικόνα 66. Front end γεωμετρία στη Formula 1 και στην Αρχιτεκτονική.



Εικόνα 67. Απόψεις των κατασκευαστικών σταδίων του έργου. Η τρόποι δόμησης και η χρονολογική σειρά των εργασιών διαφέρουν σημαντικά από ένα συμβατικό έργο.



Εικόνα 68. Διαγραμματική απεικόνιση της στατικής λειτουργίας υπόστεγου και δενδροειδών ελκυστήρων

Δενδροειδή Υποστυλώματα

Το πιο δύσκολο και απαιτητικό κατασκευαστικό στοιχείο του κτηρίου είναι τα δενδροειδή υποστυλώματα. Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί όλη η διαδικασία από το σχεδιασμό μέχρι την κατασκευή των επιμέρους στοιχείων τους και την τοποθέτησή τους στο κτήριο.

Ψηφιακός Σχεδιασμός

Ο Αρχιτέκτονας αναπαρήγαγε την μορφή του δέντρου sidra χρησιμοποιώντας μια μέθοδο βελτιστοποίησης σ' ένα μοντέλο με τις ιδιότητες ενός κομματιού μετάλλου. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την αφαίρεση υλικού από τα σημεία που η κατασκευή δέχεται τις ελάχιστες ή μηδενικές τάσεις. Το πρόγραμμα που χρησιμοποίησε για τη δημιουργία και επεξεργασία του μοντέλου του είναι το ANSYS ένα πρόγραμμα προσομοίωσης των τάσεων που δέχεται μια κατασκευή. Κάθε φορά που αφαιρούσε υλικό από κάποιο σημείο το λογισμικό επαναπροσδιόριζε τις τάσεις σ' ολόκληρη τη δομή. Αυτό ήταν ένα πρώτο στάδιο του σχεδιασμού που επιδέχεται διορθώσεις και τροποποιήσεις ανάλογα με την στατική συμπεριφορά και την δυνατότητα πραγματοποίησης ή όχι του έργου.

Έπειτα το μοντέλο αναλύθηκε και βελτιώθηκε από την ομάδα SMART της Buro Happold. Ο ρόλος της ομάδας ήταν να επιλύσει τη γεωμετρία και να βρει την εσωτερική δομή που θα κάνει το έργο οικοδομήσιμο, αλλά θα κρατήσει ταυτόχρονα και την οργανική του μορφή. Ο επανασχεδιασμός των υποστυλωμάτων έγινε με Rhino για να επιτευχθεί η απαιτούμενη γεωμετρική λειότητα και για να είναι δυνατή η ανάλυση του μοντέλου σε επιμέρους τμήματα.

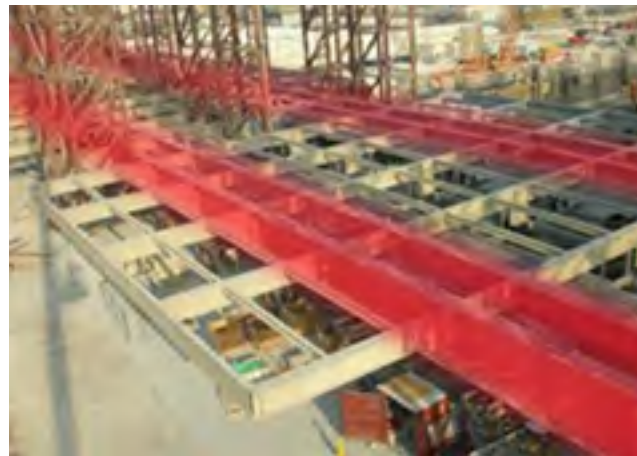
Από την οθόνη στο εργοτάξιο. Αρχικές προσεγγίσεις

Η μετατροπή του τρισδιάστατου μοντέλου σε πραγματοποιημένο έργο είναι μια διαδικασία εξερεύνησης λύσεων και επιλογής της βέλτιστης, η οποία θα ανταποκρίνεται στις κατασκευαστικές και στατικές απαιτήσεις του έργου και θα παρέχει την δυνατότητα μεταφοράς των επιμέρους στοιχείων από το εργοστάσιο στον τόπο δόμησης. Στη συνέχεια παρατίθενται λύσεις που εξετάστηκαν και απορρίφθηκαν είτε για λόγους κατασκευαστικούς είτε για λόγους πρακτικούς όπως η αδυναμία μεταφοράς τους από το εργοστάσιο στο εργοτάξιο.

Η πρώτη ιδέα που απορρίφθηκε ήταν η κατασκευή φέρουσας εξωτερικής επιφάνειας από φύλλα λαμαρίνας με ενδιάμεσα κάθετα μεταλλικά στοιχεία. Το τελικό πάχος της επιφάνειας θα ήταν 250 χιλιοστά και θα απαιτούσε ενίσχυση με ωπλισμένο σκυρόδεμα.

Η δεύτερη λύση που μιμούταν τους υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου απορρίφθηκε λόγω της δύσκολης κατασκευής και μεταφοράς. Σ' αυτή τα κλαδιά του δέντρου θα τα διαμόρφωναν κυλινδρικοί μεταλλικοί σωλήνες και έπειτα θα επενδυόταν με λεπτά φύλλα λαμαρίνας.

Μια άλλη μέθοδος που εξετάστηκε, αλλά απορρίφθηκε ήταν η διαμόρφωση των κλαδιών με ένα πλέγμα κυλινδρικών σωλήνων κοντά στην περιφέρεια τους και η επένδυσή του με μη φέρουσα λαμαρίνα σαν αυτό που χρησιμοποίησε για τα υποστυλώματα στην βιβλιοθήκη Sendai Mediatheque ο Toyo Ito.



Εικόνα 69. Οι κόκκινοι δοκοί είναι αυτοί που θα αναλάβουν τις κύριες φορτίσεις της οροφής, ανάμεσά τους έχουν τοποθετηθεί οι ράβδοι προέντασης

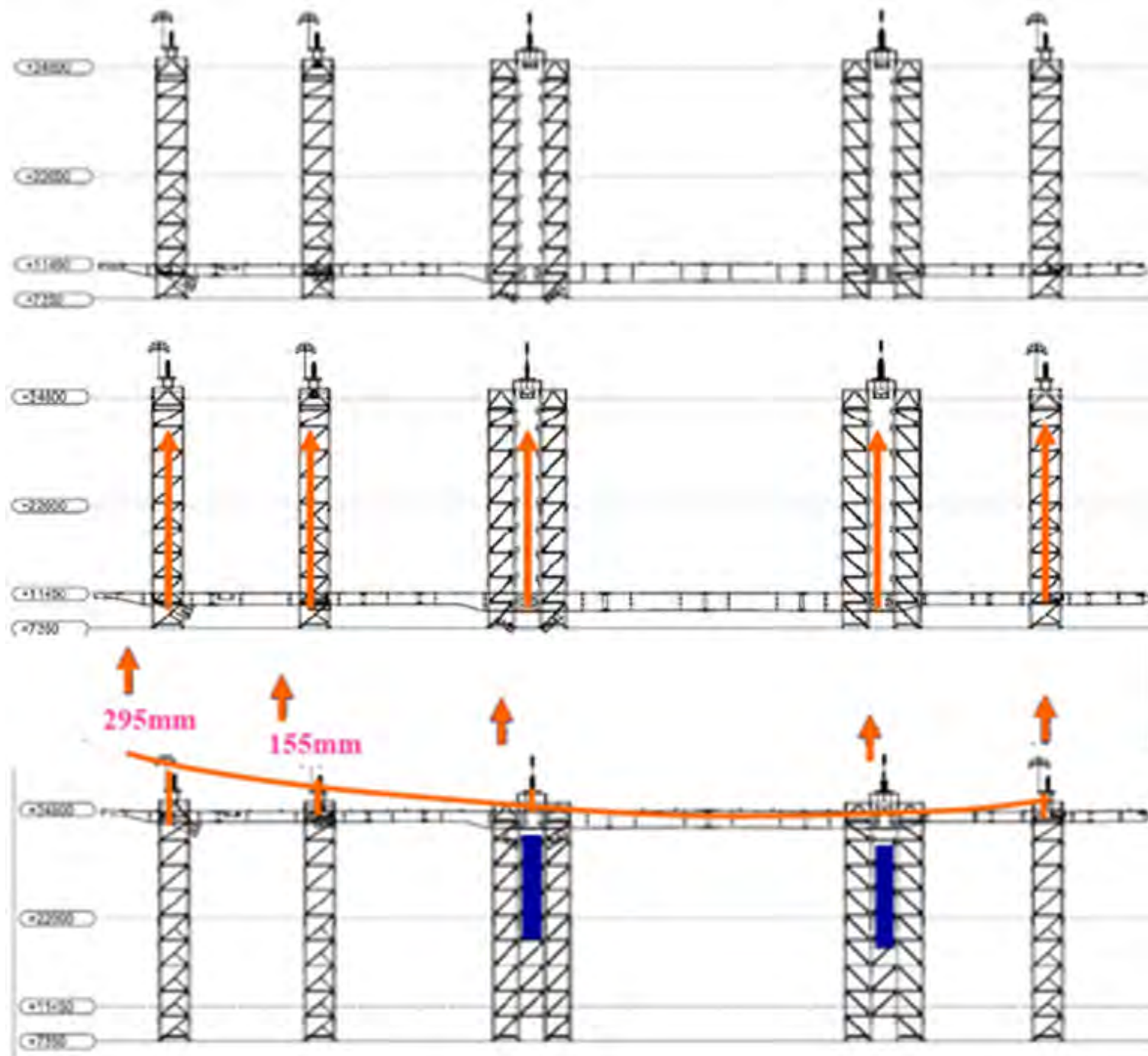


Εικόνα 70. Η μεταλλική βάση των δενδροειδών στοιχείων της πρόσοψης



Εικόνα 71. Το πρώτο στάδιο κατασκευής του έργου είναι η ανέγερση του ξυλότυπου του υποστέγου.

Εικόνες 72,73,74.
Κατασκευαστικές
φάσεις της πλάκας
οροφής στο
χώρο υποδοχής.
Ο μεταλλικός
οπλισμός (πλαίσιο)
συναρμολογείται
στο έδαφος και
ανεγείρεται στην
τελική του θέση



Η τελική επιλογή

Η μέθοδος κατασκευής που επιλέχτηκε τελικά ήταν η δημιουργία ενός πυρήνα μεταλλικής οκταγωνικής διατομής ο οποίος θα αποτελεί τον φέροντα οργανισμό της δομής και η εφαρμογή μεταλλικής μη φέρουσας μεμβράνης εξωτερικά που θα αποδίδει την μορφή του μοντέλου. Η επιλογή του οκτάγωνου αποτελεί κατασκευαστικά τη χρυσή τομή ανάμεσα σ' ένα τετράγωνο πυρήνα και την κυλινδρική διατομή των δέντρων.

Κάποιες παραλλαγές αυτής της μεθόδου ήταν να κατασκευαστούν και να μεταφερθούν ενιαία τμήματα που προκύπτουν από τις εγκάρσιες τομές των δέντρων κατά διαστήματα, ή να προκύψουν οι οκταγωνικές διατομές από επιμέρους μεταλλικές πλάκες, που θα μεταφέρονται εύκολα και θα συναρμολογούνται στο εργοτάξιο.

Μια άλλη παραλλαγή της ιδέας είναι η διαμόρφωση του οκτάγωνου πυρήνα με διπλά ταινίες, η οποία απορρίφθηκε γιατί δεν ευνοούσε τη συντήρηση του έργου καθώς απέκλειε την πρόσβαση σε ορισμένα σημεία και έπασχε στους κόμβους.

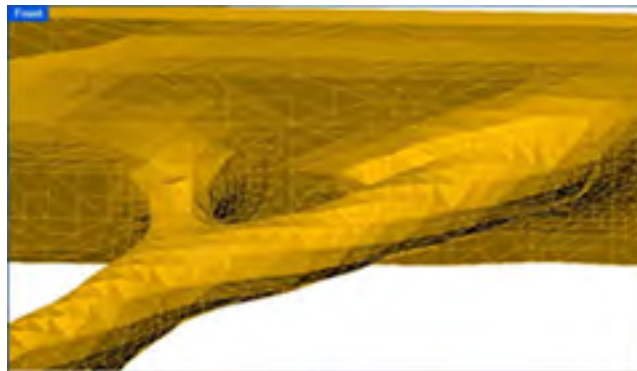
Τελικά επικράτησε η άποψη της κατασκευής των τμημάτων του πυρήνα στο εργοστάσιο με χοντρές πλάκες χάλυβα και η συναρμολόγησή τους με μπουλόνια. Ο πυρήνας διαμορφώνεται από ευθύγραμμα στοιχεία και όπου αλλάζει η κατεύθυνση των κλαδιών γίνεται πυραμιδοειδής. Τα κομμάτια του πυρήνα είναι ενιαία οκτάγωνα στις άκρες που τα κλαδιά είναι λεπτότερα ενώ εκεί που τα κλαδιά είναι παχύτερα τα οκτάγωνα χωρίζονται σε δύο και σε τέσσερα τμήματα. Έτσι, αποκτά μικρότερη διατομή για να μεταφέρεται πιο εύκολα (δρομολόγιο: Μαλαισία - Ντόχα) εφόσον δεν μπορεί να αποσυναρμολογηθεί πλήρως σε μικρότερες πλάκες και το πάχος των κλαδιών ρυθμίζεται με τους αποστάτες πάνω στους οποίους εφαρμόζεται η τελική

επιφάνεια.

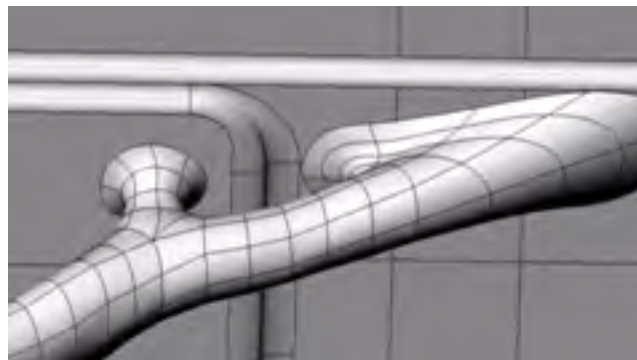
Οι κόμβοι κατασκευάστηκαν και αυτοί με ευθύγραμμες πλάκες και έχουν πυραμιδοειδή μορφή.

Αφού αποφασίστηκε η μορφή και οι διαστάσεις των φερόντων στοιχείων της κατασκευής και μοντελοποιήθηκαν ελέγχθηκε η αντοχή τους με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης ANSYS. Στη συνέχεια, το αρχικό μοντέλο της επιφάνειας του δένδρου και το μοντέλο του οκταγωνικού πυρήνα εισάχθηκαν στο Rhino προκειμένου να αναλυθούν σε επιμέρους τμήματα και να μας δώσουν την θέση και το μήκος των αποστατών, αλλά και την γεωμετρία των κομματιών της εξωτερικής επιφάνειας.

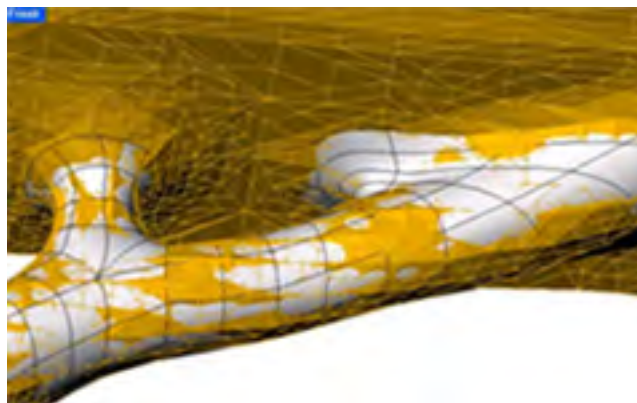
Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω ο πυρήνας αποτελείται από επίπεδες πλάκες ενώ το εξωτερικό περίβλημα είναι μια δομή με ελεύθερες καμπύλες που έχουν σύνθετη καμπυλότητα. Είναι επομένως προφανές ότι η ομάδα SMART επικεντρώθηκε στην κατασκευαστική ανάλυση του περιβλήματος περισσότερο και λιγότερο στο πυρήνα. Για το εξωτερικό περίβλημα χρησιμοποιήθηκε λαμαρίνα πάχους 6 χιλιοστών. Η διαμόρφωση στοιχείων με σύνθετη καμπυλότητα σε μια λαμαρίνα 6 χιλιοστών είναι μια χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία. Γι' αυτό το λόγο η ομάδα εργάστηκε ώστε να έχουν τα περισσότερα τμήματα απλή καμπυλότητα. Ο έλεγχος και η επεξεργασία των κομματιών που θα προκύψουν από την ενιαία επιφάνεια έγινε με το λογισμικό που δημιούργησε η ίδια η ομάδα, το SmartForm. Τελικά προέκυψε το 70% των τμημάτων της επιφάνειας να έχει απλή καμπυλότητα και το 30% σύνθετη, κυρίως τα τμήματα που βρίσκονται στους κόμβους των κλαδιών.



Εικόνα 75. Η αρχική προσέγγιση της μορφής τμήματος των δενδροειδών δοκών στο Ansys. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αφαίρεσης υλικού.



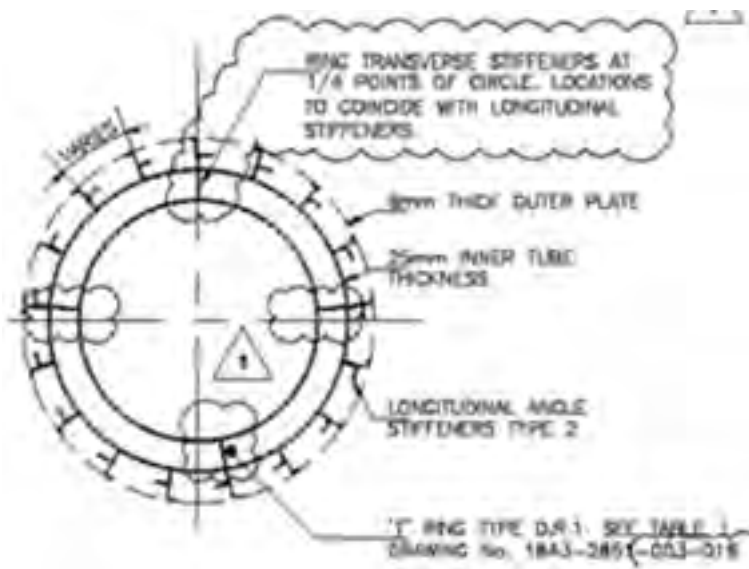
Εικόνα 76. Η τελική μορφή του ψηφιακού μοντέλου κατόπιν επεξεργασίας στο Rhino.



Εικόνα 77. Αντιπαραβολή των δύο ψηφιακών μοντέλων.



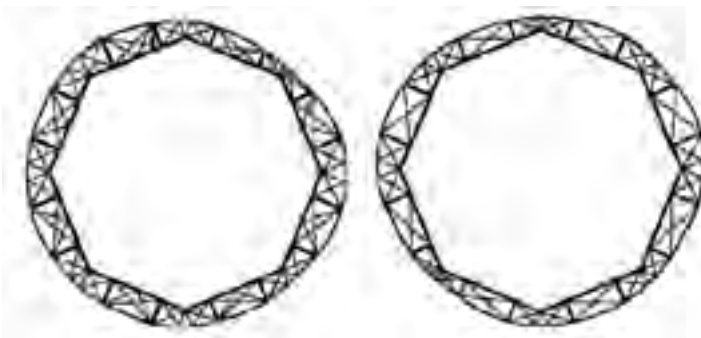
Εικόνα 78. Οι τρεις διαφορετικές εκδοχές της πρώτης λύσης



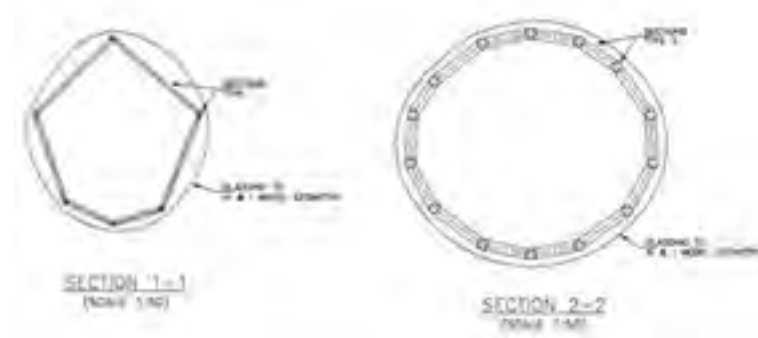
Εικόνα 79. Η 2η πρόταση κατασκευής με βάση το πρότυπο υποθαλάσσιων αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου. Η πρόταση απορρίφθηκε λόγω δυσκολιών στην κατασκευή και στη μεταφορά.



Εικόνα 80. Τογο Ito. Τα υποστυλώματα στην βιβλιοθήκη Sendai Mediatheque



Εικόνα 81. Η τέταρτη πρόταση (τελική λύση). Εγκάρσιες τομές κλαδιού. Με διαγράμμιση φαίνεται η απόσταση του οκταγωνικού πυρήνα από το κέλυφος



Εικόνα 82. Τομή σε δύο διαφορετικά σημεία του ίδιου υποστυλώματος. στην βιβλιοθήκη Sendai Mediatheque

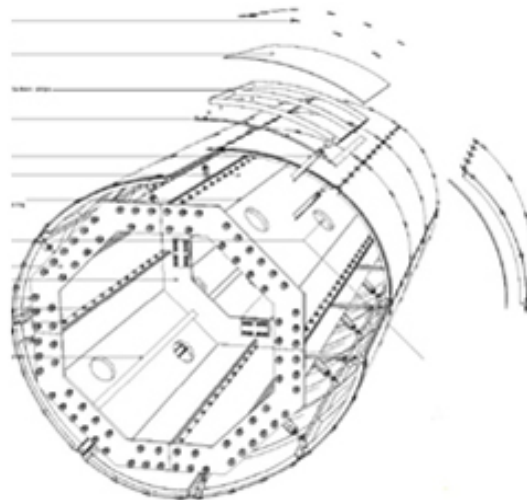
Εξαγωγή των τεμαχίων της κατασκευής από το Rhino

Το τρισδιάστατο μοντέλο αρχικά εισάγεται στο Rhino και αναλύεται σε μικρότερα τεμάχια με απλή γεωμετρία. Τα αποτελέσματα είναι δισδιάστατα σχήματα σε αρχεία DXF τα οποία αναγνωρίζουν οι μηχανές CNC για την κοπή των τεμαχίων. Την εργασία αυτή έχει αναλάβει η ομάδα SMART της Buro Happold. Τα αρχεία DXF αποστέλλονται στο εργοστάσιο της Victor Buyck στη Μαλαισία και εκεί γίνεται η κοπή και συναρμολόγηση. Τα στάδια αυτής της διαδικασίας θα τα δούμε παρακάτω με λεπτομέρεια για ένα τμήμα του έργου. Ξεκινάμε την ανάλυση με τον εσωτερικό πυρήνα. Τα μεταλλικά ελάσματα κόβονται από πλάκες σιδήρου με μηχανές CNC και η συναρμογή τους γίνεται με κόλληση εκτός από τα τμήματα που θα συναρμολογηθούν στο εργοτάξιο στα οποία θα μπουν μπουλόνια. Οι πλάκες των τμημάτων που βρίσκονται κοντά στη βάση έχουν πάχος 60 χιλιοστά.

Στη συνέχεια κατασκευάζονται τα κομμάτια της εξωτερικής επιφάνειας, η οποία αποτελείται από δακτυλίδια σε όλο το μήκος των κλαδιών εκτός από τους κόμβους. Κάθε δακτυλίδι αποτελείται από οκτώ τμήματα όσες είναι και οι πλευρές του εσωτερικού πυρήνα. Οι καμπύλες πλάκες της επιφάνειας βιδώνονται πάνω σε μεταλλικούς αποστάτες που είναι καρφωμένοι στον κεντρικό βραχίονα και το μήκος τους μας το δίνει η κάθετη προβολή που συνδέει τους βραχίονες αυτούς με το εξωτερικό περίβλημα, με την βοήθεια του Rhino.

Ανάλυση της επιφάνειας σε μικρότερα τμήματα

Η επιφάνεια υποδιαιρείται στη συνέχεια μέσω της προβολής πάνω στην κυλινδρική μεταλλική επιφάνεια ενός κανάβου που έχει οκτώ γραμμές κατά μήκος των κλαδιών, όσες είναι και οι πλευρές του εσωτερικού πυρήνα, ενώ οι εγκάρσιες προκόπτονται από την ανάλυση της επιφάνειας με το SmartForm.



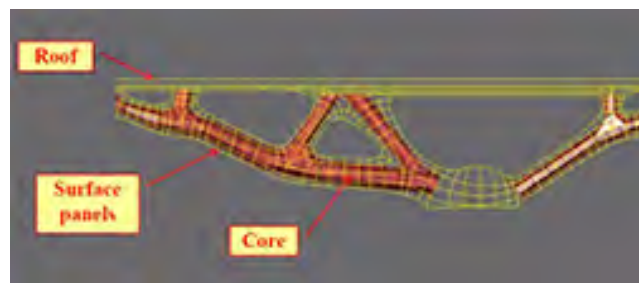
Εικόνα 83. Ψηφιακό μοντέλο γεωμετρικής ανάλυσης και οργάνωσης της γενικής κατασκευαστικής λογικής των κλαδιών



Εικόνα 84. Τρεις διαφορετικές εκδοχές των μεταλλικών πλακών και της εφαρμογής της εξωτερικής επιφάνειας



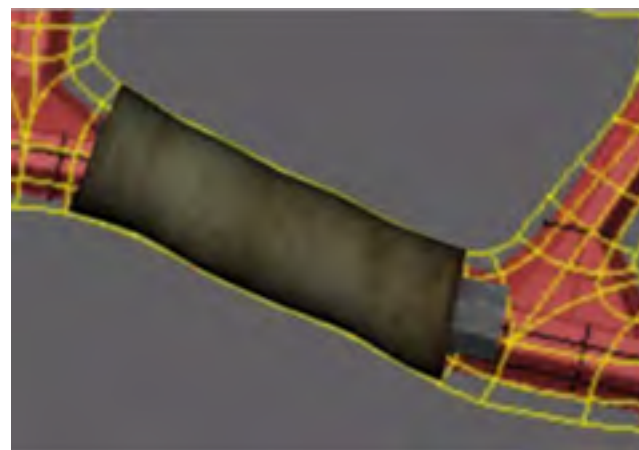
Εικόνα 85. Κατασκευασμένοι πυρήνες κλαδιών με κόμβους αλλαγής διεύθυνσης.



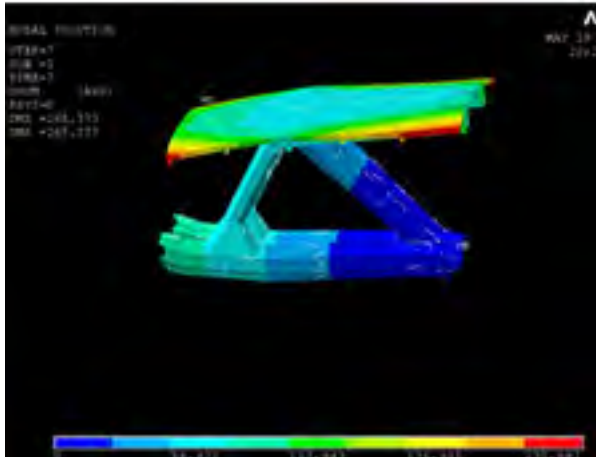
Εικόνα 86. Ψηφιακή αναπαράσταση (x-ray) στεγαστρου, πυρήνα κλαδιών και πετσώματος.



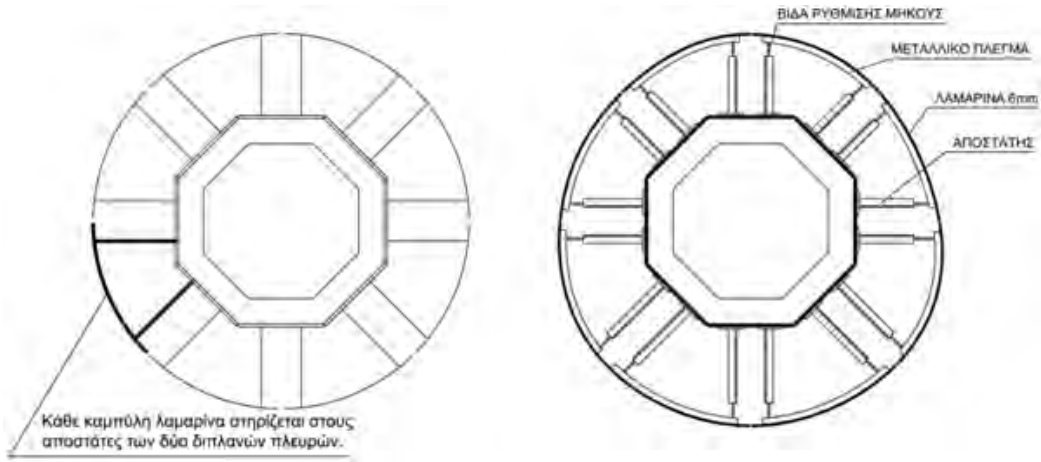
Εικόνα 87. Ψηφιακή αναπαράσταση με εστίαση στα σημεία διπλής καμπυλότητας (σκουρό γκρι).



Εικόνα 88. Ψηφιακή τμήματος των κλαδιών στο οποίο θα εξεταστεί παρακάτω η κατασκευαστική λογική.



Εικόνα 89. Προσομοίωση των τάσεων του τελικού μοντέλου στο ANSYS. Με κόκκινο είναι οι περιοχές που ενδεχομένως να οδηγήσουν σε αστοχία και πρέπει να ενισχυθούν περισσότερο.



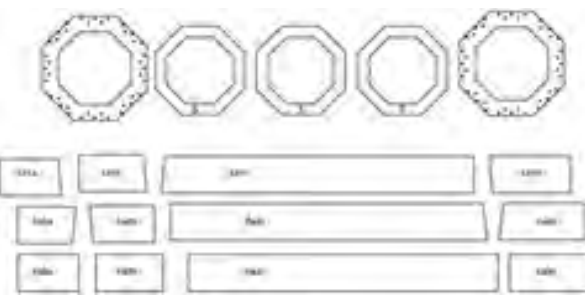
Εικόνα 90. Κατασκευαστική τομή κλαδιού.



Εικόνα 91. Ανάλυση του μεταλλικού πυρήνα σε επίπεδα κατασκευαστικά στοιχεία



Εικόνα 93. Ψηφιακή γεωμετρική ανάλυση τμήματος κλαδιού. Οι γαλάζιες γραμμές είναι οι αρμοί των πλακών που θα προκύψουν από την ενιαία επιφάνεια.



Εικόνα 92. Καρτέλα με τα κομμάτια που θα κοπούν σε μηχανή CNC. Κάθε τμήμα είναι αριθμημένο

Κατασκευή του πλέγματος πάνω στο οποίο θα πατήσουν οι μεταλλικές πλάκες

Το εν λόγω μεταλλικό πλέγμα είναι απαραίτητο για δύο λόγους. Πρώτον γιατί ορίζει την καμπυλότητα που θα ακολουθήσει και η εξωτερική μεταλλική επιφάνεια καθώς εξάγεται από κάθετες τομές στο μοντέλο, και δεύτερο γιατί ενισχύει την αντοχή των πλακών που τη διαμορφώνουν. Το πλέγμα ακολουθεί τον κάναβο των πλακών, αλλά δεν συμπίπτει μ' αυτόν, βρίσκεται δηλαδή μερικά εκατοστά παράλληλα για πρακτικούς και κατασκευαστικούς λόγους.

Δημιουργία επίπεδων δισδιάστατων μορφών που προκύπτουν από το τρισδιάστατο μοντέλο

Για την κοπή των επιμέρους τμημάτων πρέπει η επιφάνεια να «ξεδιπλωθεί» σε έναν οριζόντιο «καμβά». Η εργασία αυτή γίνεται στο Rhino. Την κατασκευαστική λογική ενός σημείου της επιφάνειας θα δείξουμε πιο κάτω. Τρία είναι τμήματα της δομής που αναλύονται στο Rhino: το εξωτερικό περίβλημα που αποτελείται από φύλλα λαμαρίνας πάχους 6 χιλιοστών, το μεταλλικό πλέγμα, το οποίο κόβεται πάνω σε φύλλα λαμαρίνας και οι αποστάτες, που διαμορφώνονται από μεταλλικές γωνίες και καταλήγουν σε βίδες ρύθμισης μήκους. Τα δύο τμήματα της επιφάνειας, η λαμαρίνα και το πλέγμα συγκολλούνται εξ αρχής για να πάρει και η λαμαρίνα την σωστή καμπυλότητα. Το επόμενο βήμα είναι να αναρτηθούν πάνω στον οκταγωνικό πυρήνα. Επειδή ο πυρήνας δεν βρίσκεται στο κέντρο της επιφάνειας και αυτή δεν είναι τέλειος κύκλος οι αποστάτες που κατασκευάζονται από μεταλλικές γωνίες έχουν διαφορετικό μήκος. Το μήκος τους και η θέση τους προκύπτουν από την ορθή προβολή των σημείων του πλέγματος και των πλακών του πυρήνα.

Κάποια μικροσφάλματα στις μετρήσεις και στην κατασκευή των τεμαχίων του εξωτερικού περιβλήματος υπάρχει περιθώριο να διορθωθούν με την εφαρμογή βιδών ρύθμισης μήκους, ενώ για να είναι δυνατές κάποιες πλάγιες μικρομετακινήσεις, υπάρχουν οβάλ οπές στα ελάσματα που στηρίζουν τις πλάκες.

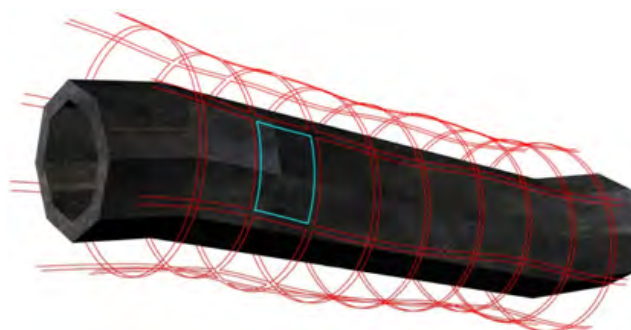
Μεταφορά και τοποθέτηση των κλαδιών στο κτήριο

Τα τμήματα των κλαδιών που έχουν κατασκευαστεί στο εργοστάσιο ενώνονται και πάνω τους τοποθετούνται οι αποστάτες και οι πλάκες με το πλέγμα, για να ελεγχθεί η εφαρμογή τους και να διορθωθούν κάποιες ατέλειες. Τα κλαδιά ολοκληρωμένα δηλαδή ο πυρήνας τους και το εξωτερικό περίβλημα έχουν διάμετρο 7 μέτρων στη βάση και 4 μέτρων στην κορυφή. Τα τμήματα του πυρήνα στην κορυφή είναι λεπτότερα και αποτελούνται από ένα ενιαίο οκτάγωνο, πιο κάτω το οκτάγωνο χωρίζεται σε δύο τμήματα και πιο κάτω στη βάση σε τέσσερα. Αυτό κάνει πιο εύκολη τη μεταφορά τους. Έπειτα αποσυναρμολογούνται προκειμένου να χωρέσουν σε εμπορευματοκιβώτια (TEU) των 12 μέτρων. Στο εργοτάξιο τα κομμάτια του εσωτερικού πυρήνα τοποθετούνται πάνω σε βάρθρα ανάμεσα στους πυλώνες και ενώνονται. Σ' αυτή τη φάση δεν γίνεται ακόμα εφαρμογή της εξωτερικής επιφάνειας. Μεγάλη προσοχή σ' αυτή τη φάση δίνεται ώστε τα άκρα των κλαδιών να βρίσκονται ακριβώς κάτω από τις αναμονές της στέγης με τις οποίες θα συνδεθούν.

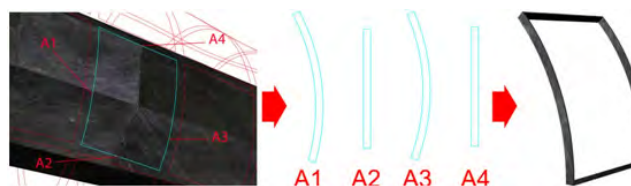
Τελικά, τα κλαδιά υψώνονται και ενώνονται με τη στέγη. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία τοποθετούνται και οι αποστάτες στους οποίους θα αναρτηθούν οι πλάκες της επιφάνειας. Το τελικό στάδιο της κατασκευής του φέροντα οργανισμού, είναι η σκυροδέτηση της βάσης και η ένωση της με τα κλαδιά. Η βάση επίσης επενδύεται με λαμαρίνα η



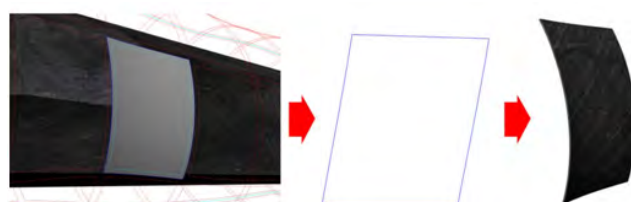
Εικόνα 94. Ψηφιακή γεωμετρική ανάλυση τμήματος κλαδιού. Με γαλάζιο χρώμα είναι ο κάναβος των πλακών και με κόκκινο αυτός του μεταλλικού πλέγματος



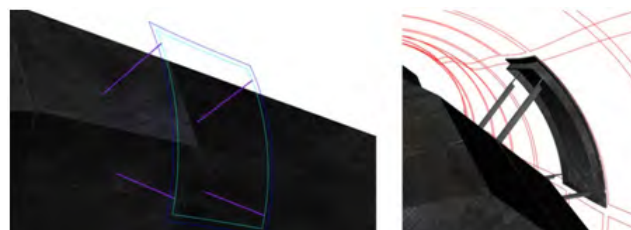
Εικόνα 95. Στο γαλάζιο τετράγωνο που είναι τμήμα του μεταλλικού πλέγματος οι δύο κάθετες στον κορμό γραμμές έχουν καμπυλότητα ενώ οι δύο παράλληλες έχουν ελάχιστη καμπυλότητα και θεωρούνται ευθείες



Εικόνα 96. Απ' τις ακμές του τρισδιάστατου μοντέλου προκύπτει το προφίλ των τμημάτων του πλέγματος που κόβονται σε CNC μηχανές και έπειτα συγκολλούνται για να διαμορφώσουν τους φορείς του



Εικόνα 97. Το καμπύλο τμήμα της επιφάνειας ξεδιπλώνεται στο Rhino για να προκύψει ένα δισδιάστατο σχήμα. Έπειτα γίνεται η κοπή σε CNC και ξανά καμπυλώνεται χρησιμοποιώντας σαν οδηγό το πλέγμα.



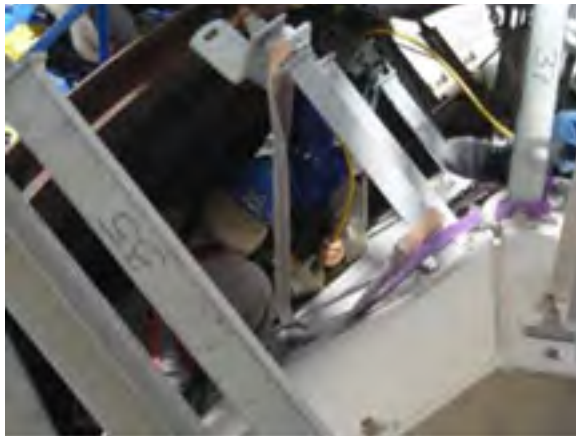
Εικόνα 98. Λεπτομέρεια τρισδιάστατης συναρμογής



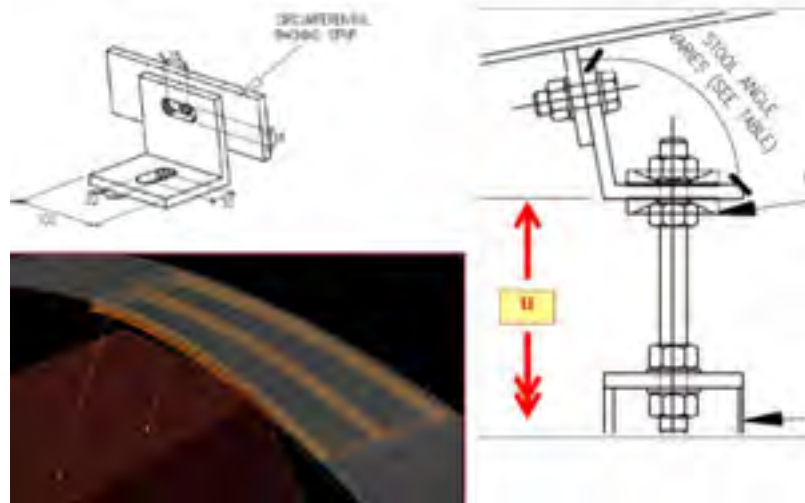
Εικόνα 98. Λεπτομέρεια τοποθέτησης φύλλου λαμαρίνας επάνω στις ρυθμιστικές ακίδες του οκταγωνικού πυρήνα



Εικόνα 101. Ολοκληρωμένο τμήμα κλαδιού και μεταλλικές αναμονές για την κατ' επέκταση συνέχεια του κελύφους.



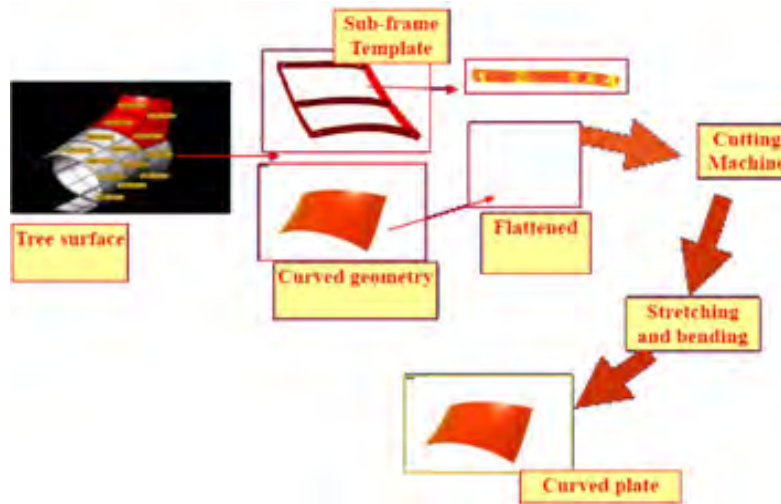
Εικόνα 99. Μικρορυθμίσεις του ύψους των ακίδων



Εικόνα 102. Λεπτομέρεια μεταλλικού μηχανισμού που επιτρέπει μικρομετατοπίσεις της λαμαρίνας του κελυφους



Εικόνα 100. Ολοκληρωμένο τμήμα κλαδιού. Διακρίνονται η μεταλλική επιφάνεια του οκταγώνου, οι ρυθμιζόμενοι αποστάτες τα καμπλωμένα τεμάχια λαμαρίνας και οι εγκάρσιες νευρώσεις του κελύφους.

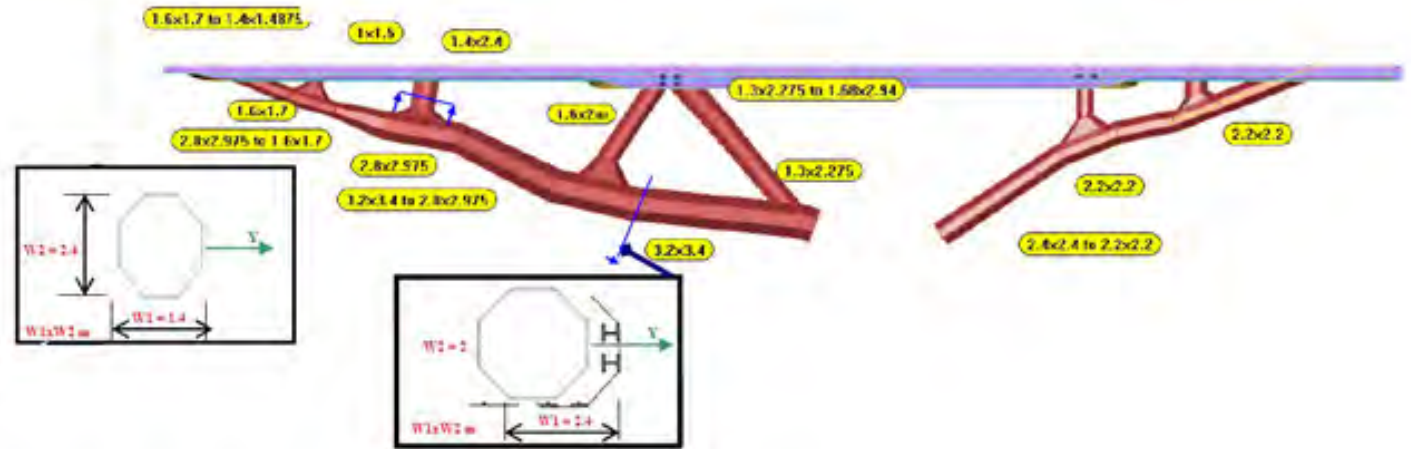


Εικόνα 103. Σχηματική αναπαράσταση των κατασκευαστικών σταδίων για την ανέγερση των κλαδιών.

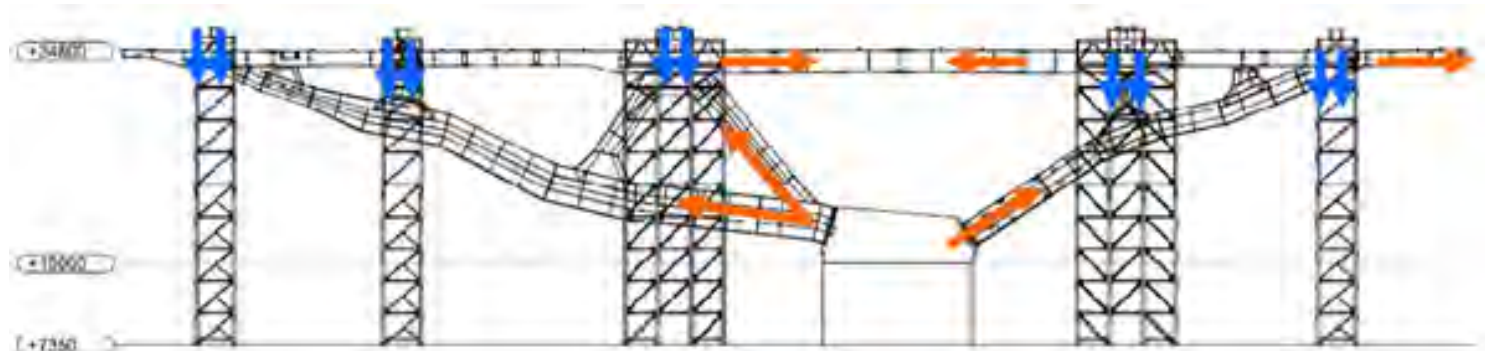
οποία ενώνεται με την επιφάνεια των κλαδιών και μμείται τον κορμό του δέντρου. Τα τμήματα του εξωτερικού περιβλήματος του κορμού κατασκευάζονται εξ αρχής στο εργοστάσιο, όμως οι αποστάτες ρυθμίζονται επί τόπου γιατί η ακρίβεια της κατασκευής που υπάρχει στα μεταλλικά στοιχεία είναι αδύνατη στο σκυρόδεμα.

Απομάκρυνση των βοηθητικών πυλώνων

Είναι μια εργασία που απαιτεί μεγάλη προσοχή καθώς είναι η πρώτη φορά που η κατασκευή δοκιμάζει τις αντοχές της σε φόρτιση. Με τη χρήση υδραυλικών εμβόλων οι πυλώνες αποφορτίζονται ταυτόχρονα σε 4 στάδια και όταν η κατασκευή λάβει όλα τα φορτία τότε αφαιρούνται οι προσωρινοί σύνδεσμοι. Στο τέλος απομακρύνονται και οι πυλώνες.



Εικόνα 104. Σκαρίφημα με την τελική θέση τοποθέτησης των επί μέρους τμημάτων των κλαδιών



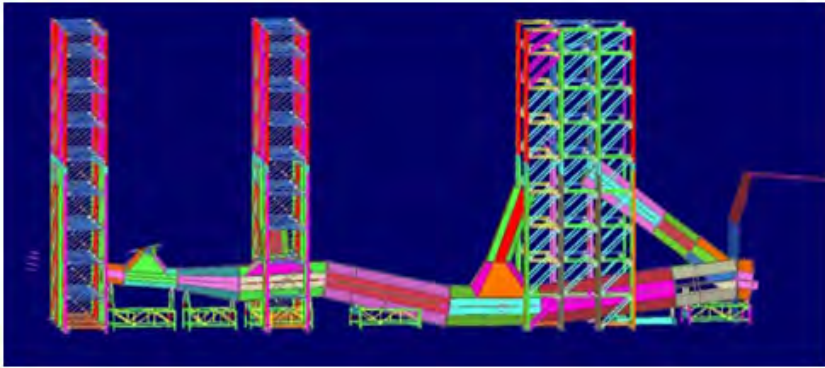
Εικόνα 105. Σχηματική αναπαράσταση των τάσεων στα βασικά δομικά στοιχεία της κατασκευής



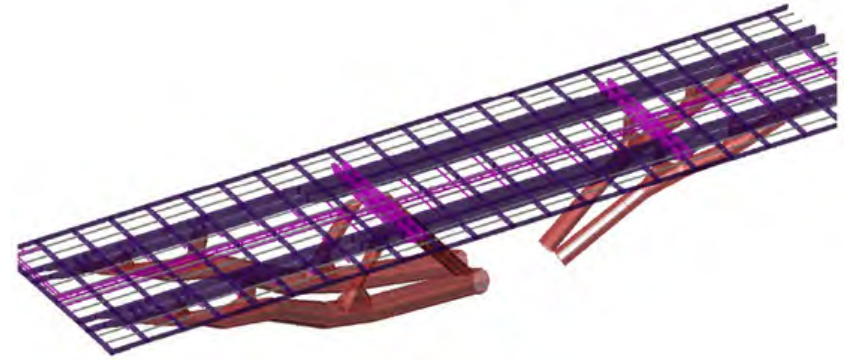
Εικόνα 106. Μεταλλικά τεμάχια πυρήνα κλαδιών έτοιμα προς μεταφορά με εμπορευματοκιβώτια μήκους 12 μέτρων



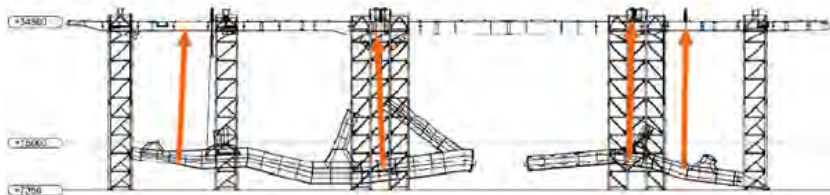
Εικόνα 107. Απομάκρυνση των προσωρινών πυλώνων με μηχανικά μέσα



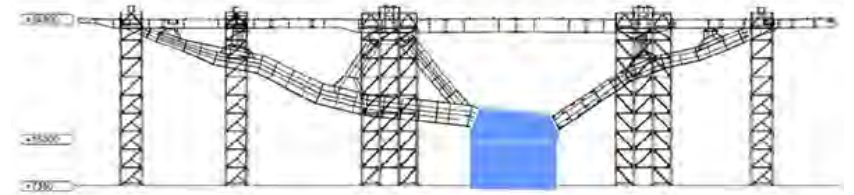
Εικόνα 108. Τμήματα του πυρήνα πριν την ανάρτησή τους στην τελική θέση τους.



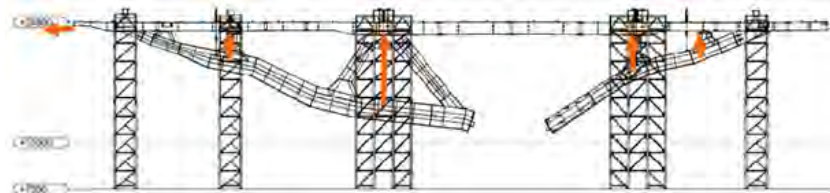
Εικόνα 111. Διαμήκεις και εγκάρσιες ενισχύσεις στα σημεία που τα κλαδιά συναντούν την πλάκα και διάταξη της μεταλλικής εσχάρας



Εικόνα 109. Σκαρίφημα ανάρτησης τμημάτων του πυρήνα στην τελική τους θέση



Εικόνα 112. Σκαρίφημα αναπαράστασης αντεστραμένου ζευκτού. Τα κλαδιά-εγκυστήρες συναντώνται στο γαλάζιο κόμβο σύνδεσης



Εικόνα 110. Σκαρίφημα αναρτημένων τεμαχίων της κατασκευής



Εικόνα 113. Έγχυση σκυροδέματος στον κόμβο σύνδεσης των κλαδιών. Φωτογραφία από το εργοτάξιο

Σκυροδέτηση πλάκας

Για να εφαρμοστεί το σκυρόδεμα στην οροφή αρχικά προτάθηκε να χρησιμοποιηθούν μόνιμα πάνελ από GRP (Glass Reinforced Plastic) ένα είδος πλαστικού ενισχυμένου με γυαλί. Αυτή η λύση απορρίφθηκε από τους εργοδότες οι οποίοι ήθελαν μεταλλικά πάνελ. Τελικά η κάτω πλευρά της οροφής καλύφθηκε από μόνιμο μεταλλότυπο και σκυροδετήθηκε με 200 χιλιοστά πλάκα. Η πλάκα της οροφής έπεσε σε δύο φάσεις, πρώτα στο κέντρο της και μετά στις άκρες της για να ελαχιστοποιηθούν οι τάσεις στη θεμελίωση.



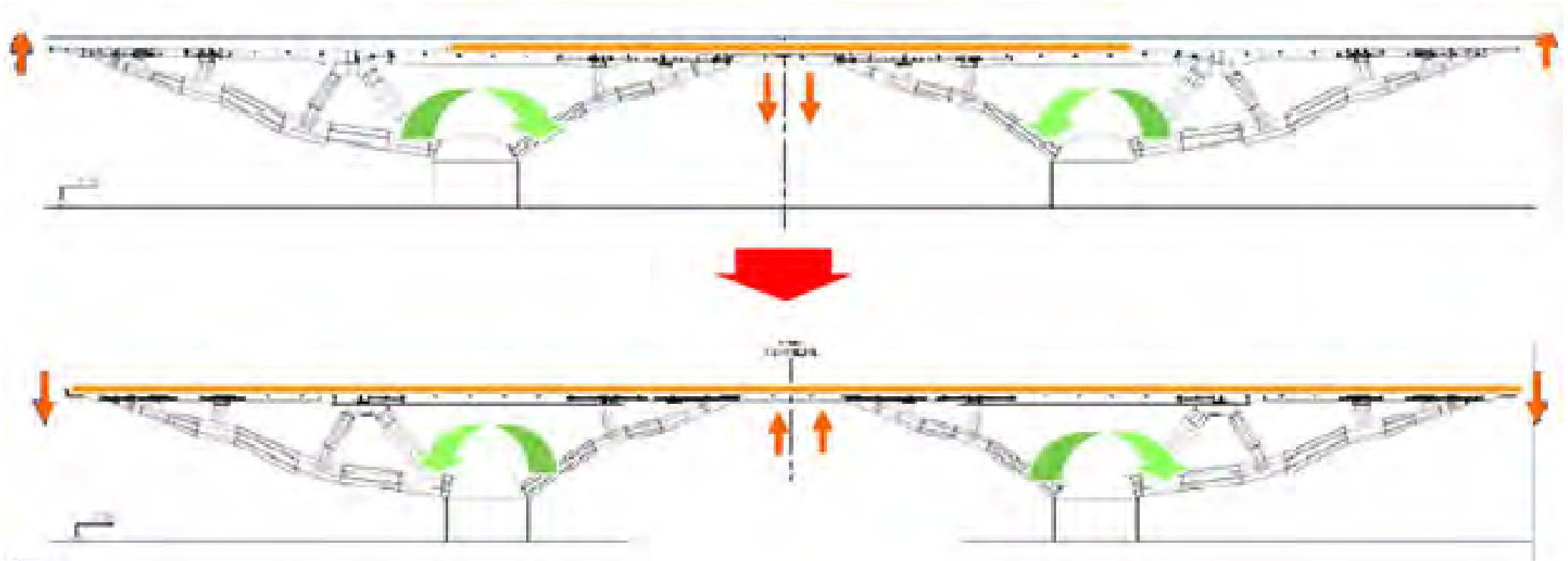
Εικόνες 114 & 115. Τα τελικά στάδια μορφοποίησης του κελύφους των κλαδιών λίγο πριν από τη σκυροδέτηση της πλάκας του υπόστεγου. Φωτογραφίες από το εργοτάξιο



Εικόνα 116. Νωπό σκυρόδεμα στην πλάκα του υπόστεγου λίγη ώρα μετά τη σκυροδέτηση. Φωτογραφία από το εργοτάξιο



Εικόνες 117,118 & 119. Λεπτομέρειες του μεταλλότυπου και του οπλισμού της πλάκας του υπόστεγου. Όλος ο υπόστεγος όγκος υποδοχής του κτιρίου κατασκευάστηκε πριν από τον κύριο όγκο του κτιρίου.



Εικόνα 120. Οι δύο φάσεις καθέλκυσης της πλάκας οροφής του όγκου υποδοχής. Πρώτα έπεσε στο κέντρο της και μετά στις άκρες της για να ελαχιστοποιηθούν οι τάσεις στη θεμελίωση

Τοποθέτηση εξωτερικού κελύφους

Το τελευταίο στάδιο της κατασκευής του δένδρου είναι η τοποθέτηση των καμπύλων μεταλλικών πλακιδίων με τέτοιο τρόπο ώστε να μην φαίνονται αρμοί και ασυνέχειες προκειμένου να επιτευχθεί η τέλεια γεωμετρική λειότητα. Η πρώτη και σημαντικότερη φάση αυτής της διαδικασίας έγινε στο εργοστάσιο. Σ' αυτή τη φάση τα πλακίδια τοποθετούνται και γίνονται μικρορυθμίσεις για τις μεταβολές που ενδεχομένως να έγιναν εξαιτίας της φόρτισης της κατασκευής. Μετά την εφαρμογή των επιμέρους τμημάτων οι αρμοί στοκάρονται με σιδηρόστοκο και βάφονται. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή του δέντρου ξεκινά η ανέγερση του υπόλοιπου κτηρίου κατά τις γνωστές και συμβατικές μεθόδους.

Υαλοστάσια

Τα υαλοστάσια της μακράς πλευράς τοποθετούνται στο κέντρο του υπόστεγου τέμνοντας το κορμό του δένδρου στη μέση και δημιουργώντας ένα σύστημα κλαδιών εσωτερικά και ένα συμμετρικό στην εξωτερική πλευρά. Ένα από τα προβλήματα που προκύπτει είναι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον εσωτερικό κλιματιζόμενο χώρο και στο εξωτερικό με την μεγάλη ζέση που επικρατεί στην περιοχή. Γι' αυτό το λόγο τοποθετήθηκαν αρμοί διαστολής που επιτρέπουν ανεξάρτητες μικρομετακινήσεις του κασώματος σε σχέση με τα κλαδιά.



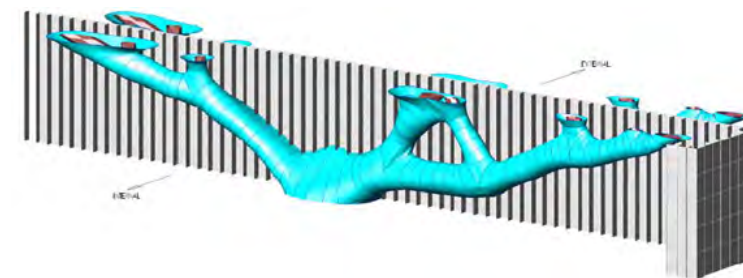
Εικόνα 121. Ανέγερση των εσωτερικών κατασκευών του κτηρίου. Φωτογραφία από το εργοστάσιο

Εικόνα 122. Άποψη του χώρου υποδοχής από το εσωτερικό. Διακρίνονται οι δενδροειδής δοκοί και η γυάλινη πρόσοψη του κτηρίου

Εικόνα 123. Άποψη του κτηρίου από τον περιβάλλοντα χώρο. Στη φωτογραφία δεσπόζουν οι δενδροειδής δοκοί και η γυάλινη πρόσοψη.



Εικόνα 124. Φωτορεαλιστική αναπαράσταση του κτηρίου με τα βασικά στοιχεία της πρόσοψης και τη διάρθρωση των όγκων υποδοχής - λειτουργίας.



Εικόνα 125. Το επίπεδο της γυάλινης πρόσοψης του κτηρίου τέμνει τους παραμετρικούς όγκους των κλαδιών.



Εικόνα 126. Arata Isozaki. Άποψη από το εσωτερικό του χώρου υποδοχής του Πανεπιστημιακού Συνεδριακού Κέντρου στη Doha.

Συμπεράσματα

Σχεδιασμός και οικοδομική ανάλυση

Η κατασκευή καμπύλων φορέων με σύνθετη καμπυλότητα είναι μια εργασία που σε όλα τα στάδιά της απαιτεί την χρήση Η/Υ. Κοινή συνισταμένη των έργων που αναλύσαμε είναι η δημιουργία πολλών τομών κάθετων και οριζόντιων. Κάτι τέτοιο είναι αδύνατο χωρίς τα προγράμματα παραμετρικού σχεδιασμού. Το τρισδιάστατο μοντέλο που φτιάχνεται στον υπολογιστή δεν είναι απλώς ένα πρόπλασμα που απεικονίζει την μορφή του κτηρίου, αλλά ένα εργαλείο για την κατασκευή του. Η περίπλοκη μορφή του αναλύεται σε απλά σχήματα τα οποία θα χρησιμεύσουν είτε για να διαμορφώσουν καλούπια όταν πρόκειται για χυτή κατασκευή, είτε μέλη του. Εδώ πρέπει να τονίσουμε την σημασία της CNC (Computer Numerically Controlled) τεχνολογίας που επιτρέπει την συνεργασία του Η/Υ με μηχανήματα κοπής, router, laser, υδροκοπή, φρέζες κλπ. Οι CNC μηχανές προσφέρουν ταχύτητα και ακρίβεια για μια εργασία που αν γινόταν με το χέρι θα απαιτούσε την εκτύπωση των στοιχείων που προκύπτουν απ' το πρόγραμμα σε χαρτί την αποτύπωσή τους πάνω στην επιφάνεια που πρόκειται να κοπεί και το προσεκτικό κόψιμο. Συμπεραίνεται έτσι ότι η απουσία των μηχανών CNC κάνει την εργασία δύσκολη και χρονοβόρα, όμως η απουσία των προγραμματίων παραμετρικού σχεδιασμού την καθιστούν αδύνατη.

Ο ρόλος του αρχιτέκτονα

Ο αρχιτέκτονας σε ένα τέτοιου είδους έργο γίνεται ίδιος κτίστης. Δεν επιβλέπει απλώς κάποιες εργασίες αλλά συμμετέχει και ο ίδιος. Ενώ σε μια συμβατική κατασκευή ο ρόλος του αρχιτέκτονα είναι να κάνει τις μετρήσεις και τις χαράξεις και το καλούπωμα να γίνεται από τους τεχνίτες βάση αυτών των μετρήσεων με διάφορους τρό-

πους, στις καμπύλες κατασκευές ο ρόλος του είναι να φτιάχνει ο ίδιος τα καλούπια και τα μέλη του κτηρίου και να τα τοποθετεί σε συγκεκριμένες θέσεις. Η διαδικασία που προηγείται της κατασκευής είναι το ίδιο χρονοβόρα με την κατασκευή.

Κόστος

Οικονομικό: είναι σίγουρα μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών κτηρίων γιατί απαιτούνται περισσότερες ώρες εργασίας τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού και προετοιμασίας όσο και σε κατασκευής. Το κόστος επιβαρύνεται σημαντικά και επειδή τα τεμάχια που χρησιμοποιούνται είτε πρόκειται για ξυλεία απλή και καλουπώματος στις ξύλινες και τις χυτές κατασκευές αντίστοιχα, είτε για μεταλλικά στοιχεία στις μεταλλικές κατασκευές, δεν υπάρχουν έτοιμα προερχόμενα από μαζική παραγωγή, αλλά φτιάχνονται κατά παραγγελία και μάλιστα τα καθένα είναι ξεχωριστό. Το κόστος μεταφοράς επίσης είναι μια παράμετρος που πρέπει να συνοπολογιστεί καθώς η κατασκευή των φορέων αυτών μπορεί να γίνει σε συγκεκριμένα εργοστάσια που ίσως να βρίσκονται μακριά από το εργοτάξιο. Στο συνεδριακό κέντρο στη Ντόχα πχ τα τμήματα του δέντρου κατασκευάστηκαν στην Μαλαισία και μεταφέρθηκαν στο Κατάρ, 5.900 χιλιόμετρα μακριά.

Υλικά

Και σ' αυτό τον τομέα το κόστος είναι μεγάλο καθώς τα τμήματα της κατασκευής κόβονται από φύλλα ξύλου ή λαμαρίνας που σημαίνει ότι ένα μέρος γύρω από τα τμήματα είναι φθρα που στην καλύτερη περίπτωση (μέταλλο) ανακυκλώνεται. Μια άλλη παράμετρος όταν μιλάμε για χυτές κατασκευές είναι ότι τα κομμάτια του ξύλου που αποτελούν τον ξυλότυπο είναι μοναδικά και όταν αποσπώνται από το κτήριο δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά.

Ενεργειακό Κόστος

Η κατασκευή και η μεταφορά καμπύλων φορέων απαιτούν μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος απ' αυτό των συμβατικών κατασκευών για τους λόγους που πιο πάνω εξηγήσαμε.

Τεχνολογία

Εκτός απ' τα προγράμματα παραμετρικού σχεδιασμού και τις μηχανές με τεχνολογία CNC που αναφέρθηκαν απαραίτητη για την ακριβή χάραξη του κτηρίου και εφαρμογή των επιμέρους τμημάτων είναι η χρήση της τεχνολογίας GPS (Global Positioning System). Οι μετρήσεις γίνονται στον υπολογιστή και τα σημεία λαμβάνονται με ταχύμετρα που αποθηκεύουν και επεξεργάζονται τα δεδομένα του υπολογιστή.

Η διαδικασία της αφαίρεσης των καλουπιών στις κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα απαιτεί την ταυτόχρονη αποφόρτιση όλης της κατασκευής ώστε να μη αναπτυχθούν τοπικές τάσεις και καταρρεύσει όλη δομή. Η ταυτόχρονη αποφόρτιση επιτυγχάνεται με την χρήση υδραυλικών συστημάτων ανύψωσης ή άλλες παρόμοιες τεχνικές που εξασφαλίζουν την ομοιόμορφη φόρτιση της κατασκευής κατά το ξεκαλούπωμα.

Πλεονεκτήματα

Τα κτήρια και γενικά οι κατασκευές που προκύπτουν με τη μέθοδο του παραμετρικού σχεδιασμού αποτελούν μια πρόκληση για τον αρχιτέκτονα, είναι η αφορμή για να εξερευνησει νέες μεθόδους δόμησης, να πειραματιστεί με καινούρια υλικά και να φτάσει τις δυνατότητες που του προσφέρει η σύγχρονη τεχνολογία στα όριά τους. Έρχεται σε επαφή με τις αρχές του βιομηχανικού σχεδιασμού και αποκτά νέα εργαλεία από άλλους τομείς. Βελτιώνει και εξελίσσει τις τεχνικές δόμησης και στις συμβατικές κατα-

σκευές. Τα κτήρια ξεφεύγουν από τις αρχές της ορθοκανονικότητας και αποτελούν μια διαφορετική ματιά μέσα στο κτισμένο περιβάλλον των πόλεων. Οι καμπύλες μορφές άλλωστε είναι πιο κοντά στις φυσικές μορφές και οι πρώτες κατοικίες ήταν και αυτές καμπύλες.

Βιβλιογραφία

Δ. Παπαλεξόπουλος, «ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΛΙΚΟΤΗΤΑΣ ΨΗΦΙΑΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ», Σημειώσεις και ιστότοπος του μαθήματος, 9ο εξάμηνο, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ

Χαράλαμπος Μπούρας, “Μαθήματα Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής” (Πρώτος Τόμος), Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1999

Χαράλαμπος Μπούρας, “Μαθήματα Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής” (Δεύτερος τόμος), Εκδοτικός οίκος Μέλισσα, Αθήνα 2001

Συστήματα CAD/CAM για την Σχεδίαση και Κατασκευή Πλοίου, σημειώσεις του Μαθήματος, 7ο εξάμηνο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Α.Μπακόπουλος, Ι.Χρυσοβέργης, «Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1988

“From Control to Design. Parametric/Algorithmic Architecture”, ACTAR publications, 2008

Πρακτικά συνεδρίου «Computational Science and Its Applications (ICCSA), 2010 International Conference”

Mutsuro Sasaki, “Morphogenesis of Flux Structures”, AA Publications, London

Ιστότοποι - Διαδικτυακές πηγές - Πηγές Εικόνων

Ιστορικά στοιχεία καμπύλων μορφών

<http://www.hellenica.de/Griechenland/Architektur.html>

http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project_Descript/2005-/2005-p_07/2005-p_07_en.html

Τογο Ιτο κρεματόριο στην Kakamigahara της Ιαπωνίας

<http://14jsc.wordpress.com/2011/09/29/forest-of-meditation/>

<http://www.fabricforming.org/images/papers/FFIC%20SMALL.pdf>

<http://www.concrete.net.au/CplusA/issue10/Meiso%20no%20Mori%20Issue%2010.pdf>

<http://www.detail.de/architektur/themen/krematorium-in-kakamigahara-002047.html>

Arata Isozaki. Εθνικό Συνεδριακό Κέντρο στη Doha

<http://misfitsarchitecture.com/tag/qatar-national-convention-centre/>

<http://www.building.co.uk/steel-yourself-the-qatar-national-convention-centre/3137052.article>

http://www.architectureweek.com/2008/0409/tools_1-2.html

https://unfccc.int/meetings/doha_nov_2012/items/7305.php

http://www.infosteel.be/staalbouwdag10/wimHoeckman_SIDRA_EN.pdf

<http://www.bdonline.co.uk/steel-yourself-the-qatar-national-convention-centre/3137052.article>

<http://www.qatarconvention.com/>

