



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο  
της Zaha Hadid**

**Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα**



**Χαρίλαος Μπότσαρης**  
**ΑΜ: 44546907**

**Επιβλέπων Καθηγητής**  
**Δρ. Νικόλαος Κουρνιατής**  
**Αναπληρωτής Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023**

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

# **Approach to the design of minimal surfaces in the work of Zaha Hadid**

**Minimum requires maximum creativity**



**Charilaos Botsaris**

**Registration Number: 44546907**

**Supervisor**

**Dr Nikos Kourniatis**

**Associate professor**

**ATHENS-EGALEO, FEBRUARY 2023**

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

<b>Δρ. Νικόλαος Κουρνιατής</b>  Αναπληρωτής Καθηγητής	<b>Δρ. Ισαάκ Βρυζίδης</b>  Επίκουρος Καθηγητής	<b>MSc Αναστασία-Χριστίνα Μαρκοπούλου</b>  Ακαδημαϊκή Υπότροφος
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	 (Υπογραφή)

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΜΠΟΤΣΑΡΗΣ**

**ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

#### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η **Χαρίλαος Μπότσαρης** του **Ιωάννη** με αριθμό μητρώου **44546907**, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία

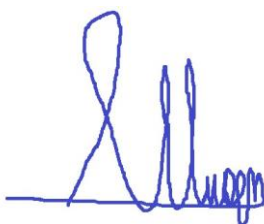
*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned centrally on the page.

ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΜΠΟΤΣΑΡΗΣ

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

{Σελίδα αφιέρωσης (προαιρετικά)}

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

{Σελίδα ευχαριστιών (προαιρετικά)}



## **Περίληψη**

Η διπλωματική αυτή διερευνά τις ελάχιστες επιφάνειες στη δομή δύο έργων της πρωτοπόρου αρχιτέκτονας Zaha Hadid. Η Zaha Hadid σημαντική αρχιτέκτονας που καθόρισε για πολλούς, με την εφαρμογή της αποδόμησης στα έργα της, την εξέλιξη της σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Εξετάσθηκαν οι ελάχιστες επιφάνειες στο έργο Shell & Shadow και στην πεζογέφυρα Striatus. Η μελέτη περιλαμβάνει τη σχεδιαστική σύλληψη των έργων, τις ελεύθερες επιφάνειες από τις οποίες δομούνται και τις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητές τους. Η μορφή των ελαχίστων επιφανειών αποτελούσε και αποτελεί ένα από τα πιο πολύπλοκα προβλήματα που επιλύθηκαν με τη βοήθεια των υπολογιστών και που έδωσαν μεγάλη ώθηση στην Αρχιτεκτονική. Η εφαρμογή του παραμετρισμού και των πιο σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων και μεθόδων, είναι κύριο χαρακτηριστικό στα έργα που μελετήθηκαν. Κάθε αρχιτεκτονικό έργο αποτελείται από μικρές ψηφίδες που ο υπολογισμός τους και η κατασκευή τους απαιτούν όχι μόνο τη χρήση νέων τεχνικών μεθόδων αλλά και μεγάλη προσπάθεια και γνώση από τους δημιουργούς του.

## **Λέξεις – κλειδιά**

Ελάχιστη επιφάνεια, Zaha Hadid, Shell & Shadow, Striatus Bridge, αποδόμηση, παραμετρισμός, FEM, TNA, Midjourney AI.

## **Abstract**

This dissertation explores the minimal surfaces in the structure of two projects by pioneering architect Zaha Hadid. Zaha Hadid an important architect who defined for many, with the application of deconstruction in her works, the evolution of modern architecture. The minimum surfaces in the Shell & Shadow project and the Striatus footbridge were considered. The study includes the design conception of the project, the free surfaces from which it is structured and its constructional particularities. The form of minimal surfaces was and is one of the most complex problems whose solution with the help of computers gave a great impetus to Architecture. The application of parameterization and the most modern computational tools and methods is a main feature in the projects studied. Every architectural project consists of small tiles whose calculation and construction require not only the use of new techniques and methods but also great effort and knowledge from its creators.

## **Keywords**

Minimal Surface, Zaha Hadid, Shell & Shadow, Striatus Bridge, Deconstruction, Parametrization, FEM, TNA, Midjourney AI.

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

## **Διπλωματική Εργασία**

**Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της  
Zaha Hadid**

**Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα**

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	4
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	6
<b>1. ΖΑΧΑ HADID: Η ΓΥΝΑΙΚΑ – Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΩΝ</b>	8
1.1 Σύντομη βιογραφία και σπουδές	8
1.2 Η φιλοσοφία του έργου της Zaha Hadid	16
<b>2. Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ</b>	22
2.1 Ελάχιστες επιφάνειες και Αρχιτεκτονική	22
2.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή	26
2.3 Κατασκευαστικά προβλήματα των ελαχίστων επιφανειών	31
<b>3. ΟΙ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΟ ΤΗΣ ΖΑΧΑ HADID</b>	35
3.1 <i>Shell and Shadow</i>	36
3.1.1 Σχεδιαστική προσέγγιση	36
3.1.2 Ελάχιστες επιφάνειες του έργου	42
3.1.3 Κατασκευαστική προσέγγιση	44
3.1.4 Συμπεράσματα	48
3.2 <i>Striatus Bridge</i>	40
3.2.1 Σχεδιαστική προσέγγιση	51
3.2.2 Ελάχιστες επιφάνειες του έργου	55
3.2.3 Κατασκευαστική προσέγγιση	57
3.2.4 Συμπεράσματα	63
<b>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	65
<b>5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	67
<b>6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	73

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Ο θαυμασμός μου για τα τεχνικά έργα, πάντα συνοδεύονταν από το θαυμασμό της αρχιτεκτονικής τους διάστασης.

Σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου προσπαθούσα να ανιχνεύσω αυτή τη σχέση, μεταξύ κατασκευής και αισθητικής. Μέσα από το μάθημα του Αρχιτεκτονικού Σχεδιασμού και των σχετικών μαθημάτων καθώς και με τη βοήθεια του καθηγητή κ. Νίκου Κουρνιατή, μου δόθηκε η δυνατότητα να προσεγγίσω μια πτυχή αυτού του θέματος. Η παρούσα διπλωματική είναι προς αυτή την κατεύθυνση. Η διερεύνηση των μικρών ψηφίδων που συνθέτουν σε μια πολύπλοκη δομή και της δίνουν ξεχωριστό αισθητικό αποτέλεσμα, είναι η κεντρική ιδέα αυτής της διπλωματικής. Η αμφίδρομη και συνεχής μετάβαση από το μικρό στο μεγάλο, από το ελάχιστο στο μέγιστο.

Επιλέχθηκαν έργα που εκπονήθηκαν από το αρχιτεκτονικό γραφείο της πρωτοπόρου αρχιτέκτονας Zaha Hadid, λόγω των πολύπλοκων κατασκευών τους. Μέσα σε αυτή την κατασκευαστική πολυπλοκότητα προσπαθήσαμε να διακρίνουμε τις ελάχιστες επιφάνειες από τις οποίες είναι φτιαγμένα κάποια έργα.

Ο τίτλος της διπλωματικής **«Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της αρχιτέκτονας Zaha Hadid»** συμπυκνώνει τον προβληματισμό αντιμετώπισης του θέματος. Όμως ο υπότιτλος **«Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα»**, θεωρώ ότι είναι αυτός που περιέχει τη διάσταση της σύνδεσης της ελληνικής αρχιτεκτονικής παράδοσης με τις σύγχρονες κατευθύνσεις της αρχιτεκτονικής.

Το ελληνικό περιβάλλον είναι αυτό που οδηγεί σε λιτές κατασκευές στις οποίες το ελάχιστο είναι το ζητούμενο. Είναι αυτό που συμπυκνώνεται σύμφωνα με την έκφραση του Οδυσσέα Ελύτη **«Αυτός ο κόσμος ο Μικρός ο Μέγας»**.

Ενώ η βιβλιογραφία για το πλήθος έργων που έχουν γίνει από το γραφείο Zaha Hadid Architects, που δημιούργησε η Zaha Hadid, είναι μεγάλη, η βιβλιογραφία σχετικά με τις ελάχιστες επιφάνειες στα έργα αυτά είναι πολύ περιορισμένη έως μηδαμινή. Ως εκ τούτου η εργασία αυτή αποτελεί συμβολή στη σχετική βιβλιογραφία και δημιουργεί ένα πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση.



*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

Η διπλωματική αυτή εργασία προσπάθησε να προσεγγίσει όσο το δυνατόν πληρέστερα το θέμα αυτό, όμως είναι ένα θέμα με ανοικτό πλαίσιο ανάγνωσης που ανοίγει πεδίο για περαιτέρω μελέτη.

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η συγκρότηση ενός αρχιτεκτονικού έργου είναι μια διαδικασία αλληλοεπίδρασης μεταξύ του ιδεατού και του πραγματικού. Μια διαδικασία κατά την οποία οι οποιεσδήποτε πλαστικές αρχιτεκτονικές μορφές θα πρέπει να υπακούσουν στις αρχές της οικοδομικής επιστήμης. Ακόμα και στις πιο σύγχρονες κατασκευές, κρύβονται θεμελιώδης κατασκευαστικές αρχές που αναδεικνύουν την ενότητα και τη συνοχή της Στατικής των Κατασκευών με την Αρχιτεκτονική, αρχές που έχουν διαχρονική εφαρμογή.

Στον πυρήνα αυτού του προβληματισμού περικλείεται και η σημασία που έχει το επιμέρους ελάχιστο δομικό στοιχείο σε σχέση με το όλον. Ο προβληματισμός αυτός έδωσε την αφορμή για την παρούσα διπλωματική εργασία και είναι η κεντρική ιδέα που τη διατρέχει. Πως δηλαδή μια ελάχιστη επιφάνεια ενός έργου, μπορεί να συνδεθεί με άλλες τέτοιες επιφάνειες και όλες μαζί να συνδεθούν και να αποτελέσουν ένα σύνολο (το όλον).

Το έργο της αρχιτεκτόνισσας Zaha Hadid, που περιλαμβάνει πλήθος κατασκευών βασισμένων στα πιο σύγχρονα εργαλεία αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, αποτέλεσε το πλαίσιο διερεύνησης του θέματος. Θα πρέπει εδώ να σημειώσουμε αυτό που είπε ο αρχιτέκτονας Mies van de Rohe σε μία διάλεξη του το 1938 ότι, *η οποιαδήποτε ιδεαλιστική του μορφή ενός έργου δεν έχει σχέση με την αλήθεια ούτε με την απλότητα*. Δηλαδή κάθε έργο θα πρέπει πρώτα απ' όλα να είναι σε αρμονία με το περιβάλλον και να αποσκοπεί στην ψυχική ευεξία των ανθρώπων και όχι στον εντυπωσιασμό. Αυτό που κατάφερε να πετύχει η ελληνική αρχιτεκτονική.

Εστίασαμε σε δύο έργα που το καθένα ανήκει σε διαφορετική περίοδο. Οι σιδηροδρομικοί σταθμοί του σιδηρόδρομου Nordpark (Ινσμπρουκ) στους οποίους εφαρμόστηκαν οι αρχές του Παραμετρισμού, και τη γέφυρα Striatus στη Βενετία, η οποία είναι η πρώτη του είδους της που συνδυάζει παραδοσιακές αρχιτεκτονικές τεχνικές με προηγμένες τεχνολογίες υπολογιστικού σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής.

Η συλλογή της βιβλιογραφίας έγινε από ένα μεγάλο αριθμό άρθρων και βιβλίων που αναφέρονται στα έργα του αρχιτεκτονικού γραφείου της Zaha Hadid. Επίσης

συγκεντρώθηκε βιβλιογραφία σχετική με τις ελάχιστες επιφάνειες. Αναφορές της βιβλιογραφίας που να συνδέουν απευθείας τις ελάχιστες επιφάνειες με αυτά τα έργα δεν βρέθηκαν. Έτσι χρειάστηκε πολύπλευρη προσέγγιση και για το λόγο αυτό η πτυχιακή εργασία προσθέτει κάτι καινούριο στο υπό μελέτη αντικείμενο και αποτελεί ανοικτό πλαίσιο περαιτέρω εμπλουτισμού και έρευνας.

Η διάρθρωση της διπλωματικής περιλαμβάνει, μια συνοπτική εξέταση της διαδρομής και της φιλοσοφίας έργου της Zaha Hadid, που θεωρήθηκε απαραίτητη για την κατανόηση του έργου της.

Επίσης η εξέταση της θεωρίας των ελαχίστων επιφανειών αποτέλεσε βασική προϋπόθεση αυτής της μελέτης καθώς και η εφαρμογή τους στις αρχιτεκτονικές κατασκευές. Ακολούθως έγινε η παράθεση μιας σύντομης ιστορικής αναδρομής των ελαχίστων επιφανειών στις αρχιτεκτονικές κατασκευές και των προβλημάτων που παρουσιάζονται.

Η προσέγγιση των δύο έργων έγινε με την ίδια μεθοδολογία. Πρώτα παρουσιάστηκαν τα βασικά στοιχεία τους, όπως τοποθεσία, υψόμετρο κ.ά. Το κάθε έργο εξετάστηκε πρώτα σχεδιαστικά ως σύνολο, ακολούθως μελετήθηκαν οι επιμέρους ελάχιστες επιφάνειες που το συγκροτούν και τέλος η κατασκευαστική ολοκλήρωση του έργου. Για κάθε έργο υπήρξαν επιμέρους συμπεράσματα.

Στο τέλος της εργασίας έγινε συνολική προσέγγιση του θέματος και διατυπώθηκαν τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα.

Μια διπλωματική εργασία ξεκινάει με τη διερεύνηση ορισμένων ερωτημάτων και καταλήγει σε συμπεράσματα, τα οποία όμως μπορούν να αποτελέσουν ερωτήματα για περαιτέρω έρευνα.

## 1. ZAHA HADID: Η ΓΥΝΑΙΚΑ – Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΩΝ

### 1.1 Σύντομη βιογραφία και σπουδές

Η Zaha Hadid (Z.H.), πλήρες όνομα Zaha Mohammad Hadid, γεννήθηκε στη Βαγδάτη του Ιράκ από πλούσια οικογένεια. Ξεκίνησε τις σπουδές της στο Αμερικανικό Πανεπιστήμιο της Βηρυτού στον τομέα των Μαθηματικών, από όπου έλαβε το πτυχίο της. Μετά το τέλος των σπουδών της στο Μαθηματικό τμήμα, μετακόμισε στο Λονδίνο το 1972 για να σπουδάσει αρχιτεκτονική. Έγινε δεκτή στη Αρχιτεκτονική Σχολή του Συλλόγου των Αρχιτεκτόνων, γνωστότερη ως AA (Architectural Association) και αποφοίτησε το 1977. Την εποχή εκείνη, τη δεκαετία του 70', η σχολή αυτή ήταν κέντρο πρωτοποριακής αρχιτεκτονικής σκέψης. Κατά τη διάρκεια των σπουδών της γνώρισε τους αρχιτέκτονες Elia Zenghelis και Rem Koolhaas με τους οποίους συνεργάστηκε όταν εντάχθηκε στο Γραφείο Μητροπολιτικής Αρχιτεκτονικής (OMA). Το 1979 ίδρυσε στο Λονδίνο τη δική της εταιρεία, Zaha Hadid Architects (ZHA) (<https://www.britannica.com/biography/Zaha-Hadid>).

Το 1983 ήταν έτος σταθμός για τη Z.H. επειδή γνώρισε τη διεθνή αναγνώριση με τη βραβευμένη της συμμετοχή στο διαγωνισμό για τη δημιουργία ενός κέντρου αναψυχής στο λόφο Kowloon στο Χονγκ Κονγκ γνωστό ως *The Peak* (Hill J. 2017).



**Εικόνα 1.1** The Peak Leisure Club Hong-Kong (Image: Zaha Hadid Architects)

Η αρχιτέκτονας πρότεινε έναν οριζόντιο ουρανοξύστη που σχηματίστηκε από διαφορετικά στρώματα για να δημιουργήσει μια νέα τεχνητή τοπογραφία. Αυτά τα στρώματα σχεδιάστηκαν ως μεγάλες δοκοί προβολής που προέρχονταν από το έδαφος και δημιουργούν έντονα την αίσθηση ότι επιπλέουν πάνω από τον χώρο (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/the-peak-leisure-club/>). Αυτό το σχέδιο, σαν ένας οριζόντιος ουρανοξύστης που κινείται σε μια δυναμική διαγώνια προς τα κάτω από την πλαγιά του λόφου, καθιέρωσε την αισθητική της και έγινε το σήμα κατατεθέν της. Επηρεασμένη από τον ζωγράφο Kazimir Malevich και το κίνημα του Υπερματισμού (Suprematism) στην τέχνη, το οποίο χαρακτηρίζεται από σταθερά γεωμετρικά σχήματα που δίνουν μια αίσθηση κατακερματισμού, αστάθειας και κίνησης (<https://www.theartstory.org/movement/suprematism/>).

Ο σχεδιασμός της Z.H. για το *The Peak* δεν πραγματοποιήθηκε ποτέ, ούτε εξάλλου όπως και τα περισσότερα από τα άλλα ριζοσπαστικά σχέδια της δεκαετίας του '80 και του '90, όπως το Kurfürstendamm (1986) στο Βερολίνο, το Κέντρο Τέχνης και Μέσων του Ντίσελντορφ (1992-1993) και ο Κόλπος του Κάρντιφ Όπερα (1994) στην Ουαλία κ.ά. Το γεγονός αυτό την έκανε γνωστή ως *paper architect*, δηλαδή αρχιτέκτονας χαρτιού, που σημαίνει ότι τα σχέδιά ήταν πάρα πολύ πρωτοποριακά για να προχωρήσουν πέρα από τη φάση του σκίτσου και να μπορούν στην πραγματικότητα να χτιστούν. Αυτή η εντύπωση της αυξήθηκε όταν τα όμορφα και εξαιρετικά λεπτομερή σχέδιά της, συχνά εκτέθηκαν ως έργα τέχνης σε μεγάλα μουσεία, με τη μορφή ζωγραφικών έργων (ZAHA HADID ARCHITECTS, 2018).

Το πρώτο μεγάλο έργο που κατασκευάστηκε ήταν ο Πυροσβεστικός Σταθμός Vitra (1989–93) στο Βάιλ αμ Ράιν (Weil am Rhein) της Γερμανίας. Αποτελούμενη από μια σειρά από αιχμηρά γωνιακά επίπεδα, η δομή μοιάζει με ένα πουλί κατά την πτήση (<https://www.britannica.com/biography/Zaha-Hadid/media/1/914179/15938>, Zukowsky J. 2019. "Zaha Hadid: Biography, Buildings, & Facts". Encyclopedia Britannica.).

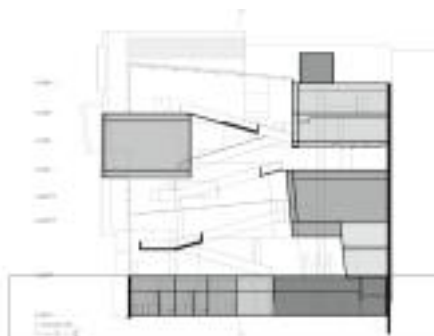


**Εικόνα 1.2** Πυροσβεστικός Σταθμός, Βάιλ αμ Ράιν, Γερμανία

Τα άλλα έργα που κατασκευάστηκαν αυτή την περίοδο περιελάμβαναν, ένα σχέδιο στέγασης για το IBA Housing (1989–93) στο Βερολίνο, τον εκθεσιακό χώρο Mind Zone (1999) στο Millennium Dome στο Greenwich του Λονδίνου και τον εκθεσιακό χώρο Land Formation One (1997–99) στο Weil am Rhein.

Σε όλα αυτά τα έργα, η Z.H. διερεύνησε περαιτέρω το ενδιαφέρον της για τη διασύνδεση της αρχιτεκτονικής με μορφές δυναμικής γλυπτικής (<https://www.zaha-hadid.com/2022/03/09/zhas-future-cities-exhibition-in-chengdu-now-open/>).

Ως αρχιτέκτονας κατασκευής έργων εδραιώθηκε με την υλοποίηση του σχεδιασμού του Κέντρου Σύγχρονης Τέχνης Lois & Richard Rosenthal στο κέντρο του Σινσινάτι του Οχάιο το 2000 και ήταν το πρώτο αμερικανικό μουσείο που σχεδιάστηκε από μια γυναίκα. Το έργο αποτελείται από μια κάθετη σειρά από κύβους και κενά (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/lois-richard-roenthal-center-for-contemporary-art/>).



**Εικόνα 1.3** Σχέδιο του Κέντρου Σύγχρονης Τέχνης Lois & Richard Rosenthal

Η πλευρά που βλέπει στο δρόμο έχει μια ημιδιαφανή γυάλινη πρόσοψη που προσκαλεί τους περαστικούς να κοιτάξουν τις λειτουργίες του μουσείου και έτσι έρχονται άμεση επαφή με το μουσείο, σε αντίθεση με την αντίληψη που υπάρχει για τα μουσεία σαν χώροι απομακρυσμένοι χωρίς άμεση πρόσβαση. Η αρχιτέκτονας θεωρούσε ότι το μουσείο θα λειτουργούσε σαν ένα χαλί που θα καλωσόριζε τους ανθρώπους στο μουσείο και θα τους οδηγούσε στο εσωτερικό του (<https://www.britannica.com/topic/Lois-and-Richard-Rosenthal-Center-for-Contemporary-Art>).



**Εικόνα 1.4** Lois & Richard Rosenthal Center for Contemporary Art, Σινσινάτι Οχάϊο

Το 2004 της απονεμήθηκε το βραβείο Pritzker (το ανώτατο βραβείο αρχιτεκτονικής, πρώτη φορά σε γυναίκα), για το σύνολο του έργου της. Στο σκεπτικό της κριτικής επιτροπής αναφέρεται ότι, «η κριτική επιτροπή είναι στην ευχάριστη θέση να αναγνωρίσει έναν από τους σπουδαιότερους αρχιτέκτονες στην αυγή του 21ου αιώνα, απονέμοντας το βραβείο αρχιτεκτονικής Pritzker το 2004 στη Ζάχα Χάιντ, για να επαινέσει τα εξαιρετικά επιτεύγματά της και να ευχηθεί τη συνεχή επιτυχία της» (<https://www.pritzkerprize.com/laureates/2004>).

Το 2010 ο τολμηρά ευφάνταστος σχεδιασμός της για το Μουσείο Σύγχρονης Τέχνης και Αρχιτεκτονικής MAXXI στη Ρώμη, κέρδισε το βραβείο Stirling του Βασιλικού Ινστιτούτου Βρετανών Αρχιτεκτόνων (RIBA) που απονεμήθηκε επίσης για πρώτη φορά σε γυναίκα αρχιτέκτονα (<https://www.britannica.com/biography/Zaha-Hadid>).

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*



**Εικόνα 1.5** MAXXI Museum of Contemporary Art and Architecture, Ρώμη



**Εικόνα 1.6** MAXXI: National Museum of XXI Century Arts, Ρώμη (από αέρα)

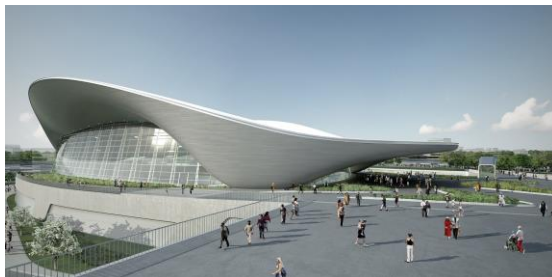
Τον επόμενο χρόνο κέρδισε το δεύτερο βραβείο Stirling για ένα γυμνάσιο στο Λονδίνο (Evelyn Grace Academy). Το 2014 κέρδισε το Design of the Year του Μουσείου Σχεδιασμού του Λονδίνου, για το πολιτιστικό κέντρο Heydar Aliyev στο Μπακού του Αζερμπαϊτζάν (2012) που το κύριο χαρακτηριστικό ήταν ο κυματιστός σχεδιασμός που παραπέμπει στο σύμβολο του απείρου.



**Εικόνα 1.7** Πολιτιστικό Κέντρο Heydar Aliyev Center, Μπακού



Στα αξιοσημείωτα έργα περιλαμβάνονται το London Aquatics Center, που χτίστηκε για τους Ολυμπιακούς του 2012, το μουσείο Eli και Edythe Broad Art, το οποίο άνοιξε το 2012 στο Michigan State University στο East Lansing, Michigan και το Jockey Club Innovation Tower (2014) για το Πολυτεχνείο του Χονγκ Κονγκ.



**Εικόνα 1.8** Aquatic Center Λονδίνο



**Εικόνα 1.9** Polytechnic University, Χονγκ Κονγκ

Τα επιτεύγματα της Z.H. είναι ακόμη πιο αξιοσημείωτα δεδομένου ότι εργαζόταν σε έναν χώρο που κυριαρχούσαν σε μεγάλο βαθμό οι άνδρες.

Οι αρχιτεκτονικές φόρμες των έργων της, σε συνδυασμό με τα υπέρογκα έξοδα κατασκευής τους και τις υπερβολικές αμοιβές της, συχνά προκαλούσαν έντονη αρνητική κριτική. Ο χώρος που αποφασίσθηκε να δημιουργηθεί το Aquatics Center στο Λονδίνο ήταν προβληματικός και ανάγκασε την Z.H. να περιορίσει τα αρχικά της σχέδια. Οι διαμαρτυρίες, κυρίως διακεκριμένων Ιαπώνων αρχιτεκτόνων, οδήγησαν

σε ναυάγιο το σχέδιο για το Νέο Εθνικό Στάδιο των Ολυμπιακών Αγώνων του 2020 στο Τόκιο.

Έντονη κριτική δέχθηκε και για το Στάδιο Al Wakrah στο Κατάρ για το Παγκόσμιο Κύπελλο του 2022. Η κριτική εστιάσθηκε στο γεγονός ότι μεγάλος αριθμός ξένων εργατών έχουν πεθάνει εξαιτίας των κακών συνθηκών εργασίας στα εργοτάξια πριν ακόμα ολοκληρωθούν τα στέγαστρα του σταδίου. Όταν ρωτήθηκε για τους θανάτους των εργατών, η Z.H. αντιτάχθηκε στην ευθύνη της να διασφαλίσει ως αρχιτέκτονας ασφαλείς συνθήκες εργασίας, η τοποθέτησή της αυτή προκάλεσε μεγάλη δυσαρέσκεια (Quirk V., 2014).



**Εικόνα 1.10** Στάδιο Al Wakrah, Κατάρ

Η Z.H. δίδαξε σε πολλά μέρη, όπως στην Αρχιτεκτονική Σχολή του Συλλόγου Αρχιτεκτόνων (Architectural Association), στο Harvard University, στο University of Chicago και στο Yale University. Σχεδίασε επίσης έπιπλα, κοσμήματα, υποδήματα, τσάντες, εσωτερικούς χώρους όπως εστιατόρια και σκηνικά κ.ά.

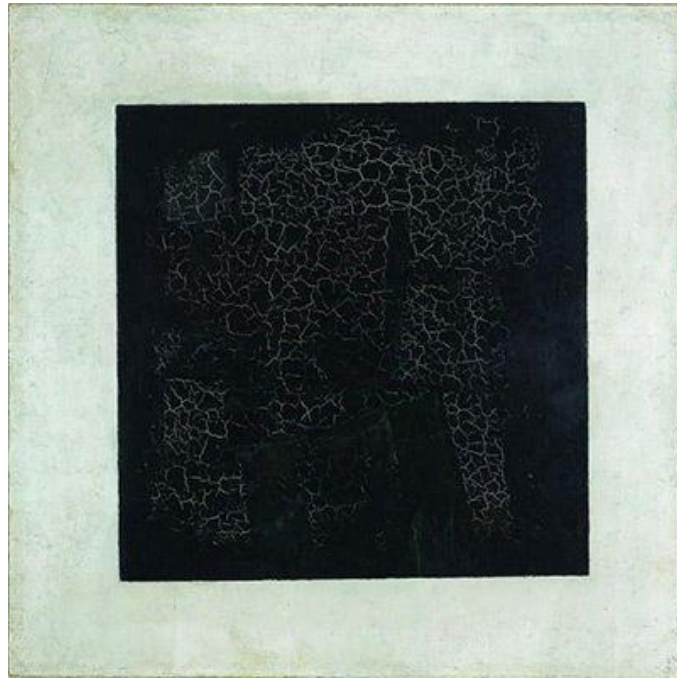
Ο ξαφνικό της θάνατος το 2016 από καρδιακή προσβολή, άφησε 36 έργα ημιτελή, όπως το γήπεδο του Παγκοσμίου Κυπέλλου 2022, το Antwerp Port House (2016) και το King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC 2017), στο Ριάντ της Σαουδικής Αραβίας, τα οποία συνεχίσθηκαν και ολοκληρώνονται από τους συνεργάτες της. Στη Z.H., εκτός από το βραβείο Pritzker και το βραβείο Stirling, απονεμήθηκαν και πολλά άλλα βραβεία όπως, από την Ιαπωνία το βραβείο Praemium Imperiale για την αρχιτεκτονική (2009), το Βασιλικό Χρυσό Μετάλλιο για

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

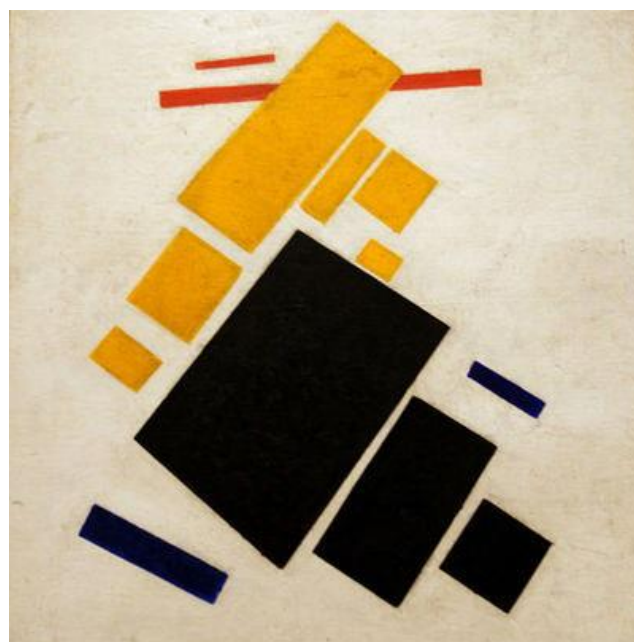
την Αρχιτεκτονική το οποίο αποτελεί την υψηλότερη διάκριση του Βασιλικού Ινστιτούτου των Βρετανών Αρχιτεκτόνων (RIBA) (2016). Η Z.H. ήταν μέλος του Συντακτικού Συμβουλίου στην Encyclopædia Britannica (2005–06). Το 2012 της απονεμήθηκε ο τίτλος του Τάγματος της Βρετανικής Αυτοκρατορίας (DBE) (<https://www.britannica.com/biography/Zaha-Hadid>).

## 1.2 Η φιλοσοφία του έργου της Zaha Hadid

Η Zaha Hadid (Z.H.) επηρεάστηκε από τον Ρώσο ζωγράφο Kazimir Malevich, ιδρυτή του κινήματος των Suprematists (Υπερματιστές). Οι ιδέες του σχετικά με τις μορφές και το νόημα στην τέχνη θα αποτελούσαν τελικά τα θεωρητικά θεμέλια της αφηρημένης τέχνης.



**Εικόνα 1.11** Πίνακας Kazimir Malevich Black square (1915)



**Εικόνα 1.12** Πίνακας Kazimir Malevich Airplane flying (1915)

Η Ζ.Η. εμπνεύστηκε τόσο πολύ από τον συγκεκριμένο καλλιτέχνη που ο τίτλος της πτυχιακής της εργασίας για την αποφοίτηση της από την Αρχιτεκτονική Σχολή είχε τον τίτλο *Malevich's Tektonik*, ήταν το σχέδιο για ένα ξενοδοχείο στη γέφυρα Hungerford του Λονδίνου (<https://www.royalacademy.org.uk/article/zaha-hadid-ration-the-influence-of>, Abdalwahid A. A., 2013).



**Εικόνα 1.13** Πτυχιακή εργασία Ζ.Η. Malevich's Tektonik (1977)

Ήταν τόσο μεγάλη η επίδραση στο έργο της που η Ζ.Η. δήλωνε ότι, τότε μόνο μπορούμε να αντιληφθούμε τον χώρο όταν απελευθερωθούμε από τη γη, όταν το σημείο στήριξης εξαφανιστεί (Hadid Z., 2014).

Σε όλη την επαγγελματική της πορεία συνέχισε να ζωγραφίζει, χρησιμοποιώντας την αφαίρεση ως εργαλείο για την ανάπτυξη των ιδεών της. Εξηγούσε μάλιστα ότι, βρήκα ότι το παραδοσιακό σύστημα αρχιτεκτονικού σχεδίου ήταν περιοριστικό και για το λόγο αυτό έψαχνα για ένα νέο μέσο αναπαράστασης ([https://www.pritzkerprize.com/sites/default/files/inline-files/2004\\_Acceptance\\_Speech.pdf](https://www.pritzkerprize.com/sites/default/files/inline-files/2004_Acceptance_Speech.pdf)).

Μέσα από την αφαίρεση, αμφισβήτησε τη σύλληψη ενός κτηρίου ως μια σταθερή μάζα και εξερεύνησε τις χωρικές σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών δομικών στοιχείων του. Η σταθερή και στατική δομή μετασχηματιζόταν σε μια ρευστή μορφή που δίνει την αίσθηση ενός αέναου κυματισμού. Οι ιδέες της αυτές απεικονίζονταν σε πολλούς πίνακες που έχουν εκτεθεί σαν αυτόνομα έργα τέχνης. Το κύριο χαρακτηριστικό των έργων της είναι ο κατακερματισμός η αποδόμηση του όλου έργου.



Εικόνα 1.14 Πίνακας Kazimir Malevich New fields of Architecture

Η **αποδόμηση** στην αρχιτεκτονική είναι ένα στυλ που εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και είναι βασισμένη στη φιλοσοφία που αναπτύχθηκε από τον γάλλο φιλόσοφο Jacques Derrida. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, τα στερεότυπα που υπάρχουν δεν πρέπει να θεωρούνται δεδομένα αλλά χρειάζονται ανάλυση δηλαδή αποδόμηση. Με αυτό τον τρόπο αναδεικνύονται οι μόνο βασικές δομές του έργου και απορρίπτονται οι περιττές και οι άχρηστες λειτουργίες (<http://architecture-history.org/schools/DECONSTRUCTIVISM.html>).

Η θεώρηση αυτή έδωσε ενθουσιασμό και αγκαλιάσθηκε από πολλούς αρχιτέκτονες, χωρίς όμως να παραβλέψουμε και την έντονη κριτική που δέχθηκε. Η εμφάνιση και η καθιέρωση αυτού του στυλ οφείλεται κυρίως στην Αρχιτεκτονική Ένωση (Architectural Association) του Λονδίνου, όπου η πλειοψηφία των αρχιτεκτόνων εντάχθηκαν σε αυτό το κίνημα και η Z.H., και η οποία ήταν από τους πρωτοπόρους και ένθερμους υποστηρικτές αυτού του κινήματος.

Η αποδόμηση στην Αρχιτεκτονική έγινε πολύ δημοφιλής ύστερα από την έκθεση ορόσημο του 1988, *Deconstructivist Architecture (Αποδόμηση και Αρχιτεκτονική)*, που πραγματοποιήθηκε στο Μουσείο Μοντέρνας Τέχνης (MoMA) στη Νέα Υόρκη. Στην έκθεση αυτή συμμετείχε και η Z.H. με σχέδια από το *The peak project* μαζί με

επτά άλλους αρχιτέκτονες. Η έκθεση αυτή καθόρισε σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη της αρχιτεκτονικής για τις επόμενες δεκαετίες (Johnson P. & Wigley M., 1988).



**Εικόνα 1.15** Πίνακας Z.H. The power of experimentation (1988)

Σύμφωνα με τα όσα έχουν γραφτεί, οι αρχιτέκτονες αυτής της τάσης σχεδιάζουν σαν να βρίσκονται σε έναν άλλο πλανήτη που χαρακτηρίζεται από αντιβαρύτητα, μη γεωμετρία, πολυπλοκότητα και κατακερματισμό (McLeod, 1989). Ενώ με μία πρώτη ματιά τα αρχιτεκτονικά έργα χαρακτηρίζονται από κατακερματισμό και αφαίρεση, από πίσω κρύβεται έμπνευση και μελέτη σε βάθος.

Η αναγνώριση του έργου της οδήγησε την Z.H. σε ακόμα πιο φιλόδοξα σχέδια. Το πρώτο από αυτά σε νέο στυλ ήταν το Phaeno Science Center στο Wolfsburg της Γερμανίας (2005), το οποίο, αποφεύγοντας οριζόντιες και κατακόρυφες, οδήγησε στην ανάπτυξη νέων ψηφιακών τεχνικών για τη δομική μηχανική του κτιρίου και τον υπολογισμό της μορφής του (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/phaeno-science-centre/>). Η Z.H. έγινε πρωτοπόρος αυτής της προσέγγισης, η οποία ονομάζεται Παραμετρισμός (Parametricism). Ο Παραμετρισμός βασίζεται στην ανάπτυξη των υπολογιστών και των πολύπλοκων αλγορίθμων που μπορούν να επεξεργασθούν αυτοί.

Η περιγραφή ενός αντικειμένου μέσα από τις παραμέτρους του δεν είναι κάτι καινούριο, παραδείγματος χάρη η παραμετρική μορφή μιας ευθείας γραμμής είναι:  $x = x_0 + at$  και  $y = y_0 + at$ . Αυτό που κάνει την διαφορά στην εφαρμογή του παραμετρικού σχεδιασμού στην αρχιτεκτονική, είναι η ένωση μιας σειράς από παραμέτρους οι οποίες καθορίζουν νέες λειτουργίες για την πλήρη περιγραφή και

τον έλεγχο ενός σχεδίου. Στα πλαίσια ενός κτιρίου, ο έλεγχος ενός τέτοιου συνόλου παραμέτρων μπορεί να επιτρέψει μια ολική παρέμβαση στον αρχιτεκτονικό του σχεδιασμό. Με τη βοήθεια τέτοιων εργαλείων ο σχεδιαστής είναι σε θέση να περιγράψει μαθηματικά πολύπλοκες μορφές και να ανακαλύψει νέες. Στην Αρχιτεκτονική αυτό μπορεί να δώσει όλο και πιο περίπλοκες δομές που χαρακτηρίζονται από ρευστότητα και απρόσκοπτες καμπύλες που βρίσκονται στη φύση και μπορούν να υλοποιηθούν τεχνικά. Τα χαρακτηριστικά της αποδόμησης έχουν ενσωματωθεί στον Παραμετρισμό, ο οποίος διεκδικεί να έχει καθολική εγκυρότητα, δίνοντας νέα ώθηση στην αρχιτεκτονική δημιουργία (Schumacher P., 2008).



**Εικόνα 1.16** Σιδηροδρομικός Σταθμός Hungerburg Ίνσμπουργκ

Τα τελευταία κατασκευασμένα έργα του γραφείου ZHA ξεφεύγουν από τον πειραματισμό και με την κατασκευή τους πετυχαίνουν να ενσωματωθούν στον πραγματικό κόσμο. Οι σιδηροδρομικοί σταθμοί του Nordpark (Ίνσμπρουκ) είναι ένα καλό παράδειγμα εφαρμογής του Παραμετρισμού.

Κανένα άλλο στυλ δεν θα μπορούσε να έχει επιτύχει να υπάρχει τέτοια μεγάλη ποικιλία αρχιτεκτονικών παραλλαγών που να προσαρμόζονται τόσο εύκολα με την τοποθεσία. Οι ελαφριές κατασκευές των σταθμών δίνουν την εντύπωση μιας ρευστότητας, εμπνευσμένη από τους φυσικούς σχηματισμούς πάγου της περιοχής (ZHA, Nordpark Railway Stations 2004-2007) (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/nordpark-railway-stations/>).

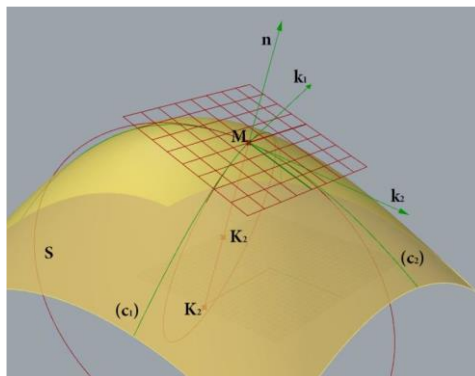


Υπάρχουν αρκετοί μελετητές του έργου της Z.H. που έγραψαν για την αρχιτεκτονική της, από πού επηρεάστηκε και γενικότερα για τη φιλοσοφία του έργου της. Ο κεντρικός στόχος των έργων της είναι, η αμφισβήτηση, η αποσυναρμολόγηση και η ανασύνθεση αρχιτεκτονικών προτύπων στην κατεύθυνση της συνύπαρξης Αρχιτεκτονικής και Γλυπτικής, αντλώντας τα πρότυπα της κυρίως από τη Φύση (Abdalwahid A. A., 2013). Τα έργα της Z.H. είναι από τα πιο αναγνωρίσιμα και έχουν αφήσει βαθύ αποτύπωμα στην Αρχιτεκτονική. Όπως είπε και ο Rem Koolhaas για την Zaha Hadid, στην τελετή αποφοίτησης της από την Αρχιτεκτονική Σχολή, *Η Zaha είναι ένας πλανήτης μέσα στη δική της μοναδική τροχιά.*

## 2. Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

### 2.1 Ελάχιστες επιφάνειες και Αρχιτεκτονική

Η τροχιά ενός συνεχώς κινούμενου τόξου καμπύλης δημιουργεί την εικόνα μιας επιφάνειας (Κουρνιατή & Κουρνιατής, 2014).

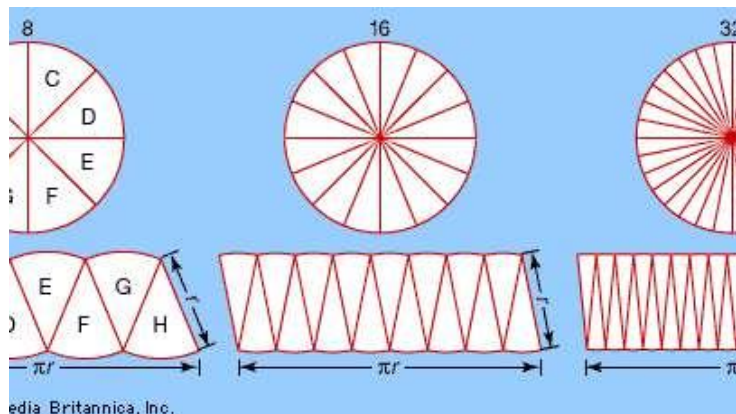


Εικόνα 2.1 Σχηματισμός επιφανειών

Βυθίζοντας ένα σύρμα σε διάλυμα υγρού σαπουνιού δημιουργείται ένα υμέναιο (λεπτή ελαστική μεμβράνη). Η μεμβράνη αυτή βρίσκει την ελάχιστη επιφάνεια που θα έχει μέσα σε έναν δεδομένο χώρο μεταξύ όλων των πιθανών επιφανειών. Η επίλυση αυτού του προβλήματος αποτελούσε για περισσότερο από δύο αιώνες ένα δυσεπίλυτο μαθηματικό πρόβλημα. Ο φυσικός Joseph Plateau το 1873 παρατήρησε ότι η μεμβράνη σαπουνιού που οριοθετείται από ένα σύρμα φαίνεται να σχηματίζει ελάχιστες επιφάνειες. Το πρόβλημα πήρε το όνομά του Βέλγου φυσικού και η επίλυση του, πλην ορισμένων ειδικών περιπτώσεων, ήταν πολύ δύσκολη παρά την φαινομενική του απλότητα. Πολλοί σπουδαίοι μαθηματικοί συνεισέφεραν στη λύση του προβλήματος, όπως ο Jess Douglas, Riemann, Euler, Lagrange κ.ά.

Σύμφωνα με τα μαθηματικά, μια ελάχιστη επιφάνεια που ελαχιστοποιεί τοπικά την έκτασή της ισοδυναμεί με μηδενική καμπυλότητα. Η σύγχρονη μαθηματική προσέγγιση των ελαχίστων επιφανειών έχει να κάνει περισσότερο με την εικονογράφησή τους, μέσω τρισδιάστατων ψηφιακών απεικονίσεων και η λύση τους γίνεται με την βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Πλούσιο υλικό για την μελέτη των ελαχίστων επιφανειών μπορεί να αντλήσουμε από τη φύση, μεμβράνες κυττάρων, στα σχήματα των έμβιων, τριχοειδή φαινόμενα κ.ά. Η επίλυση αυτών των

προβλημάτων έδωσε μεγάλη ώθηση στην εφαρμογή των ελαχίστων επιφανειών και στην Αρχιτεκτονική.



**Εικόνα 2.2** Σχηματισμός ελαχίστων επιφανειών από ανάπτυξη κύκλου

Η μεμβράνη σαπουνιού φτάνει σε κατάσταση ισορροπίας, κατά την οποία ελαχιστοποιείται το εμβαδόν επιφάνειας της, όταν επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της επιφανειακής τάσης που ισοδυναμεί με μηδενική καμπυλότητα.



**Εικόνα 2.3** Δημιουργία ελαχίστων επιφανειών σε μεμβράνη σαπουνιού

**Οι ελάχιστες επιφάνειες είναι οι επιφάνειες που καταλαμβάνουν την μικρότερη επιφάνεια από όλες τις επιφάνειες που εκτείνονται στον ίδιο χώρο.**

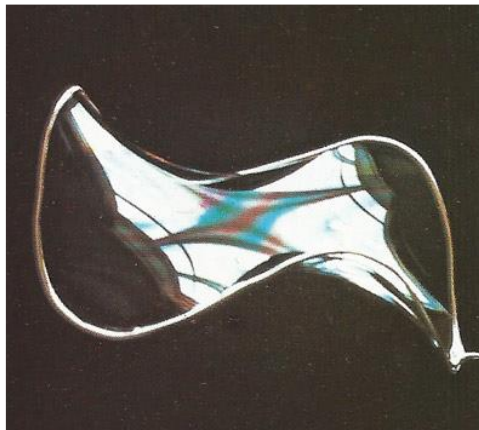


**Εικόνα 2.4** Δημιουργία σφαιρικού τετράεδρου

Μπορούμε να καταλάβουμε πολλά για τον υλικό κόσμο, μελετώντας ένα από τα πιο λεπτεπίλεπτα συστατικά του. Τα φιλμ του σαπουνιού είναι λεπτότερα κι από τα μήκη κύματος του φωτός. Είναι περίπου 20.000 φορές λεπτότερα από το πάχος μιας ανθρώπινης τρίχας. Ίσως είναι το λεπτότερο αντικείμενο που αντιλαμβανόμαστε με γυμνό μάτι. Τα διαφορετικά χρώματα σε μια σαπουνόφουσκα δηλώνουν τα διάφορα πάχη των τοιχωμάτων του φιλμ του σαπουνιού. Κοιτάζοντας λοιπόν μια σαπουνόφουσκα, είναι σαν να βλέπουμε έναν ανάγλυφο χάρτη της επιφάνειάς της. Όπως όλα τα πράγματα στη φύση, οι φούσκες προσπαθούν να διατηρούνται σε ισορροπία, δηλαδή σε κατάσταση ελάχιστης ενέργειας. Μια μοναδική φούσκα είναι λοιπόν, πάντοτε μια σφαίρα, δηλαδή, μια ενιαία επιφάνεια, χωρίς γωνίες, απείρως συμμετρική. Από όλα τα πιθανά σχήματα που θα μπορούσε να πάρει μια σαπουνόφουσκα, η σφαίρα είναι το σχήμα με τη μικρότερη επιφάνεια, πράγμα που την καθιστά την πιο αποδοτική μορφή που υπάρχει στη φύση. Γι' αυτό και βλέπουμε σφαίρες παντού γύρω μας. Οι σταγόνες της βροχής είναι σφαιρικές, γιατί το σχήμα αυτό ελαχιστοποιεί τις επιφανειακές τάσεις που κρατάνε τα μόρια της κάθε σταγόνας ενωμένα. Οι σαπουνόφουσκες δεν είναι όμως πάντα σφαιρικές, μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε για να δημιουργήσουμε άλλες μορφές. Όταν για παράδειγμα ενώνουμε δύο φούσκες, αυτές μοιράζονται μια πλευρά, την επιφανειακή χορδή της κάθε σφαίρας, για να εξοικονομήσουν και οι δύο ενέργεια. Όσο προσθέτουμε κι άλλες, η γεωμετρία αλλάζει και η μορφή μεταβάλλεται

συνεχώς ώστε να προσαρμόζεται στις νέες συνθήκες. Ενώνοντας 4 σφαίρες, στο κέντρο της δομής δημιουργείται ένα τετράεδρο, του οποίου οι έδρες είναι τμήματα σφαιρών.

**Αποκαλύπτεται έτσι ένας από τους βασικούς κανόνες της φύσης, αυτός της επιδίωξης της ελάχιστης επιφάνειας και της ελάχιστης ενέργειας.**



**Εικόνα 2.5** Τα διαφορετικά χρώματα δηλώνουν διαφορετικά πάχη τοιχωμάτων

Ο Le Corbusier συνειδητοποίησε ότι, *παρόλο που η Φύση μας παρουσιάζεται ως χάος... το πνεύμα που ζωντανεύει τη Φύση είναι ένα πνεύμα τάξης* (Le Corbusier, 1925). Ωστόσο, η κατανόηση της τάξης της φύσης περιορίστηκε από την επιστήμη της εποχής του. Σήμερα μπορούμε να αποκαλύψουμε την περίπλοκη σειρά αυτών των φαινομενικά χαοτικών προτύπων μέσω της προσομοίωσης υλικών και υπολογισμών με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.

## 2.2 Σύνοψη ιστορική αναδρομή

Το 1972 στους Ολυμπιακούς Αγώνες του Μονάχου ο κόσμος θαύμασε το στέγαστρο που κάλυπτε το Ολυμπιακό Στάδιο. Το στέγαστρο είναι τόσο λεπτεπίλεπτο που φαίνεται να μην έχουν φτιαχτεί από άνθρωπο, σαν να είναι ιστός αράχνης, έτοιμος να διαλυθεί με το παραμικρό φύσημα του αέρα. Όμως κάθε άλλο από αυτή την εντύπωση, η δομή του είναι βασισμένη στην απόλυτη ισορροπία μεταξύ της αρχιτεκτονικής μορφής και των επιφανειακών τάσεων της κατασκευής.



**Εικόνα 2.6** Ολυμπιακό Στάδιο Μονάχου

Το 1972, στην εποχή που δεν υπήρχε η μεγάλη υπολογιστική ισχύς των υπολογιστών, ήταν πολύ δύσκολο να χτιστούν κατασκευές όπως αυτή. Η κατανομή των δυνάμεων στην επιφάνεια αυτού του στεγαστρου είναι απίστευτα πολύπλοκη. Είναι αδύνατο να υπολογιστούν και να καταχωρηθούν σε σχέδιο οι διαστάσεις μιας τέτοιας κατασκευής με το χέρι. Ο μηχανικός Otto Frei αντιλήφθηκε αυτό ακριβώς, ότι δεν χρειάζεται να κάνει αυτούς τους υπολογισμούς στο χέρι. Στράφηκε λοιπόν στους κανόνες της φύσης και έκανε μικρά μοντέλα με σύρματα και σπάγκο, τα οποία βουτούσε σε σαπουνόνερο. Καθώς τραβούσε το όλο αυτό το σύστημα προς διαφορετικές κατευθύνσεις, προέκυπταν αυτές οι νέες μορφές στη μεμβράνη του φιλμ του σαπουνιού, έχοντας όλες τις ιδιότητες που είδαμε προηγουμένως (Φιοράκης Κ. & Γιαννούδης Σ., 2014). Οι επιφανειακές τάσεις καθοδηγούσαν το σχοινί στα πιο σταθερά και οικονομικά, από άποψη ενέργειας, σχήματα. Ο Otto Frei στη συνέχεια τα αντέγραφε σε μικρά μοντέλα, τα οποία ήταν τα προπλάσματα για την τελική κατασκευή. Η συνέχεια είναι γνωστή με την κατασκευή αυτού του στεγαστρου που ακόμα και σήμερα προκαλεί τον θαυμασμό. Στην Στουτγκάρδη

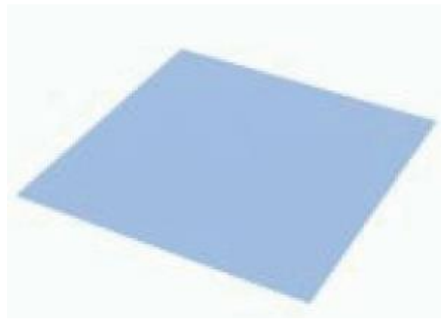
υπάρχει το Ινστιτούτο Ελαφρών Κατασκευών το οποίο ίδρυσε μαζί με τον Günter Behnisch για την μελέτη παρόμοιων κατασκευών. Άλλο ένα παράδειγμα εφαρμογής της μηχανικής ελαχίστων επιφανειών στην προ-ψηφιακή εποχή είναι η γέφυρα του Basento κοντά στην πόλη Potenza της νότιας Ιταλίας, σχεδιασμένη από τον μηχανικό Sergio Musmeci, και κατασκευάστηκε στο διάστημα 1967-1974.



**Εικόνα 2.7** Γέφυρα του ποταμού Basento, Ποτένζα, Ιταλία

Η σύνθεση των επιφανειών που παράγουν τα γεωμετρικά σχήματα είναι στην ουσία μία αρχιτεκτονική σύνθεση. Ένα πλήθος επιφανειών μπορούν να παραχθούν από την κίνηση πολλών γεωμετρικών σχημάτων (Μαθήματα Μορφολογίας 2007).

Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα



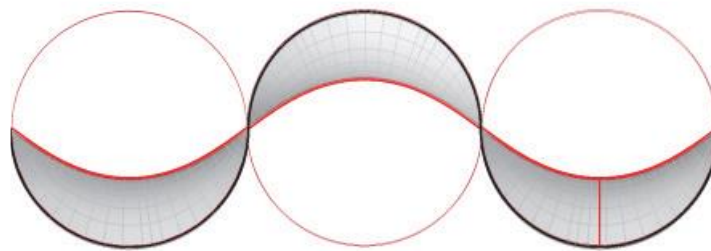
**Εικόνα 2.8** Μία απλή επιφάνεια

1. Ελάχιστες επιφάνειες μεταξύ ευθείας και κύκλου



**Εικόνα 2.8.α** Ελάχιστες επιφάνειες μεταξύ ευθείας και κύκλου

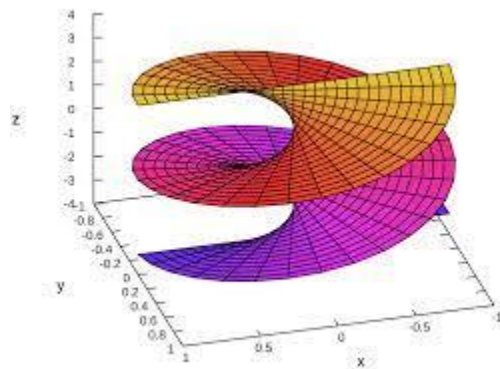
2. Ελάχιστες επιφάνειες μεταξύ κύκλων



**Εικόνα 2.8.β** Ελάχιστες επιφάνειες μεταξύ κύκλων

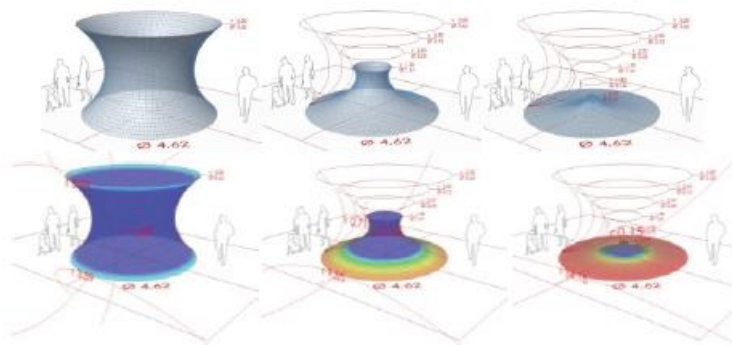
3. Ελάχιστες επιφάνειες από ελλειψοειδή περιστροφή





**Εικόνα 2.8.γ** Ελάχιστες επιφάνειες από ελλειψοειδή περιστροφή

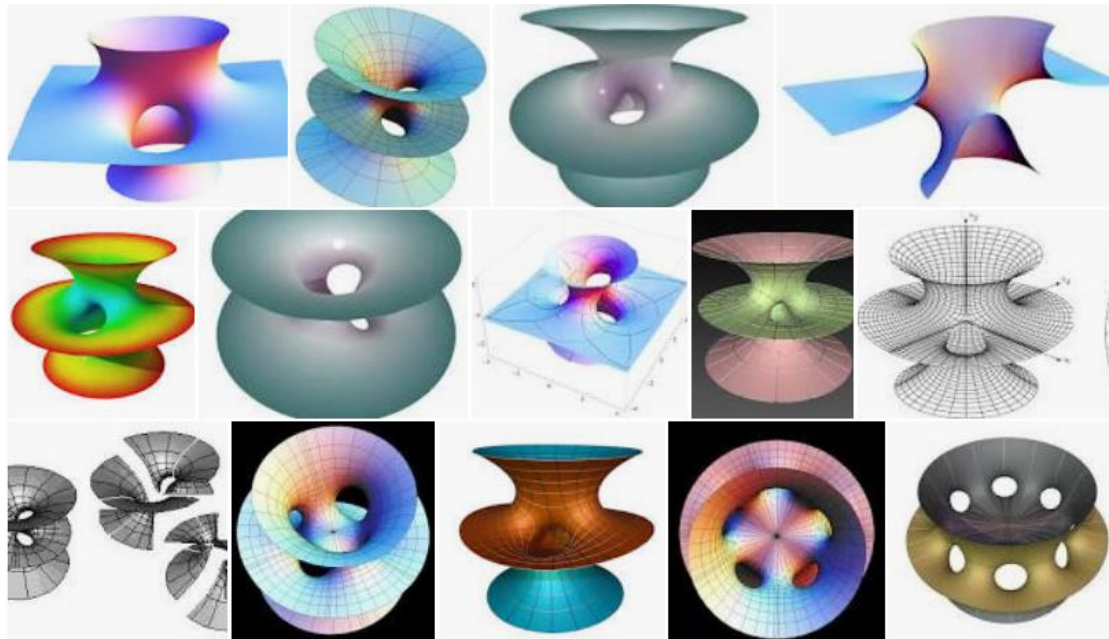
#### 4. Ελάχιστες επιφάνειες μεταξύ κυκλικών δακτυλίων



**Εικόνα 2.8.δ** Ελάχιστες επιφάνειες κυκλικών δακτυλίων

Οι επιφάνειες αυτές έχουν προκύψει από την περιστροφή μιας αλυσίδας (catena) γύρω από έναν άξονα και το σχήμα αυτό ονομάζεται αλυσσοειδές (catenary).

Μερικά παραδείγματα ελαχίστων επιφανειών, τα οποία έχουν παραχθεί μέσω του προγράμματος Mathematica, μπορούν να μας δώσουν τις δυνατότητες που υπάρχουν και μπορούν να εφαρμοσθούν στις κατασκευές.



Εικόνα 2.9 Ελάχιστες επιφάνειες μέσω του προγράμματος Mathematica

Η δυνατότητα αυτή δεν θα πρέπει όμως να μας παρασύρει σε βάρος των πραγματικών αναγκών διαβίωσης των ανθρώπων.

Κυρίαρχη κατεύθυνση της αρχιτεκτονικής δημιουργίας θα πρέπει να είναι η σκέψη του Γερμανού φιλοσόφου Χάϊντεγκερ (Heidegger), *μόνο σε μια κατοικία συμφιλιωμένη με την φύση, ο άνθρωπος είναι μέσα στον κόσμο και σε μία ασφαλή σχέση μαζί του*. Είναι δυνατόν να συλλάβουμε την ανθρώπινη κατοικία στη γη με τρόπο που να συνάδει με τον τεχνολογικό κόσμο στον οποίο ζούμε και να προαναγγέλλει μια άλλη αρχή ταυτόχρονα; (Blok V. 2014).

### **2.3 Κατασκευαστικά προβλήματα των ελαχίστων επιφανειών**

Θα μπορούσαμε έτσι να θεωρήσουμε ότι η αρχιτεκτονική και ο σχεδιασμός ήταν και είναι παραμετρικά ούτως ή άλλως, αφού τα κτήρια και οι πόλεις πάντοτε διαμορφώνονταν σύμφωνα με μεταβαλλόμενα δεδομένα όπως το κλίμα, το περιβάλλον, οι πολιτισμικές και βιολογικές ανάγκες, η στατική και βιοκλιματική λειτουργία (Aish and Woodbury, 2005: 152; Gerber, 2007: 54; Hudson, 2010: 18). Αυτό συνεπάγεται μια θεμελιώδη οντολογική μετατόπιση εντός των βασικών, συστατικών στοιχείων της αρχιτεκτονικής. Αντί της κλασικής και σύγχρονης εξάρτησης σε ιδανικά γεωμετρικά σχήματα - ευθείες γραμμές, ορθογώνια, καθώς και κύβοι, κύλινδροι, πυραμίδες, σφαίρες και ημισφαίρια- δημιουργούνται νέες δυναμικές γεωμετρικές οντότητες όπως ελλειψοειδή, αλυσσοειδή και πολλοί άλλοι διαφορετικοί συνδυασμοί που δίνουν απεριόριστες δυνατότητες αρχιτεκτονικής έκφρασης (Μάγγας Σ., 2022).

Η ταχύτητα με την οποία τα παραμετρικά εργαλεία αναπτύσσονται, σε συνδυασμό με τις απαιτητικές συνθήκες που κυριαρχούν στη σύγχρονη κατασκευή, συχνά μειώνουν την αρχιτεκτονική δημιουργία σε στείρα αναπαραγωγή των εντυπωσιακών μορφών που παράγει ο υπολογιστής με την εκτέλεση αλγοριθμικών κωδικών (Παπαχριστοφόρου Α., 2014).

Η ψηφιακή εποχή έχει εισάγει μια νέα προσέγγιση στην αρχιτεκτονική μορφή. Η ραγδαία πρόοδος της τεχνολογίας του σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστών (Computer-Aided Design, CAD) επέτρεψε στους αρχιτέκτονες να ξεπεράσουν τα παραδοσιακά όρια του σχεδιασμού και να μετατρέψουν ένα οποιοδήποτε φανταστικό σχήμα σε μια ρεαλιστική αρχιτεκτονική μορφή. Στο πλαίσιο αυτό, ο δομικός σχεδιασμός καθυστερεί καθώς υπάρχουν δεσμεύσεις του μηχανικού απέναντι στην οποιαδήποτε αρχιτεκτονική μορφή οι οποίες περιορίζουν την κατασκευή του κτιρίου. Ενώ μια μεγάλη ποικιλία εργαλείων εξυπηρετεί την αρχιτεκτονική γεωμετρία, όπως ο παραμετρικός σχεδιασμός, ο οποίος είναι διαθέσιμος για χρήση από τους αρχιτέκτονες προσφέροντας απεριόριστες δυνατότητες και ταχύτητα στον σχεδιασμό, σε αντίθεση με τη μηχανική που έχει παραδοσιακές τεχνικές στατικής ανάλυσης.

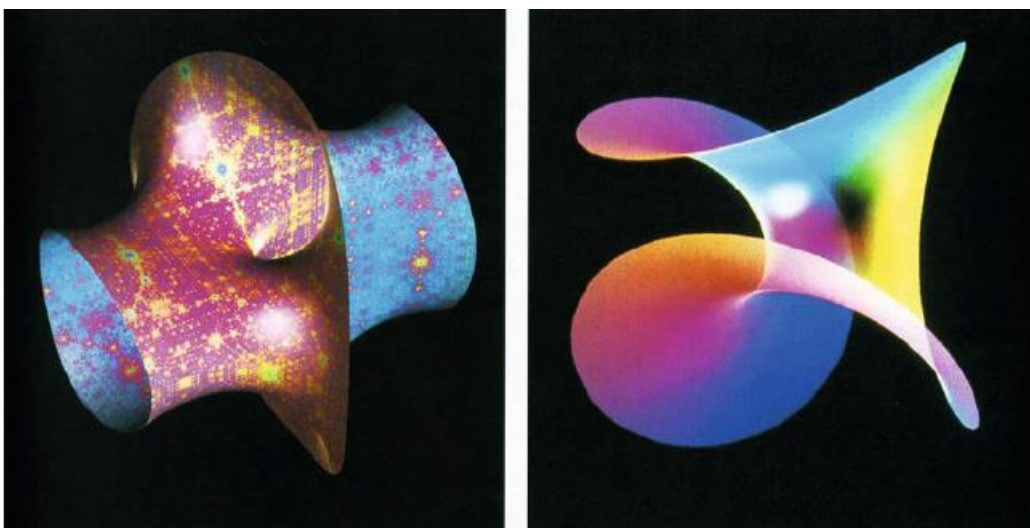
Όταν πρόκειται για απλά προβλήματα μηχανικής και κτίρια που αποτελούνται από απλά δομικά στοιχεία όπως υποστυλώματα, δοκοί και πλάκες, η συμπεριφορά των οποίων μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητή και να εκτιμηθεί, ο μηχανικός μπορεί πολύ γρήγορα να δίνει τις στατικές πληροφορίες του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Οι ίδιες πληροφορίες δεν μπορούν να δοθούν όταν πρόκειται για σχήματα ελεύθερης μορφής. Όσο πιο περίπλοκη γίνεται η αρχιτεκτονική μορφή, τόσο πιο δύσκολο είναι για τον μηχανικό να ερμηνεύσει και να καταλάβει τη στατική συμπεριφορά του φορέα. Για κάθε επιφάνεια ελεύθερης μορφής ο πολιτικός μηχανικός έχει ως στόχο να διατυπώσει μια λύση που θα ενσωματωθεί με την αρχιτεκτονική μορφή και να παρέχει ευστάθεια κάτω από την επίδραση των εξωτερικών δράσεων. Προφανώς, ορισμένοι περιορισμοί εντός των ορίων της ασφαλείας και της οικονομίας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να γίνει η κατασκευή εφικτή. Επομένως είναι δουλειά του πολιτικού μηχανικού, να συμβουλευσει τον αρχιτέκτονα, στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού για εφαρμόσιμες κατασκευαστικές λύσεις και σε ένα μεταγενέστερο στάδιο για τον αυστηρό σχεδιασμό και τον έλεγχο της προτεινόμενης λύσης. Μια χρονοβόρα διαδικασία για την μοντελοποίηση και την προσομοίωση, πριν από τον προσδιορισμό των στατικών αποτελεσμάτων προκαλεί αναπόφευκτα τριβή, γεγονός που περιορίζει την αποδοτικότητα της στατικής μελέτης (Μπέντας Α., 2011).

Αυτό αυξάνει την ανάγκη για καλύτερη συνεργασία μεταξύ του λογισμικού που χρησιμοποιείται από την ομάδα σχεδιασμού και των διαφόρων υπολογιστικών εργαλείων. Χρησιμοποιώντας τη δύναμη του παραμετρικού σχεδιασμού, σε συνδυασμό με λογισμικό στατικής ανάλυσης, μπορεί κανείς να επιταχύνει τη διαδικασία και να αποκτήσει τη δυνατότητα να διερευνήσει περισσότερες επαναλήψεις μιας στατικής επίλυσης οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στο βέλτιστο αποτέλεσμα χωρίς να περιορίζονται από χρονικά όρια. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις στατικές επιλύσεις είναι οι παράμετροι που τροφοδοτούν την αρχιτεκτονική μορφή και καταλήγουν σε ένα βέλτιστο σχεδιασμό. Η ύπαρξη πολλών νέων εργαλείων σχεδιασμού τρισδιάστατης σχεδίασης μοντέλων ελεύθερης μορφής έχει απελευθερώσει τη δημιουργικότητα (Velimirović et al., 2008).

Η τεχνολογία έπαιξε πάντα μεγάλο ρόλο στον τρόπο που σχεδιάζει η εταιρεία που ίδρυσε η ίδια η Zaha Hadid, (Zaha Hadid Architects, ZHA). Η εταιρεία χρησιμοποιεί λογισμικό παραμετρικής σχεδίασης όπως το Grasshopper και προγράμματα εικονικής πραγματικότητας (virtual reality, VR) για να μπορέσει να έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα (Winchester H., 2022).

Σήμερα όλο και περισσότεροι σχεδιάζουν τρισδιάστατα μοντέλα στον υπολογιστή εξ αρχής. Δεν σχεδιάζονται πλέον μια κάτοψη, μια τομή και μια όψη, αλλά ένα τρισδιάστατο μοντέλο, από το οποίο στη συνέχεια εξάγονται αυτά τα σχέδια. Ως αποτέλεσμα, η σχεδίαση και η κατασκευή κατασκευαστικών σχεδίων γίνονται ολοένα και πιο αλληλένδετες (<https://www.chaos.com/blog/zaha-hadid-architects-on-the-tech-behind-its-iconic-designs>). Ο αρχιτέκτονας Cristiano Ceccato, που συνεργάζεται στο αρχιτεκτονικό γραφείο Zaha Hadid Architects, τόνισε πως οι αρχιτέκτονες, απέναντι στην εντατική χρήση των εργαλείων τη παραμετρικής μοντελοποίησης σε όλη την ακολουθία σχεδιασμού, θα πρέπει να έχουν ως γνώμονα και εργαλείο την λογική (Ceccato C., 2012).

Παρόλα τα σύγχρονα σχεδιαστικά εργαλεία τα οποία υπάρχουν και βοηθούν στον σχεδιασμό θα πρέπει για τη μέγιστη δημιουργικότητα θα πρέπει ο αρχιτέκτονας να έχει κατανόηση της Μηχανικής και ο πολιτικός μηχανικός έχει γνώση Σχεδιασμού.



**Εικόνα 2.10** Επιφάνειες Costa-Hoffman-Meeks

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

### **3. ΟΙ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΟ ΤΗΣ ZAHA HADID**

Ο σχεδιασμός ενός αρχιτεκτονικού έργου ήταν και είναι παραμετρικά ούτως ή άλλως αφού τα κτήρια και οι πόλεις πάντοτε διαμορφώνονταν σύμφωνα με μεταβαλλόμενα δεδομένα όπως το κλίμα και τη γεωμορφολογία της περιοχής, το περιβάλλον, τις ανάγκες των ανθρώπων (πολιτισμικές και βιολογικές) καθώς και τη στατική και βιοκλιματική λειτουργία ενός έργου (Aish R. & Woodbury R., 2005: 152; Gerber, 2007: 54; Hudson, 2010: 18).

Από το πλήθος των έργων που έχουν εκπονηθεί στην εργασία αυτή εξετάζονται δύο εμβληματικά έργα.

Το έργο **Shell & Shadow (Κέλυφος και Σκιά)**, ως μία από τις πρώτες ολοκληρωμένες μελέτες στην οποία εφαρμόστηκε ο παραμετρικός σχεδιασμός σε όλα τα στάδια κατασκευής καθώς και για τις πολλές καινοτόμες εφαρμογές στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Η γέφυρα με την ονομασία **Striatus**, η οποία εγκαταστάθηκε στο Giardini della Marinaressa στο Ευρωπαϊκό Πολιτιστικό Κέντρο στη Βενετία, μπορεί να θεωρηθεί σαν ευκαιρία για να εκτεθούν οι δυνατότητες του μη οπλισμένου σκυροδέματος και του υπολογιστικού σχεδιασμού.

### 3.1 Shell & Shadow

Μία από τις πρώτες εφαρμογές παραμετρικού σχεδιασμού είναι το έργο **Shell & Shadow**. Το έργο αυτό περιλαμβάνει τέσσερις σιδηροδρομικούς σταθμούς, σε μήκος 1,8 χιλιομέτρων του τελεφερίκ Nordpark στο Innsbruck της Αυστρίας. Το αποτέλεσμα είναι οι τέσσερις σταθμοί του τελεφερίκ, **Congress, Löwenhaus, Alpenzoo** και **Hungerburg**, να μοιάζουν με παγετώνες, δίνοντας την εντύπωση ότι οι παγετώνες από το κοντινό βουνό έχουν μεταφερθεί ακριβώς στην καρδιά της πόλης.

#### 3.1.1 Σχεδιαστική προσέγγιση

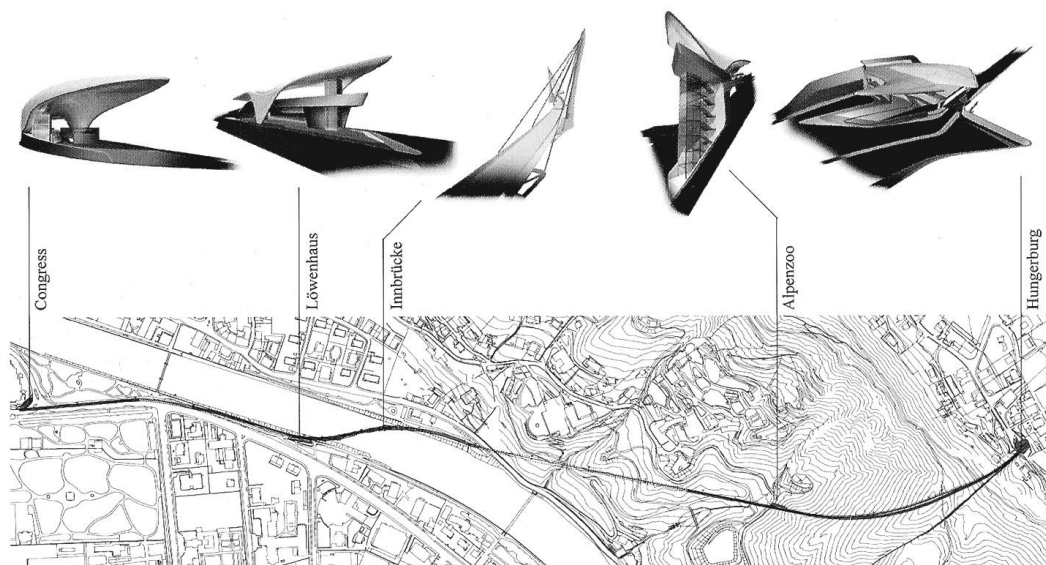
Το **Shell & Shadow** είναι ένα έργο του ZHA για τους σταθμούς της σιδηροδρομικής γραμμής που συνδέουν το Innsbruck (Αυστρία) με την περιοχή Nordpark στα βόρεια της πόλης (χάρτης).



Εικόνα 3.1.1 Χάρτης της περιοχής του Innsbruck

Το έργο αποτελείται από τέσσερις (4) σταθμούς και μια κρεμαστή γέφυρα πάνω από τον ποταμό Inn και τα εγκαίνιά του έγιναν την 1<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2007. Ξεκινώντας από το σταθμό του **Congress** (560m) στο κέντρο της πόλης, ο σιδηρόδρομος ταξιδεύει στο σταθμό **Löwenhaus** (560m), πριν διασχίσει τον ποταμό, ανεβαίνοντας το βουνό Nordkette βόρεια του Ίνσμπρουκ μέχρι το σταθμό **Alpenzoo** (750m) ενώ ο τελευταίος σταθμός είναι στο χωριό **Hungerburg** (860m). Στο χωριό αυτό, που βρίσκεται 280 μέτρα πάνω από το Ίνσμπρουκ, υπάρχει το τελεφερίκ που οδηγεί στις πίστες του σκι, στο βουνό Seegrube.





**Εικόνα 3.1.2** Σχεδιάγραμμα της πόλης του Innsburg

Η αρχιτεκτονική σύλληψη εμπνεύστηκε από τους φυσικούς σχηματισμούς του χιονιού της περιοχής, με κύριο χαρακτηριστικό τους την αίσθηση της συνεχούς ρευστότητάς τους (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/nordpark-railway-stations/>). Η αρχιτεκτονική σχεδίαση κάθε σταθμού μελετήθηκε προσεχτικά και προσαρμόστηκε ως προς τις συγκεκριμένες συνθήκες του χώρου, την τοπογραφία (υψόμετρο, κλίση του εδάφους) καθώς επίσης τα φυσικά φαινόμενα όπως τους παγετώνες και τις κινήσεις του πάγου. Λόγω διαφορετικής γεωμετρίας και υψομέτρου, οι τέσσερις σταθμοί έπρεπε να υπολογιστούν με διαφορετικά φορτία χιονιού και ανέμου σύμφωνα με τους αυστριακούς οικοδομικούς κανονισμούς (Bollinger, Grochman, Tessman, 2011).

	Congress	Alpenzoo	Hungerburg	Löwenhaus
Snow	2,10 kN/m <sup>2</sup>	2,39 kN/m <sup>2</sup>	3,14 kN/m <sup>2</sup>	2,10 kN/m <sup>2</sup>
Wind suction top side	-0,49 kN/m <sup>2</sup>	-0,61 kN/m <sup>2</sup>	-0,64 kN/m <sup>2</sup>	-0,64 kN/m <sup>2</sup>
Wind suction bottom side	-0,24 kN/m <sup>2</sup>	-0,30 kN/m <sup>2</sup>	-0,32 kN/m <sup>2</sup>	-0,32 kN/m <sup>2</sup>
Wind suction side areas	-0,61 kN/m <sup>2</sup>	-0,76 kN/m <sup>2</sup>	-0,81 kN/m <sup>2</sup>	-0,81 kN/m <sup>2</sup>
Wind pressure side areas	0,76 kN/m <sup>2</sup>	0,95 kN/m <sup>2</sup>	1,00 kN/m <sup>2</sup>	1,00 kN/m <sup>2</sup>

**Πίνακας 3.1.1** Επισκόπηση σημαντικών φορτίων στους τέσσερις σταθμούς

Η αρχιτεκτονική σχεδίαση προσπάθησε να αποδώσει αυτή τη ρευστότητα και την κίνηση των φυσικών σχηματισμών που δίνουν την εντύπωση ενός παγωμένου ρεύματος που ρέει στην πλαγιά του βουνού, με αποτέλεσμα κάθε σταθμός να είναι διαφορετικός.



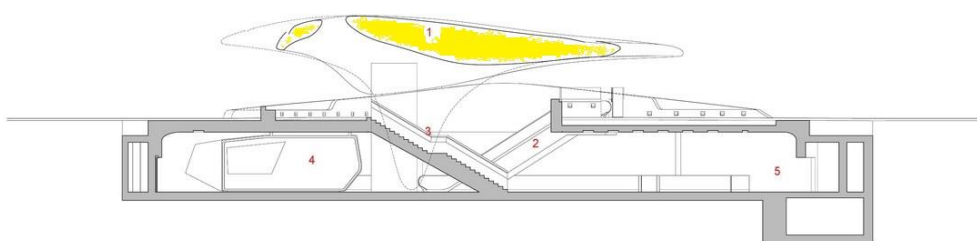
**Εικόνα 3.1.3** Τα στέγαστρα των σταθμών σε σχέση με το υψόμετρο

Η προσέγγιση αυτή ήταν κρίσιμη για τον σχεδιασμό, καθώς η μορφολογία του έργου απαιτούσε τη χρησιμοποίηση της πιο πρόσφατης αρχιτεκτονικής μεθόδου, του *Παραμετρισμού*. Με την μέθοδο αυτή η τυπική αρχιτεκτονική εμπλουτίζεται και επιτρέπει την αντιμετώπιση των πολύπλοκων δομών του κελύφους. Οι αρχιτέκτονες χρησιμοποίησαν τεχνολογίες σχεδίασης και κατασκευής αιχμής που αναπτύχθηκαν για την αυτοκινητοβιομηχανία για να δημιουργήσουν την βελτιωμένη αισθητική κάθε σταθμού. Όλα ξεκινήσανε μόνο με μια ιδέα και εξελίχθηκε σε ένα απλό σκίτσο ή σχέδιο. Το πρόγραμμα Rhino (Rhinoceros) μπορεί να δημιουργεί, να επεξεργάζεται, να αναλύει, να τεκμηριώνει, να αποδίδει, να ζωντανεύει και να μεταφράζει όλα αυτές τις καμπύλες και τις επιφάνειες και τα στερεά Nurbs (Non-uniform rational basis spline) χωρίς περιορισμούς στην πολυπλοκότητα, τον βαθμό ή το μέγεθος. Το Rhino υποστηρίζει επίσης πολύγωνα πλέγματα και νέφη σημείων. Το πρόγραμμα αυτό παρέχει όλα τα απαιτούμενα εργαλεία μοντελοποίησης. Επίσης τεκμηριώνει με μεγάλη ακρίβεια οποιοδήποτε σχέδιο από μηχανική, κινούμενα σχέδια μέχρι πολύπλοκα σχέδια κατασκευών (<https://www.rhino3d.com>).

Το γραφείο ZHA για την υλοποίηση των σχεδίων χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Rhino Grasshopper. Τα προγράμματα τα Autocad, Revit και Catia βοήθησαν στην ανάλυση και την κατασκευή ώστε να γίνουν πιο ρεαλιστικές οι

Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα

σχεδιαστικές πτυχώσεις του έργου. Επίσης περιστασιακά χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα 3dsMax για ρεαλιστική αισθητική απεικόνιση (renders), (<https://www.chaos.com/blog/zaha-hadid-architects-on-the-tech-behind-its-iconic-designs>).



Longitudinal Section: Congress Station  
Längsschnitt: Congress Station  
Nordpark Cable Railway

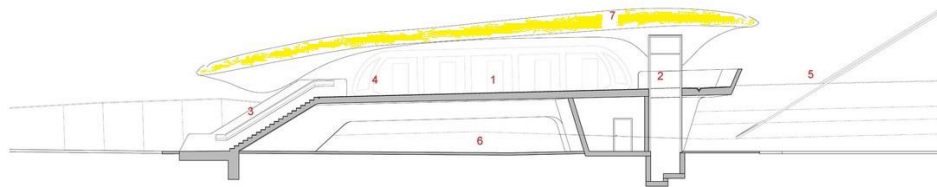
1. Roof Shell/ Dach Schale
2. Escalators / Rolltreppe
3. Stairs / Treppen
4. Ticket House / Kassen Haus
5. Escape Route / Flucht Weg

**Εικόνα 3.1.4** Σχέδιο του στεγάστρου του σταθμού Congress



**Εικόνα 3.1.5** Φωτογραφία του σταθμού Congress

Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα



- 1. Platform / Bahnsteig Platform
- 2. Elevator / Fahrstuhl
- 3. Stairs / Treppe
- 4. Track / Gleise
- 5. Bridge / Brücke
- 6. Promenade / Uferpromenade
- 7. Roof Shell / Dachschale

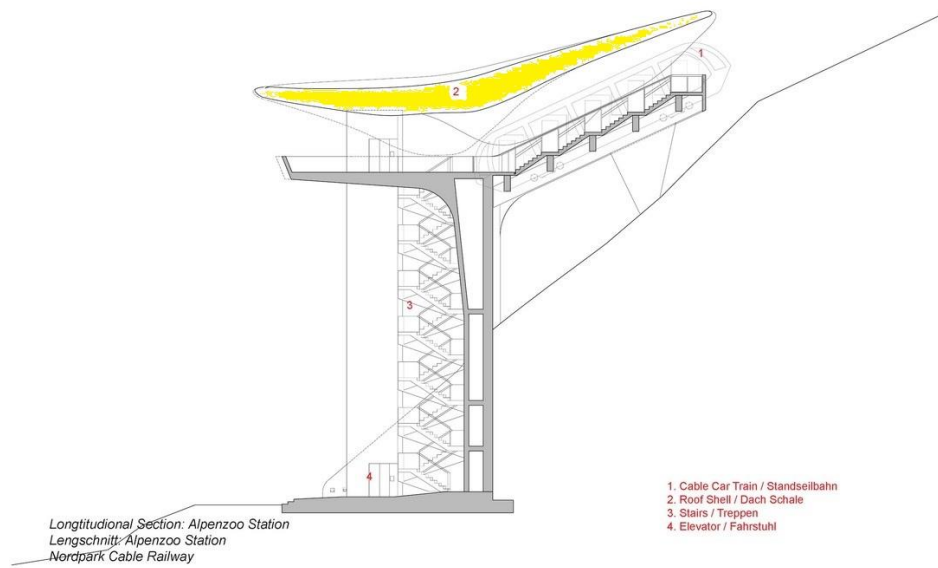
Longitudinal Section: Loewenhaus Station  
Längsschnitt: Loewenhaus Station  
Nordpark Cable Railway

**Σχέδιο 3.1.6** Σχέδιο του στεγάστρου του σταθμού Löwenhouse

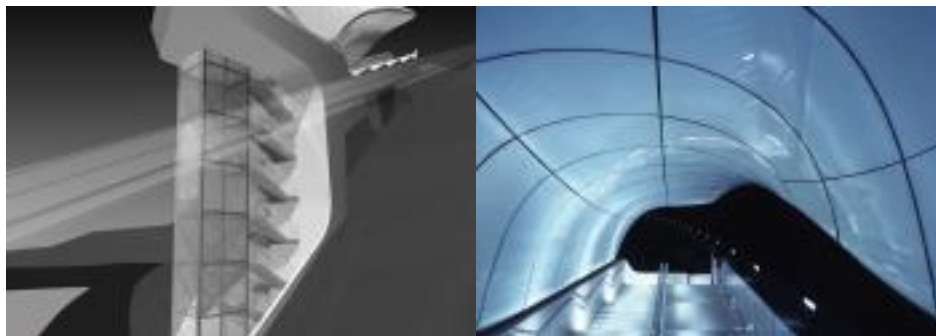


**Εικόνα 3.1.7** Φωτογραφία του σταθμού Löwenhouse

Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα

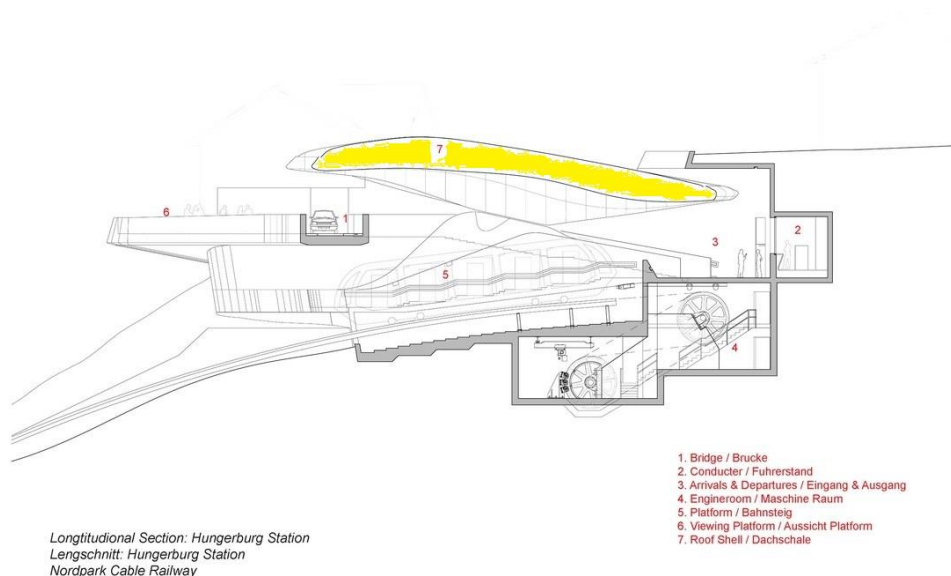


**Σχέδιο 3.1.8** Σχέδιο του στεγάστρου του σταθμού Alpenzoo

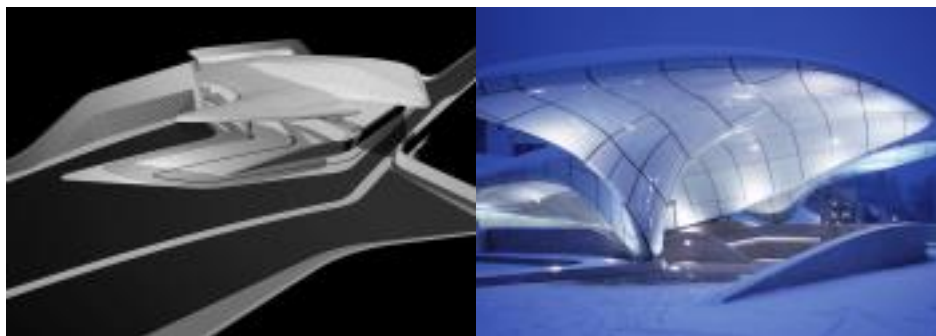


**Εικόνα 3.1.9** Φωτογραφία του σταθμού Alpenzoo

Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα



Σχέδιο 3.1.10 Σχέδιο του στεγάστρου του σταθμού Hungerbourg



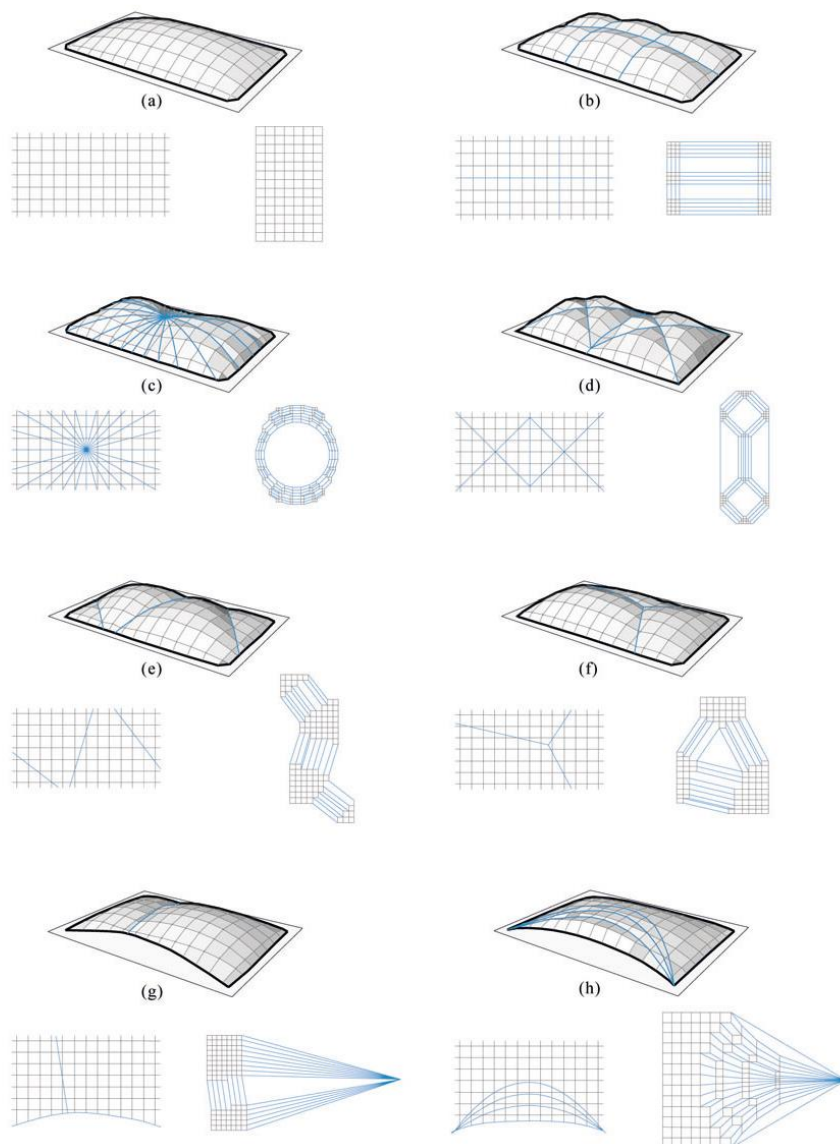
Εικόνα 3.1.11 Φωτογραφία του σταθμού Hungerbourg

### 3.1.2 Ελάχιστες επιφάνειες του έργου

Για κάθε σταθμό έγιναν υπολογισμοί με τη χρησιμοποίηση τη μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) (Tehen & Hofmman, 2008). Το FEM είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης, της ροής των ρευστών, της κατανομής των μαγνητικών πεδίων, της θερμότητας και άλλων προβλημάτων πεδίου που θα ήταν επικίνδυνο να επιλυθούν με οποιαδήποτε άλλη προσέγγιση (Συμεωνίδου Ι., 2016).

Η αρχιτεκτονική πρακτική την τελευταία δεκαετία έχει αποδεχθεί τη μεγάλη χρήση πολλών παραμετρικών εργαλείων τα οποία έχουν αναπτυχθεί (Austern et al., 2018).

Οι εξαιρετικά προηγμένες αρχιτεκτονικές μορφές των ελαχίστων επιφανειών στο συγκεκριμένο έργο απαιτούσε εξειδικευμένα λογισμικά. Τα εργαλεία αυτά δίνουν τη δυνατότητα στους αρχιτέκτονες να μελετήσουν και να βελτιώνουν τον σχεδιασμό σε κάθε στάδιο της κατασκευής. Τα αρχιτεκτονικά σχήματα των στεγάστρων σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας το εργαλείο παραμετρικής μοντελοποίησης Grasshopper®. Υπάρχουν άπειρες πιθανές παραλλαγές του διαγράμματος δυνάμεων, που η καθεμία αντιστοιχεί σε μια διαφορετική τρισδιάστατη λύση για δεδομένα φορτία και όριο συνθηκών. Αυτό παρέχει ουσιαστικά απεριόριστη ελευθερία στους δημιουργούς (Mele Van T. et al. 2014; Tang Ch., et al., 2016).



**Εικόνα 3.1.12** Ποικιλιομορφία επιφανειών που δημιουργείται σε ένα τετρασθενές δίκτυο αλλάζοντας τον συσχετισμό των δυνάμεων (Mele Van T. et al. 2014)

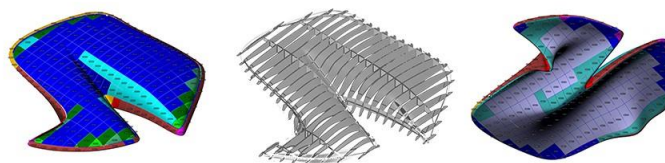
Η μορφή των πάνελ προσδιορίστηκε μετά από υπολογισμούς, με βάση το συγκεκριμένο πρόγραμμα FEM, έτσι ώστε να παρουσιάζουν τις ελάχιστες παραμορφώσεις για μία δεδομένη επιφάνεια. Η μελέτη των υπολογισμών έγινε λαμβάνοντας υπόψη τις καιρικές συνθήκες καθώς και όλες τις άλλες παραμέτρους που έχουν αναφερθεί. Το αποτέλεσμα ήταν ότι, για να είναι άκαμπτα τα πάνελ έπρεπε να έχουν μέγιστο πλάτος 1,25m. Συνολικά κατασκευάστηκαν 850 γυάλινα πάνελ τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κάλυψη και των τεσσάρων σταθμών, με συνολική επιφάνεια 2,500m<sup>2</sup>. Το βασικό υλικό της διαδικασίας κατασκευής ήταν μια σειρά πάνελ από γυαλί πάχους 12mm, που χωρίστηκαν σε ομάδες σύμφωνα με τα ακόλουθα (Tehen & Hofmman, 2008):

**Θέση** (πάνω, κάτω, πλάγια)

**Συνθήκες στήριξης** (στήριξη σε 2 πλευρές με ή χωρίς πρόσθετες άκαμπτες νευρώσεις, στήριξη κατά μήκος 3 άκρων)

**Γεωμετρία γυαλιού** (λυγισμένο σε έναν ή δύο άξονες ή πολλαπλά λυγισμένο)

Η χρησιμοποίηση των παραμετρικών εργαλείων βοήθησε, μέσω μαθηματικών συναρτήσεων, στον έλεγχο των αριθμητικών τιμών με τις οποίες έγινε ο προσδιορισμός των ελαχίστων επιφανειών, ώστε αυτές να δέχονται τις ελάχιστες παραμορφώσεις, να έχουν σταθερότητα καθώς επίσης και την ακριβή θέση κάθε επιφάνειας (<https://www.rhino3d.com>).



**Εικόνα 3.1.13** Οι διάφορες μορφές των ελαχίστων επιφανειών και το πλέγμα εφαρμογής τους

### 3.1.3 Κατασκευαστική προσέγγιση

Η υλοποίηση του έργου απαιτούσε τη χρησιμοποίηση προωθημένων τεχνολογιών σχεδίασης. Οι αρχιτέκτονες για να μπορέσουν να έχουν τα αισθητικά αποτελέσματα



που επιθυμούσαν, χρησιμοποίησαν τεχνολογίες σχεδίασης και κατασκευής αιχμής. Οι τεχνολογίες αυτές αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της αυτοκινητοβιομηχανίας και χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του συγκεκριμένου έργου. Οι πολύπλοκες σχεδιαστικές απαιτήσεις του έργου μόνο με τη χρήση σύγχρονων υπολογιστικών προγραμμάτων θα μπορούσαν να αντιμετωπισθούν. Το αρχιτεκτονικό γραφείο ZHA, και όχι μόνο αυτό αλλά όλο και περισσότεροι, σχεδιάζουν τρισδιάστατα στον υπολογιστή. Δεν σχεδιάζονται πλέον μια κάτοψη, μια τομή και μια όψη, αλλά ένα τρισδιάστατο μοντέλο, από το οποίο στη συνέχεια εξάγονται αυτά τα σχέδια. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα, η σχεδίαση και η κατασκευή κατασκευαστικών σχεδίων γίνονται ολοένα και πιο αλληλένδετες (Ceccato C. 2012).

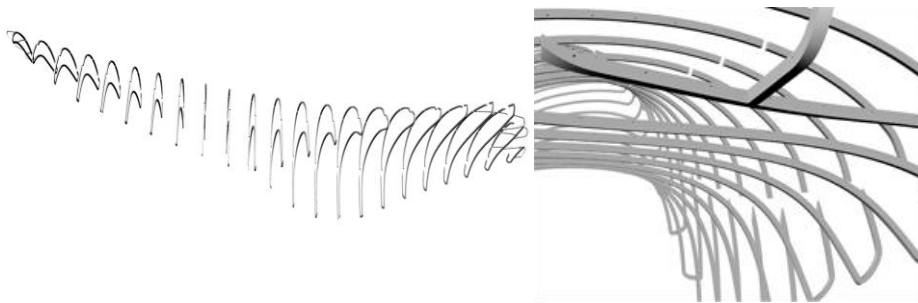
Οι βάσεις των σταθμών καθώς και γέφυρες και πυλώνες από τους οποίους κρέμονται μεταλλικά καλώδια στήριξης είναι κατασκευασμένες από τσιμεντένιους πλίνθους που κατασκευάστηκαν επί τόπου. Οι πλίνθοι έχουν επίπεδες επιφάνειες με καμπύλες γωνίες με το σκυρόδεμα να είναι εκτεθειμένο δείχνοντας την υφή του υλικού. Όλα αυτά δίνουν στις πλίνθους μια συμπαγή, συνδεδεμένη με τη γη εμφάνιση που σηκώνει τους γυάλινους θόλους. Πάνω σε αυτές τις βάσεις επικάθονται οι ελαφρές κατασκευές οροφής από γυαλί, που μοιάζουν με παγωμένους παγετώνες, δημιουργώντας ένα τεχνητό τοπίο που δίνει την εντύπωση ότι το κοντινό βουνό βρίσκεται ακριβώς στην καρδιά της πόλης. Η αντίθεση μεταξύ του απαλού κυματοειδούς σχήματος των οροφών και των σταθερών βάσεων κατασκευασμένων από σκυρόδεμα, κάνει τους σταθμούς μοναδικούς και τους δίνει μια σχεδόν μαγική αίσθηση έλλειψης βαρύτητας. Τα ρευστά σχήματα των θόλων των σταθμών προσφέρονται στη φυσική ροή του νερού, του χιονιού και κυρίως του ανέμου. Στο θυελλώδες και κρύο περιβάλλον των Άλπεων, ο αεροδυναμικός σχεδιασμός αποκτά τον σημαντικότερο ρόλο (Schumacher, P., 2005). Το έργο Nordpark Railway Stations σχεδιάστηκε από το ZHA αφού πρώτα ερευνήθηκαν και πειραματίστηκαν με τη ρευστότητα του σχήματος των θόλων και τη χρησιμοποίηση καινοτόμων υλικών (Kormaníková, L., et al., 2018).

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα στέγαστρα, που μοιάζουν με φτερά αεροσκάφους, είναι από επεξεργασμένο καθαρό γυαλί που δίνει ένα γυαλιστερό, λαμπερό φινίρισμα, όπως ο πάγος. Το γυαλί έχει υποστεί ειδική επεξεργασία ώστε

να αποκτήσει μεγάλη σκληρότητα και να έχει το πρακτικό πλεονέκτημα ώστε να είναι ανθεκτικό στις συστολές διαστολές καθώς και σε χτυπήματα από πτώση βράχων ή χιονοστιβάδων (Techen & Hofmann, 2008). Το γεγονός αυτό ώθησε την τεχνολογία γυαλιού στα όριά της με την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών υλοποίησης των σχεδιαστικών απαιτήσεων. Κάθε γυάλινο πάνελ, που ήταν μοναδικό στη γλυπτική του μορφή, έπρεπε να διαμορφωθεί με ακρίβεια στο τελικό διπλό καμπύλο σχήμα του. Η τεχνολογία γυαλιού αναπτύχθηκε από τους δομικούς μηχανικούς του γραφείου Bollinger & Grohmann και τα πάνελ κατασκευάστηκαν στην Κίνα χρησιμοποιώντας μηχανήματα ελεγχόμενα από υπολογιστή (Computerised Numeric Control, CNC), τα οποία συνδέονταν απευθείας με τον υπολογιστή CAD της ομάδας σχεδιασμού. Το έργο αυτό αποτελεί παγκόσμιο σημείο αναφοράς για τη χρήση γυαλιού διπλής καμπυλότητας στις κατασκευές. Η κατασκευή αυτή όπως και άλλα έργα ελεύθερης μορφής έχουν κατασκευασθεί χρησιμοποιώντας τέτοιες διαδικασίες οι οποίες είναι διαθέσιμες μόνο για έργα με υψηλό κόστος κατασκευής (Castañeda E. et al. 2015).

Ο σκελετός, της φέρουσας κατασκευής των στεγάστρων του σταθμού, κατασκευάσθηκε από ανοξείδωτο χάλυβα, με τις κεντρικές διαμήκης ράβδους να απέχουν μεταξύ τους 1,25 m. Οι εγκάρσιες νευρώσεις, γύρω από τις οποίες θα τυλίγονταν τα πάνελ από το γυαλί της διπλής καμπύλης, είναι και αυτές χαλύβδινες και έχουν σχήμα το ακριβές περίγραμμα των πάνελ. Τα πάνελ έχουν τυλιχτεί γύρω από παράλληλες χαλύβδινες νευρώσεις που απέχουν 1,25m. Οι χαλύβδινες νευρώσεις εξετάσθηκαν λεπτομερώς ώστε να αποφευχθούν κίνδυνοι λυγισμού καθώς σύμφωνα με έρευνα η παραμόρφωση αυξάνεται με το ύψος που βρίσκεται ο σταθμός (Bollinger K., et al., 2011).

Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα



**Εικόνα 3.1.14** Το σχέδιο του σκελετού της φέρουσας κατασκευής



**Εικόνα 3.1.15** Κατασκευή του χαλύβδινου σκελετού

Επίσης μια λωρίδα πολυαιθυλενίου πάχους 93mm, που είχε και αυτή διαμορφωθεί με CNC στην ακριβή καμπυλότητα κάθε πάνελ, βιδώθηκε γύρω από την εξωτερική άκρη κάθε χαλύβδινου νεύρου. Η μέθοδος συναρμολόγησης επί τόπου ήταν ακόμη πιο περίπλοκη.



**Εικόνα 3.1.16** Κατασκευή του χαλύβδινου σκελετού με τις λωρίδες πολυαιθυλενίου

Η Zaha Hadid ήθελε, η κυρτή εξωτερική επιφάνεια σε όλα τα πάνελ να είναι απλοποιημένη, χωρίς να διακόπτεται από κενά, εξογκώματα ή κεφαλές μπουλονιών. Επινοήθηκε ένα μυστικό σύστημα στερέωσης στο οποίο πάνω στο πλέγμα από ανοξείδωτο χάλυβα κολλούσαν με κόλλα κάθε πάνελ έτσι ώστε να

προεξέχουν ελαφρώς από τις άκρες. Τέλος, τα κενά των 25mm μεταξύ των πάνελ γεμίστηκαν με μαύρη σιλικόνη που έκρυβε τα πλέγματα και τις βίδες. Μερικά από τα πάνελ διαθέτουν ακόμη και μια συνεχή εσοχή για να χρησιμεύσει ως υδρορροή βροχής που κρύβεται μέσα στην επάνω επιφάνεια του θόλου. Μετά από αυτό το τελικό τζάμι τοποθετήθηκε πάνω από το υπόστρωμα. Το υπόστρωμα ήταν ένα στρώμα λευκής ρητίνης πολυουρεθάνης (PU) πάχους 1.5mm. Επιστρώθηκε στην κάτω πλευρά του πάνελ με σκοπό να συγκρατεί το γυαλί σε περίπτωση που θρυμματιστεί και να του δίνει μια έντονη λευκή εμφάνιση του πάγου. Όλα τα πάνελ ήταν προκατασκευασμένα με ανοχή  $\pm 3\text{mm}$  και μετά την κατασκευή, το ακριβές σχήμα και οι διαστάσεις τους ελέγχθηκαν από ψηφιακό σαρωτή 3D (Spring M., 2007).

Δεδομένου ότι η επιφάνεια της οροφής είναι ελεύθερης μορφής καμπυλωτή, το προφίλ αλλάζει συνεχώς και το σχήμα ακολουθεί τις νευρώσεις του πλέγματος, με αποτέλεσμα 4.000 ξεχωριστά διαμορφωμένα κομμάτια πολυαιθυλενίου (PE). Για την κατασκευή στέγης απαιτήθηκαν περίπου  $3,000\text{m}^2$  προσαρμοσμένων προφίλ πολυαιθυλενίου (PE). Αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση της γυάλινης επένδυσης της οροφής με τις χαλύβδινες νευρώσεις της υποκείμενης κατασκευής. Η παραγωγή αυτών των τμημάτων δημιουργήθηκε απευθείας από τα δεδομένα 3D-CAD για την επιφάνεια της οροφής και των νευρώσεων.

#### **3.1.4 Συμπεράσματα**

Τα επιμέρους συμπεράσματα που προκύπτουν από την κατασκευή του έργου **Shell & Shadow (Κέλυφος και Σκιά)** μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα.

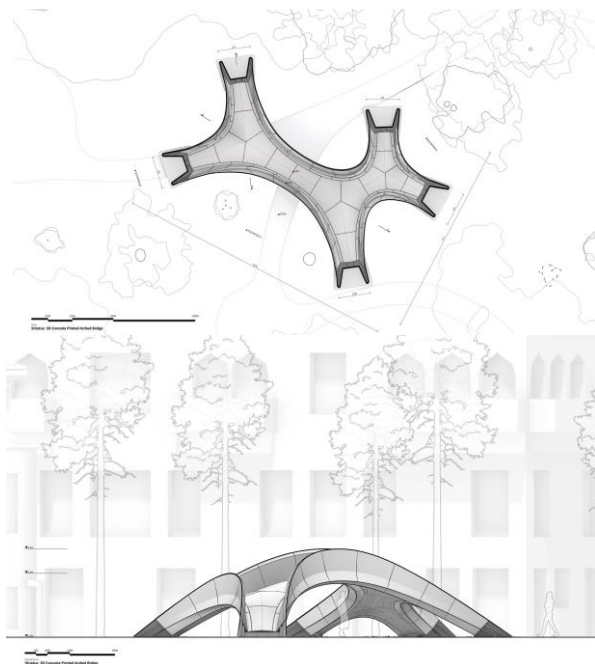
- Η αρχιτεκτονική σύλληψη του έργου είναι βασισμένη στην αίσθηση της συνεχούς ρευστότητας που παρουσιάζουν οι γλυπτικές μορφές των παγετώνων της περιοχής.
- Η μορφολογία των στεγάστρων δίνει την εντύπωση μιας δυνατής και κομψής μορφής που είναι το χαρακτηριστικό της όλης κατασκευής.

- Η σχεδίαση της μορφής των στεγάστρων έγινε μετά από μελέτη της ποσότητας του χιονιού και τις μεγάλες εντάσεις ανέμου που επικρατούν στην περιοχή.
- Τα στέγαστρα, λόγω του ότι δέχονται μεγάλο βάρος λόγω των ειδικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή, είναι κατασκευασμένα από ειδικά επεξεργασμένο γυαλί ώστε να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος.
- Η σχεδίαση του έργου χρησιμοποίησε την μέθοδο και τα εργαλεία του *Παραμετρισμού*.
- Η εφαρμογή των αρχών των ελαχίστων επιφανειών στην αρχιτεκτονική βρίσκει πεδίο εφαρμογής καθώς χρησιμοποιούνται για ελαφριές κατασκευές οροφής.
- Τα προηγμένα σχέδια της κατασκευής του έργου βρήκαν προσαρμογή στη μαζική βιομηχανική παραγωγή.
- Το συγκεκριμένο έργο παρουσιάζει ένα πλαίσιο υπολογιστικού σχεδιασμού και συναφούς πρακτικής αρχιτεκτονικής.
- Ο υπολογιστικός σχεδιασμός του έργου και η ψηφιακά ελεγχόμενη κατασκευή συγκλίνουν ώστε να μειωθούν τα προβλήματα κατασκευής.

### **3.2 Γέφυρα Striatum**

Η πεζογέφυρα *Striatum* στη Βενετία, είναι έργο του γραφείου Zaha Hadid Architects (Z.H.A) με τη συνεργασία του Ελβετικού Ομοσπονδιακού Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Ζυρίχης (ETH Zurich). Είναι η πρώτη του είδους της, που συνδυάζει παραδοσιακές αρχιτεκτονικές τεχνικές με προηγμένες τεχνολογίες υπολογιστικού σχεδιασμού, μηχανικής και ρομποτικής κατασκευής.

Η γέφυρα κατασκευάστηκε στα πλαίσια της 17<sup>ης</sup> Διεθνούς Έκθεσης Αρχιτεκτονικής (Biennale Architettura) με θέμα *Time Space Existence*, που φιλοξενήθηκε από το Ευρωπαϊκό Πολιτιστικό Κέντρο κατά τη διάρκεια της έκθεσης στη Βενετία το 2021. Τοποθετήθηκε στους κήπους Marghera, που βρίσκονται κατά μήκος του Riva dei Sette Martiri, δίπλα στην προκυμαία της Βενετίας. Πρόκειται για μία γέφυρα πεζών, τοξωτή και χωρίς ενισχυμένη τοιχοποιία, που αποτελείται από 3D-τυπωμένα κομμάτια που συναρμολογούνται χωρίς κονίαμα. Η σχεδίαση του έργου ήταν προϊόν της Ομάδας Ερευνών Block (BRG) του ελβετικού πανεπιστημίου ETH Zurich, της σχεδιαστικής ομάδας Computation and Design Group (ZHA CODE) του αρχιτεκτονικού γραφείου Z.H.A. Για την κατασκευή του έργου απαιτήθηκε η συνεργασία με ειδικούς στην τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος της εταιρείας incremental3D, καθώς και με την εταιρεία κατασκευής δομικών υλικών Holcim της Ελβετίας.



Εικόνα 3.2.1 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της γέφυρας Striatum

### 3.2.1 Σχεδιαστική προσέγγιση

Το όνομα *Striatum*, που στα λατινικά σημαίνει ράβδωση, παραπέμπει στη κατασκευαστική διαδικασία, δηλαδή τα τμήματα που αποτελούν τη γέφυρα έχουν ραβδωτή μορφή.



Εικόνα 3.2.2 Σχέδιο της ραβδωτής μορφής τμήματος της γέφυρας Striatum

Το απόφθεγμα που χρησιμοποιούν οι κατασκευαστές είναι, *Δύναμη δια μέσου της γεωμετρίας* (Z.H.A. 2021), το οποίο φανερώνει την αρχή ότι, η σταθερότητα της μορφής και η αντοχή της δομής επιτυγχάνονται μέσω της γεωμετρίας και όχι μέσω της άσκοπης συσσώρευσης υλικών κατασκευής. Αποτέλεσμα είναι η γέφυρα *Striatum* να στέκεται αποκλειστικά μέσω της συμπίεσης των κομματιών που την

αποτελούν χωρίς καμία επιπλέον ενίσχυση. Η αρχιτεκτονική σύλληψη βασίζεται στην παραδοσιακή τοιχοποιία που παρατηρείται στις κατασκευές των θολωτών κτισμάτων στην αρχαία Νουβία (περιοχή κατά μήκος του ποταμού Νείλου), καθώς και στην κατασκευή των ρωμαϊκών γεφυρών (striatusbridge.com, 2022). Οι ρωμαϊκές γέφυρες φημίζονται για τη χρήση κυκλικών αψίδων οι οποίες επιτρέπουν πολύ μεγαλύτερα ανοίγματα. Τα τόξα και οι θόλοι δεν ήταν άγνωστα στους αρχαίους ανατολίτικους λαούς (Αιγύπτιους και Ασύριους), ούτε βέβαια και στους Έλληνες οι οποίοι τα εφάρμοζαν με μεγάλη φειδώ. Τέτοιες θολωτές κατασκευές υπήρχαν στην Ελλάδα, όπως οι θολωτοί τάφοι των Μυκηνών. Τα έργα αυτά αποτελούν ένα σημαντικό κεφάλαιο της Μυκηναϊκής αρχιτεκτονικής. Ίδιας τεχνικής είναι τα λίθινα τόξα και οι στοές που συναντώνται κυρίως στις εισόδους σταδίων και θεάτρων κατά την κλασική και ελληνιστική περίοδο.



**Εικόνα 3.2.3α.** Θησαυροφυλάκια του Ραμσή του Μέγα, Λούξορ (3.500 π.Χ.)  
β. Ρωμαϊκή γέφυρα Sant'Angelo στον Τίβερη ποταμό, Ρώμη (134 μ.Χ.)

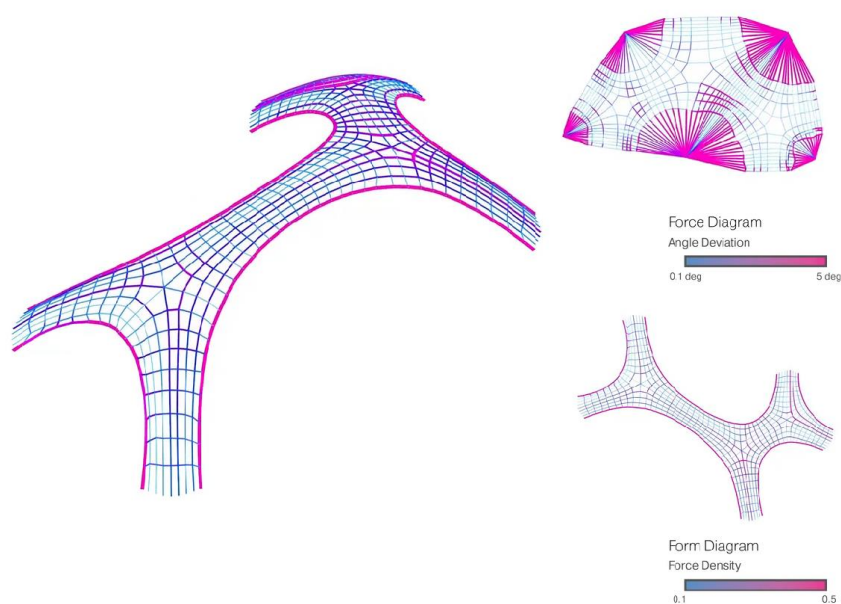


**Εικόνα 3.2.4** Θολωτός τάφος του Ατρέα, Μυκήνες (1.300 π.Χ.)

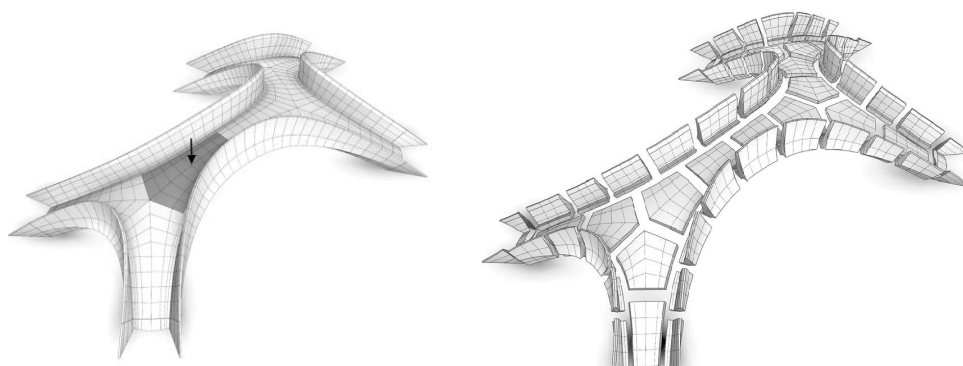
Χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες από τον υπολογιστικό σχεδιασμό και τη μηχανική έως τη ρομποτική κατασκευή, η κατασκευή της γέφυρας αναβιώνει τις παραδοσιακές τεχνικές για τη δημιουργία μιας δομής τοιχοποιίας υψηλής



τεχνολογίας. Η γέφυρα αποτελείται από μία σειρά από τσιμεντένια μέλη, τους αψιδόλιθους (θολίτες=voussoir), με σφηνοειδή γεωμετρική φόρμα που δεν είναι ενισχυμένα και τα οποία δέχονται τη δύναμη της συμπίεσης κάθετα. Η βαρύτητα και οι άλλες εξωτερικές δυνάμεις ασκούνται σε ένα τέτοιο δομικό στοιχείο (αψιδόλιθο). Οι γειτονικοί αψιδόλιθοι εμποδίζουν την πτώση μέσω λοξών θλιπτικών ωθήσεων και έτσι όλοι οι λίθοι συγκρατούνται μεταξύ τους μέσω θλίψης (Αλεξάκης Χ, 2013). Αυτή η κατασκευαστική αρχή εφαρμόστηκε και στη συγκεκριμένη γέφυρα που έχει αποκτήσει τη γνωστή τοξωτή μορφή (<https://www.zaha-hadid.com/design/striatus/>, [www.striatusbridge.com](http://www.striatusbridge.com)).



**Εικόνα 3.2.5** Διάγραμμα ασκούμενων δυνάμεων



**Εικόνα 3.2.6** Τμήματα της γέφυρας Striatum

Η γέφυρα έχει ένα διπλό καμπυλωτό κατάστρωμα με σκαλοπάτια στα σημεία εισόδου τοποθετημένα σε κάθε ένα από τα πέντε άκρα της γέφυρας και αποτελείται από 53 κομμάτια. Τα κομμάτια, τα οποία κατασκευάστηκαν από 3D-εκτυπωτή σκυροδέματος, τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπει στα φορτία της κατασκευής να κατανέμονται στα θεμέλια της γέφυρας, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη εσωτερικής βοηθητικής υποστήριξης. Οι πέντε σταθερές βάσεις της γέφυρας δέχονται το σύνολο των δυνάμεων που διατρέχουν όλη την κατασκευή ([www.striatusbridge.com](http://www.striatusbridge.com)).

Είναι γνωστό στη μηχανική ότι, η δράση των εξωτερικών δυνάμεων, που δέχεται ένα δομικό στοιχείο που συμπεριφέρεται ελαστικά, έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή εσωτερικού έργου. Το έργο αυτό αποθηκεύεται, στο παραμορφωμένο στοιχείο, ως εσωτερική ελαστική ενέργεια, που ονομάζεται και ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης. Τα τμήματα, που αποτελούν τα δομικά στοιχεία της κατασκευής, πρέπει να είναι έτσι κατασκευασμένα, ώστε η δράση των εξωτερικών δυνάμεων τις οποίες δέχονται να ελαχιστοποιούν την εσωτερική ενέργεια παραμόρφωσης. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι τα τμήματα αυτά να παρουσιάζουν την ελάχιστη παραμόρφωση ([www.striatusbridge.com](http://www.striatusbridge.com)).

Σχεδιαστικά η γέφυρα Striatus τοποθετεί υλικό μόνο όπου χρειάζεται, μειώνοντας σημαντικά το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα. Κατασκευασμένο χωρίς σπλισμό με ξηρή συναρμολόγηση και χωρίς συνδετικά, η γέφυρα Striatus μπορεί να εγκατασταθεί αλλά και να αποσυναρμολογηθεί και να μπορεί να επανασυναρμολογείται και να επανατοποθετείται επανειλημμένως σε διάφορα μέρη (<https://www.striatusbridge.com>). Το έργο καταδεικνύει πώς τα τρία γνωστά R της βιωσιμότητας, που είναι (Reduce=Μείωση, Reuse=Επαναχρησιμοποίηση, Recycle=Ανακύκλωση), μπορούν να εφαρμοστούν και σε κατασκευές από σκυρόδεμα.

**Μείωση (Reduce):** Μείωση των ενσωματωμένων εκπομπών μέσω της δομικής γεωμετρίας και της κατασκευής προσθέτων, γεγονός που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση πόρων και εξαλείφει τα κατασκευαστικά απόβλητα.

**Επαναχρησιμοποίηση (Reuse):** Βελτίωση της κυκλικότητας και της μακροζωίας. Σε αντίθεση με τις συμβατικές κατασκευές από σπλισμένο σκυρόδεμα, η γέφυρα

Striatus έχει σχεδιαστεί για να συναρμολογείται στεγνά χωρίς συνδετικό υλικό επιτρέποντας την αποσυναρμολόγηση και επαναχρησιμοποίηση σε άλλες τοποθεσίες.

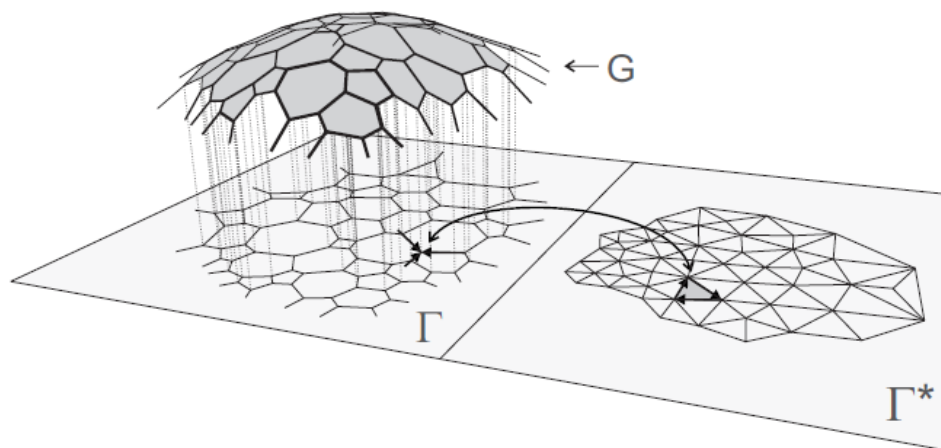
Ανακύκλωση (Recycle): Όλα τα κομμάτια της κατασκευής μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν. Η διαδικασία ανακύκλωσης είναι απλή, οικονομικά αποδοτική και με μειωμένη κατανάλωση, καθώς δεν απαιτείται διαλογή υλικών, λόγω της απουσίας σπλισμών ή άλλων συνδετικών υλικών.



Εικόνα 3.2.7 Πρωτότυπη κατασκευή ΕΤΗ Ζυρίχης, Ελβετία

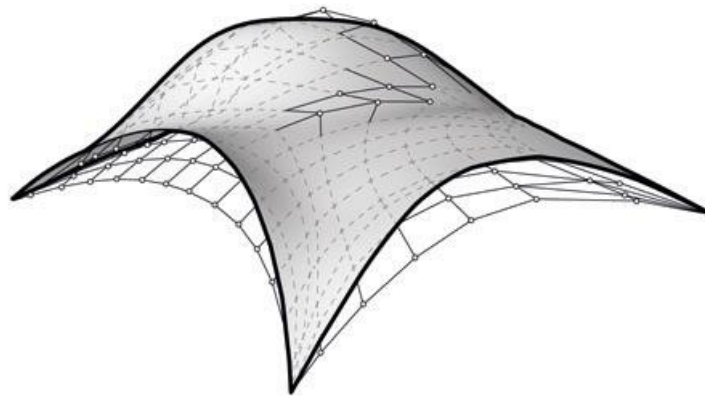
### 3.2.2 Ελάχιστες επιφάνειες της κατασκευής

Οι υπολογισμοί των ελαχίστων επιφανειών έχουν βασισθεί στη μέθοδο Ανάλυσης Δικτύου Ώθησης (TNA, *Thrust Network Analysis*), την οποία ανέπτυξε ο καθηγητής Philippe Block του πανεπιστημίου ΕΤΗ της Ζυρίχης (Block P., 2007). Αυτή η νέα μεθοδολογία βασίζεται στη δημιουργία μόνο συμπίεσης σε θολωτές επιφάνειες και δίκτυα. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι εφαρμόσιμη για την ανάλυση θολωτών κατασκευών ιδίως σε μη σπλισμένη τοιχοποιία. Σύμφωνα με τα μέθοδο αυτή μια οποιαδήποτε κατασκευή μπορεί να παρασταθεί ως ένα τρισδιάστατο δικτύωμα, στο οποίο οι εξωτερικές δυνάμεις εφαρμόζονται στις κορυφές, και οι σύνδεσμοι μεταφέρουν τα φορτία στην βάση.



**Εικόνα 3.2.8** Σχέση μεταξύ του σχήματος ισορροπίας συμπίεσης, του δικτύου ώθησης (G), της επίπεδης προβολής του (πρωτεύον πλέγμα Γ) και το αμοιβαίο διάγραμμα (διπλό πλέγμα Γ\*)

Η μέθοδος TNA χρησιμοποιείται ως μια ισχυρή διαδραστική μέθοδος για τον σχεδιασμό θολωτών κατασκευών. Δηλαδή με τη μέθοδο αυτή η οποιαδήποτε μεταβολή βρίσκει τις πιθανές λύσεις ισορροπίας υπό βαρυτική φόρτιση για ένα καθορισμένο περίβλημα. Τροποποιώντας σταδιακά αυτά τα διαγράμματα δύναμης σε πραγματικό χρόνο, ο σχεδιαστής είναι σε θέση να εξερευνήσει νέες και εκφραστικές γεωμετρίες που δίνουν διαφορετικές μορφές θόλων και να καταλήξει στο καλύτερο αποτέλεσμα (Rippmann M. et al., 2014). Η μέθοδος της υπολογιστικής ανάλυσης ισορροπίας που έχει αναπτυχθεί, επιτρέπει να δημιουργούνται δομές θολωτών κατασκευών που βασίζονται μόνο στη συμπίεση. Η μέθοδος TNA αναζητεί όλες τις παραμέτρους, ελέγχει όλους τους βαθμούς ελευθερίας, ώστε να βρει την καλύτερη εφαρμογή των δυνάμεων συμπίεσης σε μια δεδομένη επιφάνεια στόχο (Van Mele, T. et al., 2014). Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό τέτοιων προβλημάτων είναι RhinoVAULT στο Rhinoceros®, που η εφαρμογή του βελτιστοποιεί την ελεύθερη μορφή ( Rippmann M. et al., 2012).

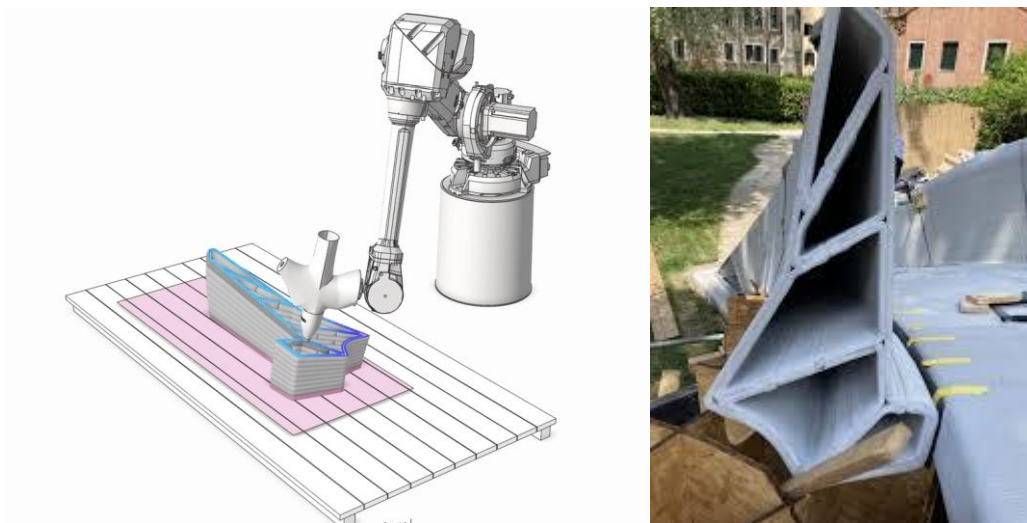


**Εικόνα 3.2.9** Η μέθοδος TNA δίνει αποτελέσματα πιο κοντά στην επιφάνεια που επιθυμούμε (Van Mele, T. et al., 2014)

Τα τμήματα της γέφυρας είναι υπολογισμένα με τη μέθοδο Ανάλυση Δικτύου Ώθησης (TNA, Thrust Network Analysis) για μη ενισχυμένους θόλους τοιχοποιίας (Block P. & Lachauer L., 2014). Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε και στην πρωτότυπη κατασκευή ενός ελεύθερου σχήματος μη ενισχυμένου θόλου από πλακάκια, που κατασκευάστηκε το 2011 στο ETH Ζυρίχης, Ελβετία (Davis, L. et al.2012). Η ελάχιστη επιφάνεια σε αυτή την κατασκευή έχει το μέγεθος ενός τούβλου (Ripprmann, M. et al., 2012).

### 3.2.3 Κατασκευαστική προσέγγιση

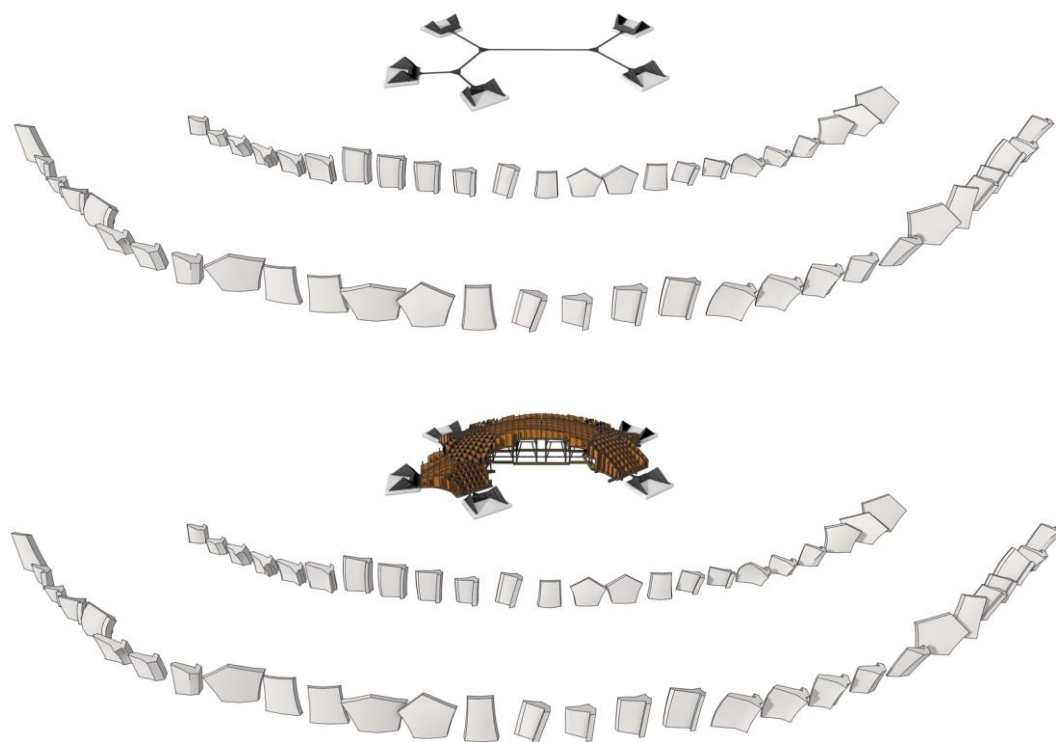
Η κατασκευή της γέφυρας αποτελείται από 53 κοίλα κομμάτια που το καθένα αποτελείται από 500 στρώσεις σκυροδέματος.



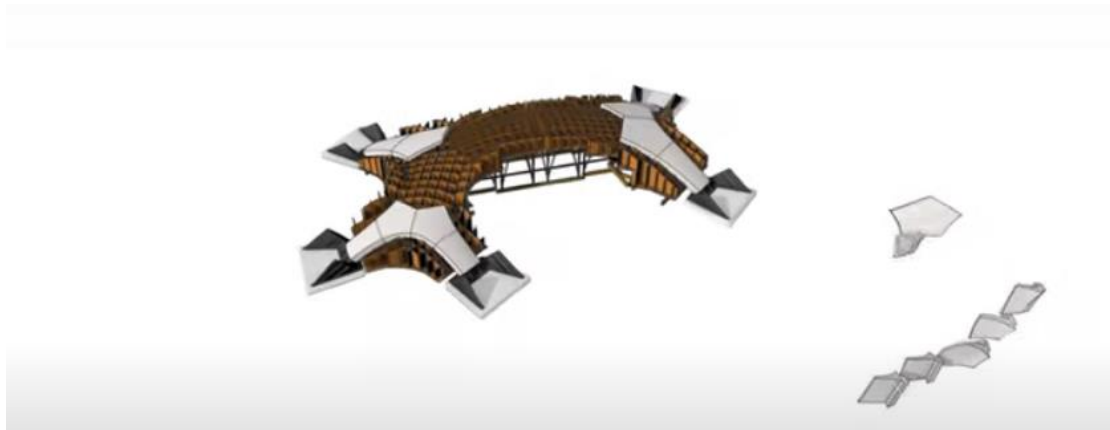
**Εικόνα 3.2.10** α. 3D-εκτυπωτής σκυροδέματος β. Εκτυπωμένο κοίλο κομμάτι

Η κεφαλή εκτύπωσης γίνεται μέσω ενός ρομποτικού βραχίονα πολλαπλών αξόνων για την ακριβή εκτύπωση μη ομοιόμορφων και μη παράλληλων στρωμάτων. Τα τυπωμένα στρώματα σχηματίζουν μια ραβδωτή υφή. Αυτή η νέα γενιά τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος, σε συνδυασμό με το σχέδιο τοξωτής τοιχοποιίας, επιτρέπει στα τμήματα που προκύπτουν να χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία χωρίς ενίσχυση ή προένταση, δηλαδή επιπλέον ενίσχυση του σκυροδέματος μετά από τη σκλήρυνση.

Η κατασκευή της γέφυρας ξεκίνησε από τις πέντε βάσεις έδρασης που αποτελούν τα θεμέλια και ακολούθως κατασκευάστηκε με ακρίβεια ο ξυλότυπος για να είναι έτοιμος να δεχθεί τα κομμάτια του έτοιμου σκυροδέματος.



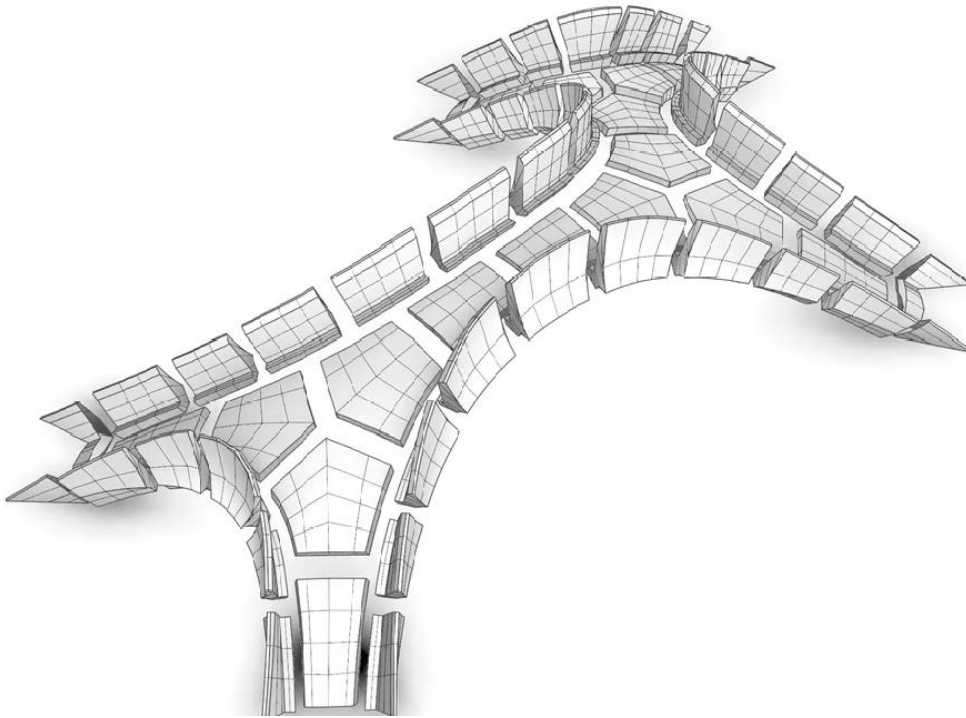
Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα



**Εικόνα 3.2.11** Στάδια κατασκευής της γέφυρας Striatum



**Εικόνα 3.2.12** Στάδια κατασκευής της γέφυρας Striatum



**Εικόνα 3.2.13** Τμήματα με τις ελάχιστες επιφάνειες της γέφυρας Striatum

Η κατασκευή είναι μια μη ενισχυμένη τοξωτή γέφυρα που χρησιμοποιεί συμπύεση και βαρύτητα για να διατηρήσει τη μορφή της. Οι μελετητές τοποθέτησαν τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα στοιχεία σε σχήμα σφήνας (αψιδόλιθους, γνωστά και ως voussoirs), με τρόπο που επιτρέπει στο φορτίο της κατασκευής να κατανέμεται στα θεμέλιά του χωρίς την ανάγκη εσωτερικής βοηθητικής υποστήριξης, όπως καλώδια μετά την τάση. Η ξηρά συναρμολογημένη κατασκευή είναι σταθερή μόνο λόγω της γεωμετρίας της ([www.striatusbridge.com](http://www.striatusbridge.com)).

Η γέφυρα έχει μέγιστο μήκος 15,10m, μέγιστο ύψος 3,5m, ο συνολικός χώρος έχει έκταση 216m<sup>2</sup> και η επιφάνεια που καλύπτει η γέφυρα είναι 50m<sup>2</sup>. Η συνολική μάζα των 53 μπλοκ είναι 24,5 τόνοι και οι τέσσερις βάσεις που δέχονται όλες τις τάσεις έχουν μάζα 5.2 τόνους. Ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε για την εκτύπωση των όλων των κομματιών ήταν 84 ώρες, σε αυτή τη διάρκεια συμπεριλαμβάνεται και ο χρόνος για τις απαραίτητες διαδικασίες πριν και μετά την εκτύπωση. Το καθένα από τα 53 μπλοκ, που αποτελείται από 500 στρώσεις τσιμέντου, χρειάζεται από μία έως δύο ώρες για να παραχθεί. Η κατασκευή της γέφυρας, συμπεριλαμβανομένης της θεμελίωσης, της συναρμολόγησης και της εγκατάστασης σκαλοπατιών και καταστρώματος, διήρκεσε 35 ημέρες.





**Εικόνα 3.2.14** Στάδια κατασκευής της γέφυρας StriatuS

Η γέφυρα έχει ένα διπλό καμπυλωτό κατάστρωμα με σκαλοπάτια στα σημεία εισόδου τοποθετημένα σε κάθε άκρο της γέφυρας, οδηγώντας τη δομή από τα θεμέλιά της. Σύμφωνα με τους Shajay Bhooshan (συνιδρυτή της ZHACODE) και Philippe Block (καθηγητή ETH Zurich), η πρόθεση μας ήταν να ανταποκριθούμε στις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η βιομηχανία της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και των κατασκευών επιδεικνύοντας έναν υπεύθυνο τρόπο σχεδίασης με ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα και ανθεκτικά υλικά - το σκυρόδεμα. Για να το κάνουμε αυτό, αντλούμε πληροφορίες από τη σοφία των αρχαίων στην κατασκευή τοιχοποιίας και την ενισχύουμε με σύγχρονα υπολογιστικά μέσα ([www.striatusbridge.com](http://www.striatusbridge.com)).

Κατά τη συναρμολόγηση δεν χρησιμοποιήθηκαν κόλλα ή οποιοδήποτε άλλο συνδετικό υλικό για τη σύνδεση των μπλοκ, αντίθετα τοποθετήθηκαν επιθέματα νεοπρενίου μεταξύ καθενός από τα τυπωμένα μπλοκ, για τον έλεγχο των επιπέδων τριβής και συγκέντρωσης τάσεων. Στη γέφυρα προστέθηκαν εξωτερικοί δεσμοί για να απορροφηθεί η τάση ώθησης. Αυτό που είναι εντελώς νέο είναι ο τύπος τρισδιάστατου εκτυπωμένου σκυροδέματος, που ανέπτυξαν οι ερευνητές μαζί με την εταιρεία incremental3d. Το σκυρόδεμα δεν εφαρμόζεται οριζόντια με τον συνήθη τρόπο, αλλά σε συγκεκριμένες γωνίες έτσι ώστε να είναι ορθογώνιες ως προς τη ροή των θλιπτικών δυνάμεων. Αυτό διατηρεί τα τυπωμένα στρώματα στα

μπλοκ καλά συμπίεσμένα μεταξύ τους, χωρίς να απαιτείται ενίσχυση ή προένταση ([www.striatusbridge.com](http://www.striatusbridge.com), <https://archello.com/fr/project/striatus>).

Το ειδικό υλικό του σκυροδέματος, που χρησιμοποιήθηκε από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή, αναπτύχθηκε από την εταιρεία Holcim ακριβώς για αυτόν τον σκοπό. Σε σύγκριση με τις τυπικές επίπεδες πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα, αυτό το νέο σύστημα δαπέδου χρησιμοποιεί μόνο το 30% του όγκου του σκυροδέματος και μόλις το 10% της ποσότητας χάλυβα. Οι πολύ χαμηλές τάσεις εντός της κατασκευής του τόξου της γέφυρας επιτρέπουν επίσης τη χρήση σκυροδέματος χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα που ενσωματώνει υψηλά ποσοστά ανακυκλωμένων οικοδομικών απορριμμάτων. Προκατασκευασμένο και ξηρά συναρμολογημένο, και επομένως πλήρως αποσυναρμολογούμενο και επαναχρησιμοποιήσιμο, αυτό το χρησιμοποιούμενο υλικό κατασκευής είναι εύκολα και καθαρά ανακυκλώσιμο. Στο τέλος προστέθηκαν οι κλίμακες και το κατάστρωμα της γέφυρας από ξύλινο υλικό. Επειδή οι δυνάμεις μεταφέρονται μόνο μέσω συμπίεσης με τρόπο πολύ φυσικό στο σκυρόδεμα και με πολύ χαμηλές τάσεις, η όλη κατασκευή είναι δυνατόν να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως τα ιστορικά έργα.



**Εικόνα 3.2.15** Τελική μορφή της γέφυρας Striatus

### **3.2.4 Συμπεράσματα**

Τα επιμέρους συμπεράσματα από την κατασκευή της πεζογέφυρας Striatus συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η γέφυρα αυτή είναι η πρώτη του είδους της, που συνδυάζει παραδοσιακές τεχνικές της αρχιτεκτονικής με προηγμένες τεχνολογίες υπολογιστικού σχεδιασμού, μηχανικής και ρομποτικής κατασκευής.
- Η κατασκευή αυτή αποτελεί ένα σύγχρονο σχεδιαστικό παράδειγμα που δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης όσο το δυνατόν λιγότερων υλικών.
- Τα δομικά τμήματα από σκυρόδεμα, που κατασκευάζονται με τη χρησιμοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, απαιτούν σημαντικά λιγότερο υλικό και χωρίς χαλύβδινο οπλισμό.
- Η ακριβής κατασκευή των μπλοκ επιτράπηκε χάρη στην καλά καθορισμένη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των διαφόρων εργαλείων λογισμικού που εμπλέκονται στη διαδικασία.
- Η διαδικασία παραγωγής του σκυροδέματος επιτρέπει την κατασκευή δομικών τμημάτων με ακριβή άρθρωση μεταξύ τους.
- Η ύπαρξη ενός ανοιχτού υπολογιστικού πλαισίου μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής έδωσε τη δυνατότητα ανάπτυξης υπολογιστικών εργαλείων μέσω της χρήσης του COMPAS.
- Η συλλογή ενός συνόλου εργαλείων (BIM, CAD) διευκολύνει την παράδοση του έργου από το αρχικό στάδιο του σχεδιασμού έως την κατασκευή.
- Το έργο ενσωματώνει τα τρία R της βιωσιμότητας (Reduce=Μείωση, Reuse=Επαναχρησιμοποίηση, Recycle= Ανακύκλωση).
- Η εισαγωγή των νέων σχεδιαστικών και κατασκευαστικών αρχών, που εφαρμόστηκαν στην κατασκευή της γέφυρας Striatus, μπορούν να αποτελέσουν πρόκληση για τον κατασκευαστικό κλάδο ώστε να μεταμορφωθεί ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζεται και κατασκευάζεται το δομημένο περιβάλλον μας για να αντιμετωπίσουμε τις καθοριστικές προκλήσεις της εποχής μας.

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

- Η όλη κατασκευή ενσωματώνει τον σχεδιασμό, την μηχανική, τη σύνθεση και την κατασκευή σε ένα αρμονικό και λειτουργικό σύνολο.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπεράσματα που μπορούν να προκύψουν από τη μελέτη της κατασκευής των δύο έργων της ΖΗ συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η αρχιτεκτονική μελέτη και το αποτέλεσμα αυτής είναι προϊόν των δυνατοτήτων μιας συγκεκριμένης περιόδου.
- Τα σύγχρονα αρχιτεκτονικά έργα μπορούν να ενσωματώσουν και να δίνουν έκφραση σε παραδοσιακές τεχνικές.
- Η αρχιτεκτονική δημιουργία πρέπει να λαμβάνει υπόψη της το φυσικό περιβάλλον και τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή.
- Η ελάχιστες επιφάνειες ενός έργου αποτελούν τη θεμελιώδη μονάδα μελέτης πάνω στην οποία δομείται το όλο έργο.
- Η ελάχιστη επιφάνεια αποτελεί μέρος της συνολικής κατασκευής.
- Η μελέτη ενός έργου πρέπει να περιλαμβάνει στη συστηματική μελέτη των ελαχίστων επιφανειών,.
- Η κάθε συγκεκριμένη επιφάνεια πρέπει να μελετιέται διεξοδικά για τα σύνολα των φορτίων που δέχεται, ώστε να αποκτήσει τη μορφή που ταιριάζει καλύτερα στο συγκεκριμένο έργο.
- Η χρήση των υπολογιστικών εργαλείων θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή ώστε να υπάρχουν και τα κατάλληλα αποτελέσματα.
- Το καταλληλότερο σχήμα μιας κατασκευής έχει ως αποτέλεσμα, δεδομένων των φορτίων που ασκούνται σε αυτό, στη μείωση του κατασκευαστικού υλικού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.
- Η βελτιστοποίηση των διαδρομών των φορτίων μιας κατασκευής επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου υλικού.
- Η μελέτη και κατασκευή των σύγχρονων έργων θα πρέπει να οδηγείται προς την κατεύθυνση της βιώσιμης ανάπτυξης.
- Η διαχρονική αξία των έργων εξαρτάται όχι μόνο από τις πρωτοποριακές μορφές τους αλλά και από τη δυνατότητα συντήρησής τους.

- **Οι δυνατότητες που παρέχεται από τη σύγχρονη τεχνολογική ανάπτυξη για την υλοποίηση ενός έργου, από το στάδιο της σχεδίασης μέχρι και το τελικό στάδιο, θα πρέπει να αποσκοπεί και στην ψυχική κατάσταση του ανθρώπου και γενικότερα του κοινωνικού συνόλου που απολαμβάνουν το έργο αυτό.**
- **Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα.**

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

Αλεξάκης Χ. (2013). Ανάλυση οριακής κατάστασης και σεισμικής επάρκειας λίθινων αψίδων. (Διδακτορική Διατριβή). Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Ανακτήθηκε από: <http://docplayer.gr/3207556-Analysi-oriakis-katastasis-kai-seismikis-eparkeias-lithinon-apsidon.html>

Βαρελίδης Γ., Θεοδωρακάκου - Βαρελίδου Π. Πόπη. (2009). *Αρχιτεκτονικός Σχεδιασμός*. Εκδόσεις: Βαρελίδη. Αθήνα.

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. (2007). *Μαθήματα Μορφολογίας*. Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών. Έκδοση Πανεπιστημίου. Ξάνθη. Ανακτήθηκε από: [http://morfologia.arch.duth.gr/1o\\_etos/pdf/tetragonikes.pdf](http://morfologia.arch.duth.gr/1o_etos/pdf/tetragonikes.pdf)

Κουρνιατή Α., Μ., Κουρνιατής Ν., (2014). *Γεωμετρικές Απεικονίσεις του Χώρου II: Γεωμετρικές Απεικονίσεις και Πληροφορική*. Ανακτήθηκε από: <https://ocw.aoc.ntua.gr/courses/ARCH105/>

Μάγγας, Π., (2021). Αρχές Θεωρίας Επιφανειών-Είδη Επιφανειών. Ανακτήθηκε από: <https://docplayer.gr/210957544-Arhes-theorias-epifaneion-eidi-epifaneion.html>

Συμεωνίδου, Ι. (2011). Σύγχρονη αρχιτεκτονική τεχνολογία: Ψηφιακός σχεδιασμός και ψηφιακή κατασκευή, νέα μέσα και προοπτικές. Ανακτήθηκε από: <https://www.researchgate.net/publication/330479504>

Φιοράκης, Κ., Γιαννούδης, Σ., (2016). *Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση*. Ανακτήθηκε από: [https://www.arch.tuc.gr/fileadmin/users\\_data/arch\\_tpl/ereynitikes/year15\\_16/fiorakis.pdf](https://www.arch.tuc.gr/fileadmin/users_data/arch_tpl/ereynitikes/year15_16/fiorakis.pdf)

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Abdalwahid A. A., (2013). *Zaha Hadid Form Making Strategies for Design*. (Msc. Thesis). Ανακτήθηκε από: <https://www.researchgate.net/publication>

AbdUllah, A., Bin Said, I., Ossen, D. (2013). Zaha Hadid's Techniques of Architectural Form-Making. *Open Journal of Architectural Design* 1(1):1-9. Ανακτήθηκε από: <https://www.researchgate.net/publication>

Aish R. & Woodbury R., (2005). Multi-level Interaction in Parametric Design. In *Lecture Notes in Computer Science* 3638:151-162. DOI:10.1007/11536482\_13

Block P., Lachauer, L. (2014). Three-dimensional funicular analysis of masonry vaults. *Mechanics Research Communications Volume* 56(1): 53-60. Ανακτήθηκε από: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0093641313002012>

Bollinger K., Grochman M., Tessman O. (2011), In Moritz Hauschild, Rüdiger Karzel *Digital Processes: Planning, Designing, Production* pp 82-86.

Castañeda E., Lauret B., Lirola J.M. and Ovando G. (2015). Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price. *Journal of Facade Design and Engineering* 3 (2015) 1–13. DOI 10.3233/FDE-150031. Ανακτήθηκε από:

[https://www.researchgate.net/publication/277476177\\_Free-form\\_architectural\\_envelopes\\_Digital\\_processes\\_opportunities\\_of\\_industrial\\_production\\_at\\_a\\_reasonable\\_price](https://www.researchgate.net/publication/277476177_Free-form_architectural_envelopes_Digital_processes_opportunities_of_industrial_production_at_a_reasonable_price)

Ceccato, C. (2012). Material Articulation: Computing and Constructing Continuous Differentiation. *Architectural Design* 82(2):96-103. Ανακτήθηκε από: <https://www.researchgate.net/publication> DOI:10.1002/ad.1385

Chengcheng Tang, Martin Kilian, Pengbo Bo, Johannes Wallner, and Helmut Pottmann, (2016). Analysis and Design of Curved Support Structures. In *Advances in Architectural Geometry*. Sigrid Adriaenssens, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Achim Menges, and Mark Pauly Edit.8-22pp

Davis, L., Rippmann, M., Pawlofsky, T., Block, P., (2012). Innovative funicular tile vault-ing: a prototype in Switzerland. *The Structural Engineer* 90, 46–56.

Emmer M. (2013). Minimal Surfaces and Architecture: New Forms. *Nexus Network Journal* 15(2):227–239. Ανακτήθηκε από: <https://www.academia.edu/>



Filz G.H., (2011). *Soft Spaces: Analog and digital approaches to membrane architecture on the example of corner solutions*. Ανακτήθηκε από:  
<https://www.researchgate.net/publication>

Filz G. H., (2013), Minimal-Surface-T-Connections in Architecture. In *Structures and Architecture*: 1350-1357. CRC Press. Ανακτήθηκε από:  
<https://www.researchgate.net/publication> DOI:10.1201/b15267-187

Filz G.H., Anza D', G. (2019). *Soft Spaces: Hybrid systems from structural membranes and conventional building technologies*. In Proceedings of the TensiNet Symposium 2019 Softening the habitats 3-5 June 2019, Politecnico di Milano, Milan, Italy.

Johnson P. & Wigley M. (1988). *Deconstructivist Architecture*. The Museum of Modern Art (MoMA). New York: Little Brown.

Le Corbusier. (1987). *The City of Tomorrow and the Planning*. New York: Dover Publications.

Ljubica, S., Velimirović, L., Radivojević, G., Stanković, M., Kostić D., (2008). Minimal surfaces for Architectural Constructions. *Architecture and Civil Engineering* 6(1):89-96. Ανακτήθηκε από: <https://www.researchgate.net/publication>  
DOI:10.2298/FUACE0801089V

Mele Van T., Panozzo D., Sorkine-Hornung O. and Block P. (2014). Best-fit thrust network analysis (TNA): rationalization of freeform meshes, In S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal & Ch. Williams (Ed.) *Shell Structures for Architecture - Form Finding and Optimization*: 157-171. London: Routledge. Ανακτήθηκε από:  
[https://block.arch.ethz.ch/brg/files/2014\\_Shell-Structures-for-Architecture\\_Chapter-13\\_Best-fitting-thrust-network-analysis\\_1508057996.pdf](https://block.arch.ethz.ch/brg/files/2014_Shell-Structures-for-Architecture_Chapter-13_Best-fitting-thrust-network-analysis_1508057996.pdf)

Rippmann M., Lachauer L., Block P. (2012). Interactive Vault Design. *International Journal of Space Structure* 27(4): 210-230. Ανακτήθηκε από:  
[https://www.researchgate.net/publication/271837719\\_Interactive\\_Vault\\_Design/link/54eb5d3e0cf2a0305193d206/download](https://www.researchgate.net/publication/271837719_Interactive_Vault_Design/link/54eb5d3e0cf2a0305193d206/download)

Schumacher, P., (2005). *Digital design and construction of organic form*. In: Research Symposium 2005: Design as Research, United Kingdom, 1–15.

Schumacher, P. (2008), Parametricism as Style-Parametricist Manifesto. Presented and discussed at the Dark Side Club, 11th Architecture Biennale, Venice 2008. London.

Schumacher, P. (2010). The Parametricist Epoch: Let the Style Wars Begin. *The Architects' Journal*, 231(16). Ανακτήθηκε από: [https://www.patrikschumacher.com/Texts/The%20Parametricist%20Epoch Lets%20the%20Style%20Wars%20Begin.htm](https://www.patrikschumacher.com/Texts/The%20Parametricist%20Epoch%20Lets%20the%20Style%20Wars%20Begin.htm)

Sebastian S., Ravishankar K.R., Samir al Qeisi, (2018). Design approach of Zaha Hadid form vocabularies and design techniques. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (www.jetir.org)*, 5(6): 495-503. Ανακτήθηκε από: <https://www.jetir.org/view?paper=JETIRC006088>

Spring, M. (2007). Innsbruck cable car stations: Zaha Hadid lifts the spirits. *Building*, Ανακτήθηκε από: <https://www.building.co.uk/focus/innsbruck-cable-car-stations-zaha-hadid-lifts-the-spirits/3100491.article>.

Tang, C., Kilian, M., Bo P., Wallner, J., and Pottmann, H. (2016). Analysis and Design of Curved Support Structures. In Adriaenssens S., Gramazio F., Kohler M., Menges A., & Pauly M. (Edit.) *Advances in Architectural Geometry*. (pp 8-22). Ανακτήθηκε από: <http://www.geometrie.tugraz.at/wallner/streifen.pdf>

Techen H., Hofmann, A. (2008). New approach of bended glass panels at the Nordkettenbahn in Innsburg: 127-134. In Bos, Louter, Veer (Eds). *Challenging Glass: Conference on Architectural and Structural Applications of glass*.

Winchester H. (2022). Zaha Hadid Architects on the tech behind its iconic designs. In <https://www.chaos.com/blog/zaha-hadid-architects-on-the-tech-behind-its-iconic-designs>

Zaha Hadid. (2014). *Zaha Hadid RA on the influence of Malevich in her work. Plane sailing*. From the Summer 2014 issue of RA Magazine, issued quarterly to Friends of the RA. <https://www.royalacademy.org.uk/article/zaha-hadid-ra-on-the-influence-of>

ZAHA HADID ARCHITECTS, (2017). *Fluid, kinetic, parametric: the architectural world of Zaha Hadid*. In *Conservation and Creation* 1(17): 1-40. Ανακτήθηκε από: <https://epaper.keim.com/keim-edition-no1-zaha-hadid-architects/63141356>

ZAHA HADID ARCHITECTS, (2018). *Design as Second nature*. The University Museum of Contemporary Art (MUAC). Mexico. Published on occasion of the exhibition Zaha Hadid Architects: Design as Second Nature (October 20, 2018 to March 3, 2019).

Zukowsky J. (2019). *Zaha Hadid - Biography, Buildings, & Facts*. Encyclopedia Britannica. Ανακτήθηκε από: <https://www.britannica.com/biography/Zaha-Hadid/media/1/914179/15938>.)

### Διαδικτυακές Πηγές

<https://www.britannica.com/biography/Zaha-Hadid>

<https://www.saoarchitects.com/life-journey-of-a-british-iraqi-architect-zaha-hadid>

<https://www.theartstory.org/artist/hadid-zaha/life-and-legacy/>

<https://www.theartstory.org/artist/hadid-zaha/artworks/>

<https://el.decor-modern.com/7478889-deconstructivism-in-architecture-definition-and-known-representatives>

<https://www.arup.com/projects/london-2012-aquatics-centre>

[http://morfologia.arch.duth.gr/1o\\_etos/pdf/tetragonikes.pdf](http://morfologia.arch.duth.gr/1o_etos/pdf/tetragonikes.pdf)

<https://www.e-architect.com/austria/nordpark-zaha-hadid>

[https://www-building-co-uk.translate.google/focus/innsbruck-cable-car-stations-zaha-hadid-lifts-the-spirits/3100491.article?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=el&\\_x\\_tr\\_hl=el&\\_x\\_tr\\_pto=nui,op,sc](https://www-building-co-uk.translate.google/focus/innsbruck-cable-car-stations-zaha-hadid-lifts-the-spirits/3100491.article?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=el&_x_tr_hl=el&_x_tr_pto=nui,op,sc)

<https://www.zaha-hadid.com/architecture/nordpark-railway-stations/>

<https://www.zaha-hadid.com/design/striatus/>

[www.striatusbridge.com](http://www.striatusbridge.com)

*Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα*

[http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html#\\_edn13](http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html#_edn13)

<https://archello.com/fr/project/striatus>

<https://www.architectsjournal.co.uk/practice/culture/patrik-schumacher-on-parametricism-let-the-style-wars-begin>

## **6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

### **ΕΙΚΟΝΕΣ**

**Εικόνα 1.1** The Peak Leisure Club Hong-Kong (Image: Zaha Hadid Architects)

**Εικόνα 1.2** Πυροσβεστικός Σταθμός, Βάιλ αμ Ράιν, Γερμανία

**Εικόνα 1.3** Σχέδιο του Κέντρου Σύγχρονης Τέχνης Lois & Richard Rosenthal

**Εικόνα 1.4** Lois & Richard Rosenthal Center for Contemporary Art, Σινσινάτι Οχάϊο

**Εικόνα 1.5** MAXXI Museum of Contemporary Art and Architecture, Ρώμη

**Εικόνα 1.6** MAXXI: National Museum of XXI Century Arts, Ρώμη (από αέρα)

**Εικόνα 1.7** Πολιτιστικό Κέντρο Heydar Aliyev Center, Μπακού

**Εικόνα 1.8** Aquatic Center Λονδίνο

**Εικόνα 1.9** Polytechnic University, Χονγκ Κονγκ

**Εικόνα 1.10** Στάδιο Al Wakrah, Κατάρ

**Εικόνα 1.11** Πίνακας Kazimir Malevich Black square (1915)

**Εικόνα 1.12** Πίνακας Kazimir Malevich Airplane flying (1915)

**Εικόνα 1.13** Πτυχιακή εργασία Z.H. Malevich's Tektonik (1977)

**Εικόνα 1.14** Πίνακας Kazimir Malevich New fields of Architecture

**Εικόνα 1.15** Πίνακας Z.H. The power of experimentation (1988)

**Εικόνα 1.16** Σιδηροδρομικός Σταθμός Hungerburg Ίνσμπουργκ

**Εικόνα 2.1** Σχηματισμός επιφανειών

**Εικόνα 2.2** Σχηματισμός ελαχίστων επιφανειών από ανάπτυξη κύκλου

**Εικόνα 2.3** Δημιουργία ελαχίστων επιφανειών σε μεμβράνη σαπουνιού

**Εικόνα 2.4** Δημιουργία σφαιρικού τετράεδρου

**Εικόνα 2.5** Τα διαφορετικά χρώματα δηλώνουν διαφορετικά πάχη τοιχωμάτων

**Εικόνα 2.6** Ολυμπιακό Στάδιο Μονάχου

**Εικόνα 2.7** Γέφυρα του ποταμού Basento, Ποτένζα, Ιταλία

**Εικόνα 2.8** Μία απλή επιφάνεια

**Εικόνα 2.8.α** Ελάχιστες επιφάνειες μεταξύ ευθείας και κύκλου

**Εικόνα 2.8.β** Ελάχιστες επιφάνειες μεταξύ κύκλων

**Εικόνα 2.8.γ** Ελάχιστες επιφάνειες από ελλειψοειδή περιστροφή

**Εικόνα 2.8.δ** Ελάχιστες επιφάνειες κυκλικών δακτυλίων

**Εικόνα 2.9** Ελάχιστες επιφάνειες μέσω του προγράμματος Mathematica

**Εικόνα 2.10** Επιφάνειες Costa-Hoffman-Meeks

**Εικόνα 3.1.1** Χάρτης της περιοχής του Innsbruck

**Εικόνα 3.1.2** Σχεδιάγραμμα της πόλης του Innsbruck

**Εικόνα 3.1.3** Τα στέγαστρα των σταθμών σε σχέση με το υψόμετρο

**Εικόνα 3.1.4** Σχέδιο του στεγάστρου του σταθμού Congress

**Εικόνα 3.1.5** Φωτογραφία του σταθμού Congress

**Σχέδιο 3.1.6** Σχέδιο του στεγάστρου του σταθμού Löwenhouse

**Εικόνα 3.1.7** Φωτογραφία του σταθμού Löwenhouse

**Σχέδιο 3.1.8** Σχέδιο του στεγάστρου του σταθμού Alpenzoo

**Εικόνα 3.1.9** Φωτογραφία του σταθμού Alpenzoo

**Σχέδιο 3.1.10** Σχέδιο του στεγάστρου του σταθμού Hungerbourg

**Εικόνα 3.1.11** Φωτογραφία του σταθμού Hungerbourg

**Εικόνα 3.1.12** Ποικιλομορφία επιφανειών που δημιουργείται σε ένα τετρασθενές

**Εικόνα 3.1.13** Οι διάφορες μορφές των ελαχίστων επιφανειών και το πλέγμα εφαρμογής τους δίκτυο αλλάζοντας τον συσχετισμό των δυνάμεων

**Εικόνα 3.1.14** Το σχέδιο του σκελετού της φέρουσας κατασκευής

**Εικόνα 3.1.15** Κατασκευή του χαλύβδινου σκελετού

**Εικόνα 3.1.16** Κατασκευή του χαλύβδινου σκελετού με τις λωρίδες πολυαιθυλενίου

**Εικόνα 3.2.1** Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της γέφυρας Striatas

**Εικόνα 3.2.2** Σχέδιο της ραβδωτής μορφής τμήματος της γέφυρας Striatus

**Εικόνα 3.2.3α.** Θησαυροφυλάκια του Ραμσή του Μέγα, Λούξορ (3.500 π.Χ.)

β. Ρωμαϊκή γέφυρα Sant'Angelo στον Τίβερη ποταμό, Ρώμη (134 μ.Χ.)

**Εικόνα 3.2.4** Θολωτός τάφος του Ατρέα, Μυκήνες (1.300 π.Χ.)

**Εικόνα 3.2.5** Διάγραμμα ασκούμενων δυνάμεων

**Εικόνα 3.2.6** Τμήματα της γέφυρας Striatus

**Εικόνα 3.2.7** Πρωτότυπη κατασκευή ETH Ζυρίχης, Ελβετία

**Εικόνα 3.2.8** Σχέση μεταξύ του σχήματος ισορροπίας συμπίεσης, του δικτύου ώθησης (G), της επίπεδης προβολής του (πρωτεύον πλέγμα Γ) και το αμοιβαίο διάγραμμα (διπλό πλέγμα Γ\*)

**Εικόνα 3.2.9** Η μέθοδος TNA δίνει αποτελέσματα πιο κοντά στην επιφάνεια που επιθυμούμε

**Εικόνα 3.2.10 α.** 3D-εκτυπωτής σκυροδέματος β. Εκτυπωμένο κοίλο κομμάτι

**Εικόνα 3.2.11** Στάδια κατασκευής της γέφυρας Striatus

**Εικόνα 3.2.12** Στάδια κατασκευής της γέφυρας Striatus

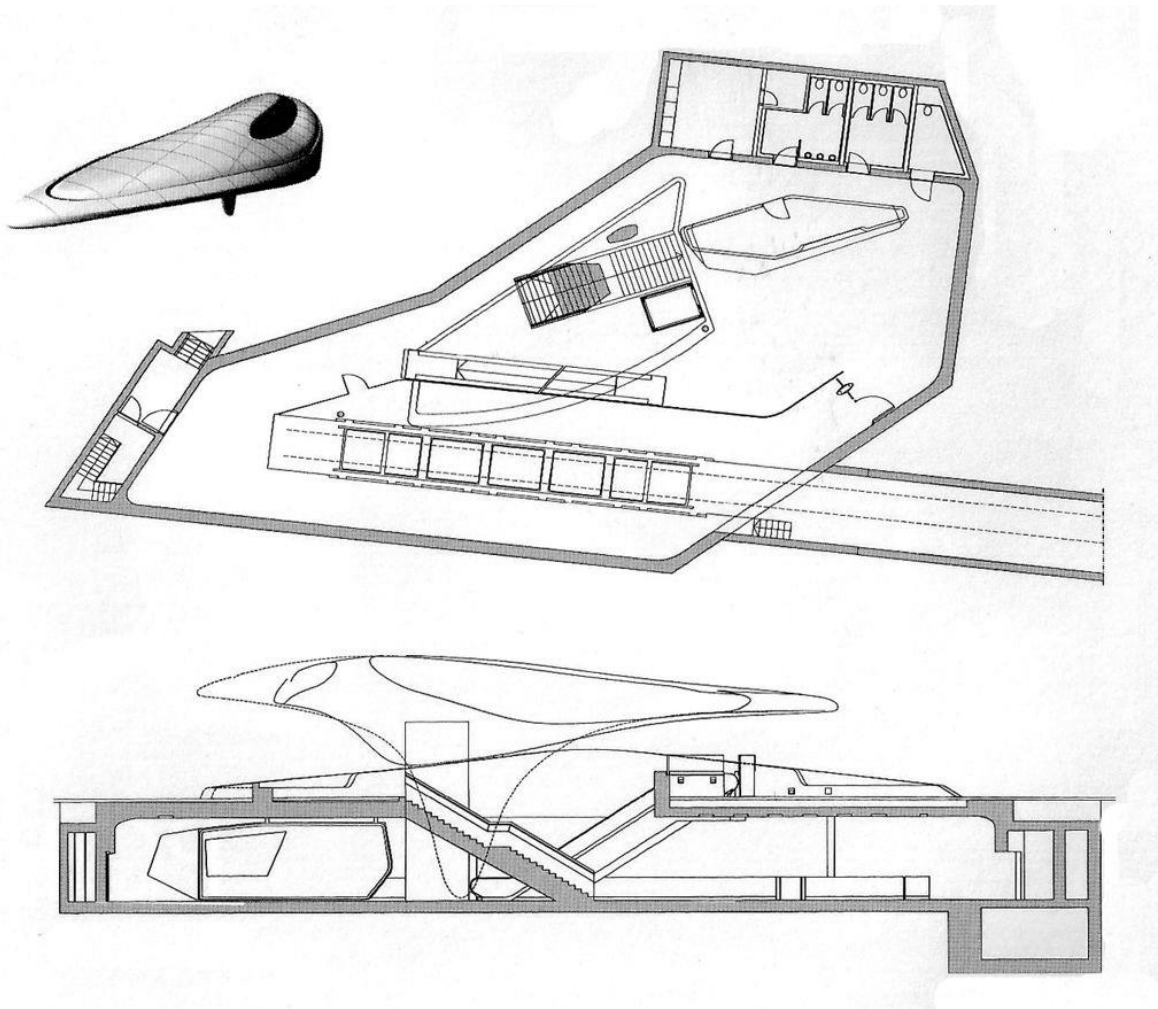
**Εικόνα 3.2.13** Τμήματα με τις ελάχιστες επιφάνειες της γέφυρας Striatus

**Εικόνα 3.2.14** Στάδια κατασκευής της γέφυρας Striatus

**Εικόνα 3.2.15** Τελική μορφή της γέφυρας Striatus

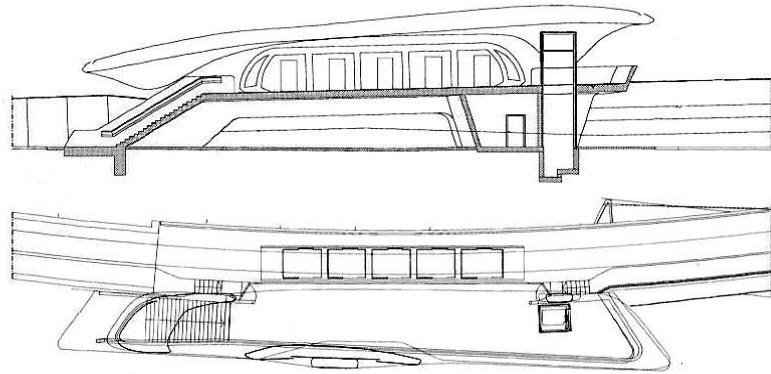
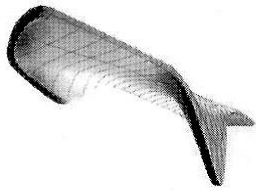


Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα

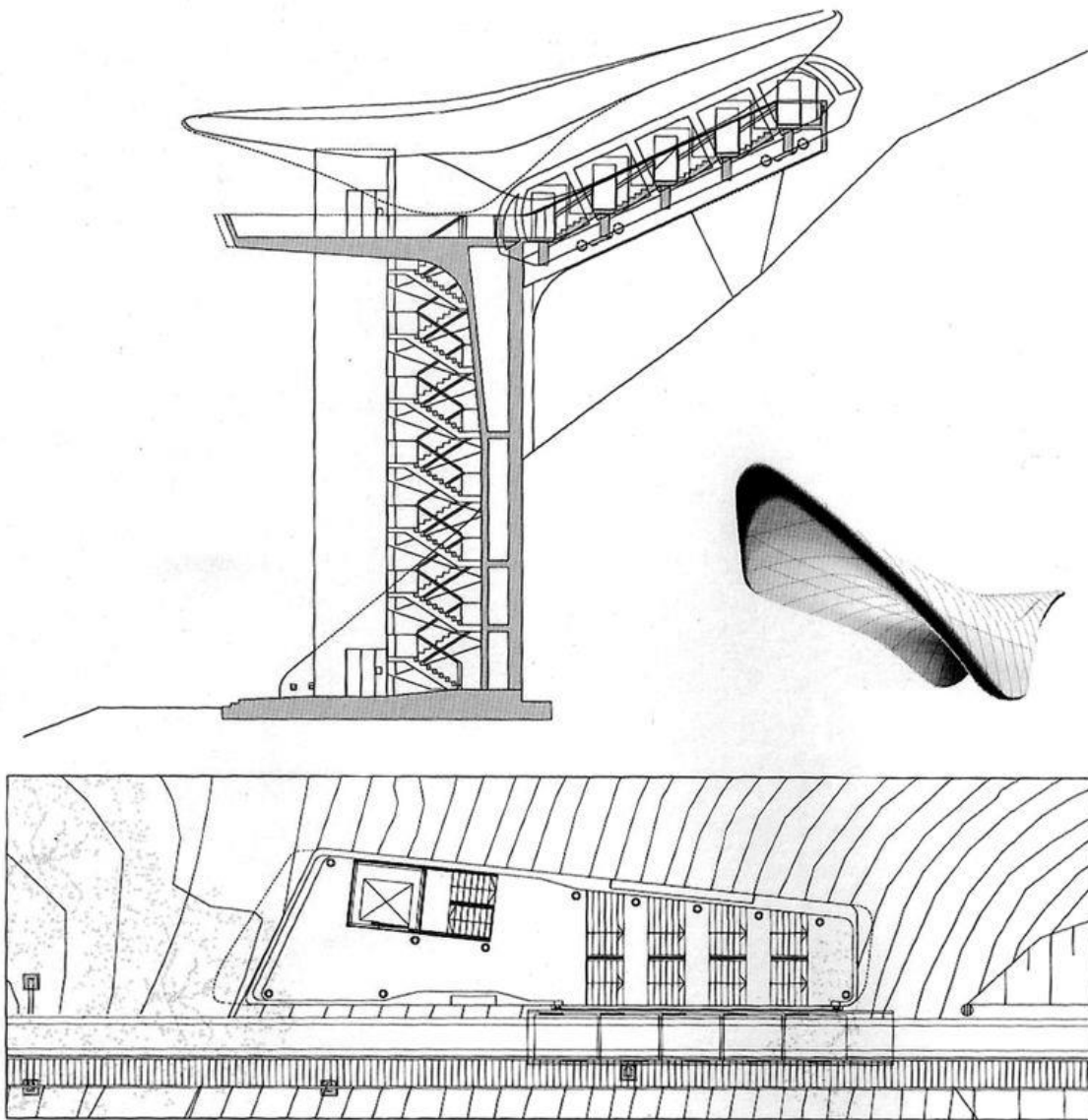




Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα



Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα



Προσέγγιση του σχεδιασμού των ελαχίστων επιφανειών στο έργο της Zaha Hadid  
Το ελάχιστο απαιτεί τη μέγιστη δημιουργικότητα

