



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

Διπλωματική εργασία

ΜΑΡΙΑ Α. ΗΛΙΑΔΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Χ. ΓΑΝΤΕΣ, ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2000

Εισαγωγή - Ευχαριστίες

Οι εφελκόμενες κατασκευές, τμήμα των οποίων αποτελούν οι μεμβράνες, αποτελούν μια από τις σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα της αρχιτεκτονικής αλλά και της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού, κυρίως κατά το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα.

Οι μεμβράνες, οι οποίες αποτελούν το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας, εμφανίζονται μορφολογικά ως εξαιρετικά «αέρινες» κατασκευές, οι οποίες επιδεικνύουν εκπληκτική ελαφρότητα και ανάταση. Από πλευράς στατικής, οι μεμβράνες είναι επιφανειακοί φορείς των οποίων κάθε στοιχειώδες τμήμα βρίσκεται υπό διαξονική εφελκυστική τάση, ενώ αποκλείονται η κάμψη και η θλίψη. Αυτή ακριβώς η στατική τους λειτουργία αποτελεί ένα δελεαστικό πεδίο μελέτης για τον πολιτικό μηχανικό.

Οι κατασκευές αυτές εισάγουν στο κτισμένο περιβάλλον μια αξιοσημείωτη καινοτομία: απαλλάσσουν το μάτι του παρατηρητή από τα παραδοσιακά –βαριά– υλικά, ενώ με την πολυπλοκότητα των γεωμετρικών τους μορφών, υλοποιούν περισσότερο ένα γλυπτό στο χώρο παρά μια συνηθισμένη μορφολογική άποψη που βρίσκει την εφαρμογή της σε ένα κτίριο από σκυρόδεμα ή χάλυβα.

Επί πλέον, ας σημειωθεί ότι η μεμβράνη αποτελεί μια ιδανική περίπτωση συνεργασίας αρχιτέκτονα και πολιτικού μηχανικού με την ενεργό συμμετοχή και των δύο σε όλα τα στάδια μελέτης, αφού η εύρεση σχήματος (1^ο στάδιο), δηλαδή η μορφολογική αναζήτηση της κατασκευής, είναι άρρηκτα δεμένη με τη στατική ανάλυση, το 2^ο στάδιο της ανάλυσης, και μάλιστα με επαναληπτικό τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ της μορφής και των επιθυμητών εντάσεων στη μεμβράνη σε τέτοιο επίπεδο, ώστε να ικανοποιούνται οι αρχιτεκτονικές και οι στατικές προδιαγραφές συγχρόνως: αυτό μπορεί να γίνει πραγματικότητα μόνο μέσω διαδοχικών δοκιμών (επαναλήψεων), πράγμα που σημαίνει πως ο αρχιτέκτονας και ο πολιτικός μηχανικός πρέπει να λειτουργήσουν σαν ομάδα και όχι μεμονωμένα, με διαλλακτικότητα, με επιχειρήματα και προπάντων με ενδιαφέρον για το αντικείμενο.

Οι μεμβράνες λοιπόν αποτελούν μια πρό(σ)κληση στη φαντασία του μελετητή μηχανικού. Αποτελούν ένα ενδιαφέρον, καινούργιο, πλούσιο πεδίο αρχιτεκτονικής και στατικής θεωρίας και πράξης, το οποίο υποστηρίζεται από την σημερινή εξέλιξη της τεχνολογίας και των υλικών. Ελπίζεται ότι οι κατασκευές αυτές θα τύχουν ακόμη μεγαλύτερης εφαρμογής στο μέλλον.

Η διπλωματική εργασία αυτή ξεκίνησε το Μάρτιο του 2000 και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του ίδιου έτους, στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Ο συνδυασμός αρχιτεκτονικής και στατικής που προσφέρουν οι μεμβράνες, με ώθησε να επιλέξω το αντικείμενο χωρίς δεύτερη σκέψη.

Η εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια. Στο **1^ο κεφάλαιο** γίνεται μια **κατάταξη των κατασκευών από μεμβράνη**, με κριτήρια τη λειτουργία, τη χρήση και τη μορφολογία τους. Σε κάθε κατηγορία παρατίθενται παραδείγματα και εικόνες. Στο **2^ο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στα **υλικά κατασκευής των μεμβρανών**, τη σύσταση, τη δημιουργία, τα είδη και την πρακτική εφαρμογή τους. Ακόμη, εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά των υλικών αυτών, δηλαδή οι **μηχανικές και φυσικές** τους ιδιότητες. Το **3^ο κεφάλαιο** εξετάζει **θέματα φάσης λειτουργίας των μεμβρανών**, όπως φορτία, θερμομονωτική ικανότητα, φωτισμός, πυρασφάλεια, ακουστική, κλπ. Στο **4^ο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο της διαδικασίας εύρεσης σχήματος, που αποτελεί το 1^ο στάδιο ανάλυσης των μεμβρανών. Εξετάζονται 2 μέθοδοι ανάλυσης: **η μέθοδος Δυναμικής Χαλάρωσης** και **η μέθοδος Πυκνότητας Δύναμης**. Το **5^ο κεφάλαιο** αναφέρεται στη **διαδικασία παραγωγής σχεδίων κοπής**. Στο **6^ο κεφάλαιο** γίνεται παρουσίαση του **λογισμικού ανάλυσης μεμβρανών EASY**, όπου αναλύεται βήμα-βήμα η διαδικασία **εύρεσης σχήματος** (1^ο στάδιο μελέτης) και η διαδικασία **στατικής ανάλυσης** (2^ο στάδιο μελέτης). Τέλος, στο **7^ο κεφάλαιο** παρουσιάζεται **μια σειρά παραμετρικών αναλύσεων** με το EASY, και εξάγονται **χρήσιμα συμπεράσματα** για τη συμπεριφορά των μεμβρανών.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας αυτής, Επίκουρο καθηγητή ΕΜΠ κ. Χ. Γαντέ, ο οποίος πρότεινε και το θέμα. Οι ευχαριστίες μου δεν περιορίζονται μόνο στην καθοδήγηση, στην επίβλεψη, στη γνώση που προσέφερε και στην αμέριστη συμπαράσταση του στις προσπάθειές μου, αλλά και στην ψυχολογική υποστήριξη την οποία παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου. Σε περιόδους που με περιτριγύριζε η σκέψη πως δεν θα κατόρθωνα να καταλήξω σε αποτέλεσμα, η συνεχής παρότρυνσή του για επιμονή στην προσπάθεια, και η ηθική του συμπαράσταση συνετέλεσαν αφάνταστα στην ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου. Η συνεργασία μας υπήρξε άψογη, πιστεύω εξαιρετικά δημιουργική. Προσωπικά αποκόμισα από

αυτή τρία πολύ σημαντικά στοιχεία, πολύτιμα για τη μετέπειτα πορεία μου: τις αρετές της υπομονής και της εργατικότητας αλλά και τη σημασία των κινήτρων στις δραστηριότητες της ζωής.

Ακόμη, θα ήθελα ειλικρινά να ευχαριστήσω τον κ. E. Moncrieff από τη γερμανική εταιρεία Technet-gmbh για την πολύτιμη βοήθειά του όσον αφορά τις οδηγίες χρήσης του προγράμματος EASY, τον αρχιτέκτονα μηχανικό και διευθύνοντα σύμβουλο της εταιρείας μελέτης και κατασκευής μεμβρανών ARKA SYNTHESIS LTD. κ. Γ. Νικοκάβουρα, για την πολύτιμη βοήθειά του κυρίως σε φωτογραφικό υλικό και θέματα κατασκευής. Ευχαριστίες οφείλω επίσης στον κ. Β. Κουμούση, Αναπληρωτή καθηγητή ΕΜΠ και στον κ. Ε. Σαπουντζάκη, Λέκτορα ΕΜΠ, για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής αυτής εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον πολιτικό μηχανικό και μεταπτυχιακό φοιτητή ΕΜΠ κ. Ι. Γεωργόπουλο για τη γενικότερη βοήθειά του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υλική και ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των πολύχρονων σπουδών μου: χωρίς την υποστήριξη αυτή, δεν θα ήμουν σε θέση να πραγματοποιήσω τα όνειρα και τις φιλοδοξίες μου. Θα τους ευχαριστώ για όλα και για πάντα.

ΜΑΡΙΑ ΗΛΙΑΔΟΥ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2000



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL ANALYSIS**

**MORPHOLOGY AND STATICAL ANALYSIS OF
MEMBRANE STRUCTURES**

***Thesis in fulfillment of the requirements for the degree of
civil engineer***

MARIA A. ILIADOU

THESIS SUPERVISOR: CH. GANTES, ASS. PROFESSOR

OCTOBER 2000

Abstract

Tensile structures, part of which are membranes, constitute one of the most significant evolutions in architecture and civil engineering appearing in the second half of 20th century.

Membranes (tents) are supposed to be extremely light, delightful, appealing and modern structures. Considering their function statically, membranes are surfaces every part of which appears to be under biaxial tension, with no requirement to resist compression and bending forces. Membrane structures offer a rich research field and promise a new era in aesthetic of light construction.

Structures like membranes introduce a remarkable innovation in the urban environment: they release one's eyes from traditional-heavy-materials. As they seem to be found in complex geometrical shapes,

they form rather a sculpture in space than a usual “brutal” form of concrete or steel.

Furthermore, it must be noted that membranes are an ideal case of cooperation between architects and civil engineers, because they both participate in all stages of analysis. Formfinding, the first step in membrane analysis, where the shape of the structure is investigated, is fully connected with the second step (statical analysis), in a way that one or more iterations take place. That means that the total equilibrium of the structure must be achieved, so that architectural and statical standards will be fulfilled, and both architect and civil engineer would be satisfied. Their combined effort is a matter of great importance for a desirable result.

This work took place from March to October 2000 and submitted to the Department of Civil Engineering of National Technical University of Athens, in fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer. The thesis consists of 7 chapters. The **1st chapter** is an attempt to **classify membrane structures** by their function, shape and use. Every case is accompanied by photographs and examples. The **2nd chapter** is an **introduction to membrane materials and fabrics**, with special references in their components, creation, application, properties, etc. The **3rd chapter** focuses on **matters of function of membranes**, such as loads, thermal insulation, lighting, fire-safety, acoustics, etc. **The 4th chapter** is the theoretical background of formfinding (1st stage of membrane analysis); 2 methods of formfinding are investigated: the **Dynamic relaxation method** and the **Force-density method**. In the **5th chapter** the **cutting pattern generation procedure** is analyzed. The **6th chapter** introduces the **membrane design and analysis program called “EASY”**. Here, the procedure of **formfinding** (1st stage) and **statical analysis** (2nd stage) is presented step-by-step. Finally, the **7th chapter** contains a **series of parametric analysis diagrams**, from which some **useful conclusions about membrane behavior**,

considering forces, stresses and deflections, in both formfining and stational analysis, are extracted.

I would like to thank the supervisor of this thesis Assist. Professor Ch. Gantes, deeply and sincerely, for his guidance, supervision, assistance and most of all his moral support to my efforts. Our cooperation was excellent. I believe this work would never come to an end without his help.

Furthermore, I owe special thanks to Mr. E. Moncrieff from Technet-gmbh, for his help on EASY program and to Mr. G. Nikokavouras from ARKA SYNTHESIS LTD. for his help on matters of membrane construction. I would also like to thank Associate Professor V. Koumousis and Lecturer E. Sapountzakis for their participation in the examination team of my thesis.

To my family, special thanks would never be enough; nothing could be possible without their material and moral support throughout the years of my studies. I owe everything to them.

MARIA ILIADOU

OCTOBER 2000