

ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΛΥΠΤΟΥ ΑΠΟ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Στέλλα Αυγερινού¹

Κωνσταντίνος Αδαμάκος¹

Ιωάννης Βάγιας²

¹Πολιτικοί Μηχανικοί, Υποψήφιοι Διδάκτορες

²Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, ΤΚ 15780, Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: avgerinoustella@gmail.com, kadamakos@hotmail.com, vastahl@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

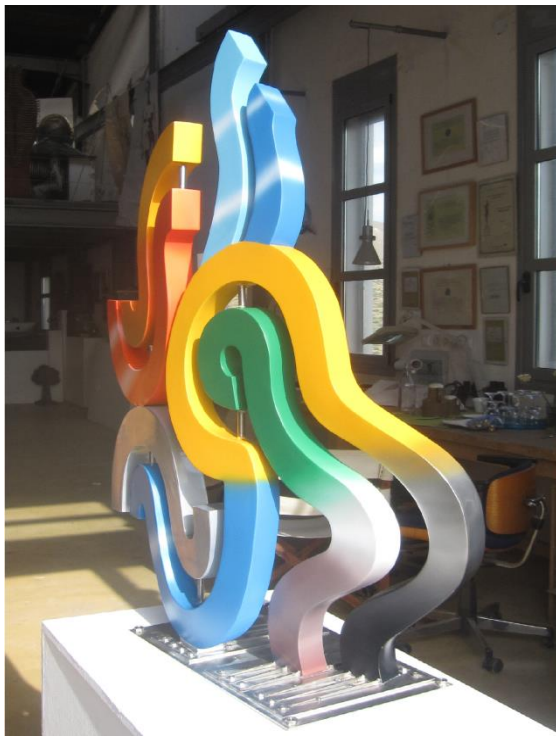
Οι “δρόμοι του νερού” (“le chemin de l’eau”) είναι ένα γλυπτό της κ. Αγγελίκας Κοροβέση το οποίο τοποθετήθηκε στο Παρίσι στην είσοδο κτιρίου της SIAAP (Syndicat Interdépartemental pour l’Assainissement de l’Agglomération Parisienne), το 2013. Το γλυπτό αποτελείται από ένα σύμπλεγμα καμπύλων στοιχείων κοίλης ορθογωνικής διατομής συνδεδεμένων μεταξύ τους είτε μέσω συγκολλήσεων/κοχλιώσεων όπου εφάπτονται είτε μέσω μικρών λεπτότοιχων κυλινδρικών μελών σποραδικά σε θέσεις όπου αφίστανται. Το γλυπτό εδράζεται σε επάλληλα χαλύβδινα ελάσματα κοχλιωμένα μεταξύ τους, τα οποία στη συνέχεια αγκυρώνονται σε μία βάση σκυροδέματος. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι ανοξείδωτος χάλυβας καθώς το έργο είναι τοποθετημένο μέσα στο νερό. Οι διατομές είναι συγκολλητές, ορθογωνικές μεταβλητού ύψους και λεπτότοιχες. Η κατασκευή έγινε εξολοκλήρου στο εργαστήριο της γλύπτριας στην Αθήνα και μεταφέρθηκε οδικώς στο Παρίσι όπου έγινε η αποκατάσταση της συνέχειάς του και η σύνδεσή του με τη βάση του σκυροδέματος. Η μελέτη έγινε σύμφωνα τους Ευρωκώδικες EN 1991-4, EN 1991-1-5, EN 1993-1-1, EN 1993-1-5, EN 1993-1-4 και περιελάμβανε τόσο καθολικούς όσο και τοπικούς ελέγχους. Στις κρίσιμες θέσεις των συνδέσεων τοποθετήθηκαν πρόσθετα εγκάρσια εσωτερικά διαφράγματα για την αποφυγή τοπικών αστοχιών.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έργο είναι μια αφηρημένη γεωμετρική σύνθεση που υλοποιείται με ανοξείδωτο χάλυβα και εδράζεται σε επάλληλα χαλύβδινα ελάσματα και ένα βάθρο σκυροδέματος διαστάσεων 2,8*2,0*1,1m. Η βάση του γλυπτού είναι βυθισμένη σε νερό. Οι διαστάσεις του ιδεατού στερεού που περιβάλλει το έργο είναι 5.40m*3.9 m*0.80m (Υ*Π*Β) χωρίς να

συμπεριλαμβάνονται τα ελάσματα στήριξης και η βάση σκυροδέματος, τα δε μέλη αποτελούνται από κοίλες λεπτότοιχες ορθογωνικές διατομές. Πιο συγκεκριμένα, το ύψος των διατομών κυμαίνεται από 240 mm έως 350 mm και το πλάτος είναι σχεδόν σταθερό 214 mm. Τα πάχη των ελασμάτων είναι 2.5 mm και 1.5 mm αντίστοιχα.

Το γλυπτό κατασκευάστηκε στο εργαστήριο της γλύπτριας κ. Αγγέλικας Κοροβέση στην Αθήνα και μεταφέρθηκε οδικώς στο Παρίσι όπου έγινε η αποκατάσταση της συνέχειάς του και η σύνδεσή του με τη βάση του σκυροδέματος. Οι περιορισμοί που εκ των πραγμάτων επέβαλε η μεταφορά σε συνδυασμό με το μέγεθος του έργου αλλά και το γεγονός ότι η συναρμολόγηση στον τελικό προορισμό έπρεπε να γίνει με τρόπο απλό, ακριβή και γρήγορο, ήταν οι καθοριστικοί παράγοντες για το σχεδιασμό των αποκαταστάσεων συνέχειας. Επελέγη το γλυπτό να μεταφερθεί σε δύο τμήματα και να συνδεθούν κοχλιωτά κατά τρόπον ώστε στην τελική του μορφή να μην υπάρχουν ορατές συνδέσεις. Τα επιμέρους καμπύλα τμήματα του γλυπτού συνδέονται μεταξύ τους με μικρά λεπτότοιχα κυλινδρικά στοιχεία διαμέτρου 60 mm και πάχους 2 mm. Στις περιοχές των προαναφερθεισών στηρίξεων προβλέπονται ενισχύσεις των εκατέρωθεν διατομών του γλυπτού με εγκάρσια εσωτερικά διαφράγματα πάχους 2.5 mm συγκολλημένα περιμετρικά στα τοιχώματα της κοίλης διατομής.



Φωτ. 1 (α) Απεικόνιση του προπλάσματος του γλυπτού στο εργαστήριο και (β) του τελικού έργου μετά την τοποθέτησή του.

Το γλυπτό κατασκευάστηκε από ανοξείδωτο χάλυβα κατηγορίας 316 (μηχανικά χαρακτηριστικά: $f_y = 205 \text{ MPa}$, $f_u = 515 \text{ MPa}$, $E = 193000 \text{ MPa}$, $\alpha = 15.9 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$). Όλοι οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαμέτρου M12 και από τον ίδιο ανοξείδωτο χάλυβα.

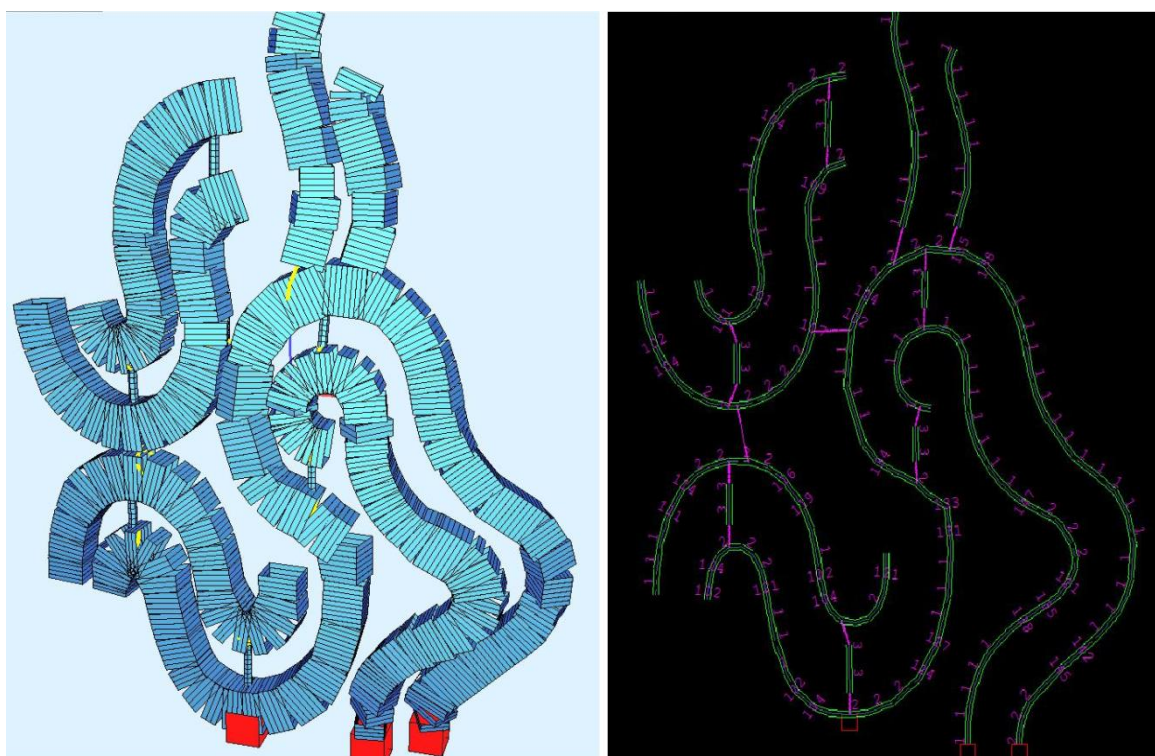
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ- ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η προσομοίωση του γλυπτού επιλέχθηκε να γίνει μέσω ραβδόμορφων στοιχείων διερχόμενων από τους κεντροβαρικούς άξονες των επιμέρους τμημάτων του που ακολουθούν πυκνή πολυγωνική. Η ιδιαίτερη γεωμετρία του φορέα αποτέλεσε τη σημαντικότερη δυσκολία κατά τη μόρφωση του προσομοιώματος, καθώς το έργο

χαρακτηρίζεται από μεταβλητές διατομές κατά μήκος και εκκεντρότητες με συνέπεια οι πλευρές της πολυγωνικής να μην είναι συνεπίπεδες.

Η προσομοίωση του συνολικού φορέα καθώς και οι αναλύσεις έγιναν με χρήση του λογισμικού SOFISTIK. Απλοποιητικά θεωρήθηκαν δύο χαρακτηριστικές διατομές: η "μεγάλη" διατομή που αντιπροσωπεύει καλύτερα τα καμπύλα τμήματα του έργου και η "μικρή" διατομή που αντιπροσωπεύει καλύτερα τα σχεδόν ευθύγραμμα τμήματα αυτού. Για την ομαλή συναρμογή αυτών των διατομών και την αποφυγή απότομης αλλαγής των γεωμετρικών και αδρανειακών τους χαρακτηριστικών, χρησιμοποιήθηκαν ενδιάμεσες μεταβατικές διατομές.

Οι συνοριακές συνθήκες στήριξης στη βάση του γλυπτού θεωρήθηκαν πακτώσεις, καθώς κατά την κατασκευή έγινε πλήρης συγκόλληση των διατομών επί των ελασμάτων έδρασης. Όσον αφορά στα σημεία επαφής των επιμέρους τμημάτων του έργου, προσομοιώθηκαν ως "δεσμεύσεις" μεταξύ των γειτονικών στοιχείων, δηλαδή ως συνθήκες όμοιας παραμορφωσιακής κατάστασης.



Φωτ. 2 Συνολικό προσομοίωμα του έργου με εμφανείς τις διάφορες διατομές και δεσμεύσεις.

Εκτός του συνολικού προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε για τους καθολικούς ελέγχους, κρίθηκε απαραίτητη και η επιμέρους προσομοίωση των περιοχών που καταπονούνται τοπικά στις θέσεις σύνδεσης των τμημάτων του γλυπτού. Συνεπώς για τους τοπικούς ελέγχους εκτελέστηκαν λεπτομερέστερες μη γραμμικές ελαστικές αναλύσεις, με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

4. ΔΡΑΣΕΙΣ

Τα φορτία που ελήφθησαν υπόψη είναι το ίδιο βάρος της κατασκευής, ο άνεμος και οι θερμοκρασιακές μεταβολές, εισήχθησαν δε ως γραμμικά φορτία κατά μήκος των συνεχών κεκαμμένων ράβδων. Οι αναλύσεις στο βασικό (συνολικό) στατικό προσομοίωμα ήταν

γραμμικές. Τα δε αποτελέσματα περιλαμβάνουν τα εντατικά μεγέθη, τις τάσεις και τις παραμορφώσεις σε όλες τις θέσεις του γλυπτού.

Πιο συγκεκριμένα για τον άνεμο, οι υπολογισμοί έγιναν με βάση το EN 1991-4 και οι ανεμοπιέσεις προσδιορίστηκαν στη δυσμενέστερη διεύθυνση δηλαδή την κάθετη στην μεγάλη επιφάνεια προσβολής του γλυπτού. Οι υπολογισμοί έγιναν συνοπτικά ως εξής:

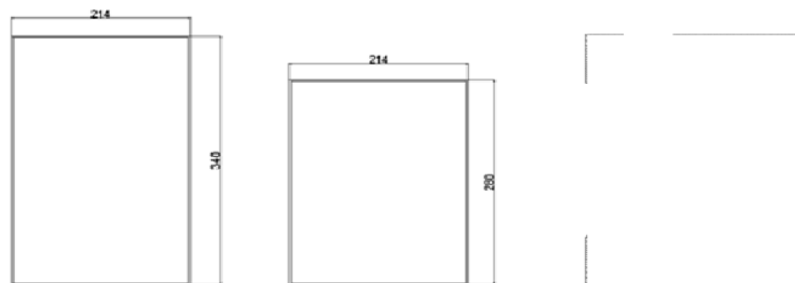
- Βασική ταχύτητα ανέμου για το Παρίσι $V_b=26$ m/s.
- Κατηγορία εδάφους III (χωριά-προάστια) $\rightarrow z_o=0.3$ και $z_{min}=5$ m
- Ολική επιφάνεια $A_{tot}= 21.1$ m² και επιφάνεια προσβολής $A_w= 7.53$ m²
- Συντελεστής δύναμης δικτυωτών κατασκευών και ικριωμάτων: $c_f=1.55$
- Μέση ταχύτητα: $V_m(z) = C_r(z)*C_o(z)*V_b= 0.62*1.00*26 = 15.5$ m/s.
- Πίεση ταχύτητας αιχμής: $q_p(z) = C_e(z)*q_b = C_e(z)*(0.5*\rho*V_b^2)=0.55$ kPa
- Ολική δύναμη ανέμου: $F_w = C_s*C_d*C_f*q_p(z)*A_w= 6.6$ kN ($z<15$ m) και ισοδύναμο φορτίο ανά μονάδα μήκους $w\approx 0.25$ kN/m

Σχετικά με τη δράση της θερμοκρασιακής μεταβολής, θεωρήθηκε ομοιόμορφη αυξομείωση της θερμοκρασίας κατά 15°C.

Για την οριακή κατάσταση αστοχίας (OKA) εξετάστηκαν οι ακόλουθοι συνδυασμοί δράσεων: (1.00G+1.50 W), (1.35G+1.50 W), (1.00G+1.50W+0.9T), (1.35G+1.50W+0.9T) και δυσμενέστερος απεδείχθη ο συνδυασμός (1.00G+1.50W+0.9T).

Για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (OKΛ) εξετάστηκε ο συνδυασμός (1.0G+1.0W+0.6T).

5. ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ



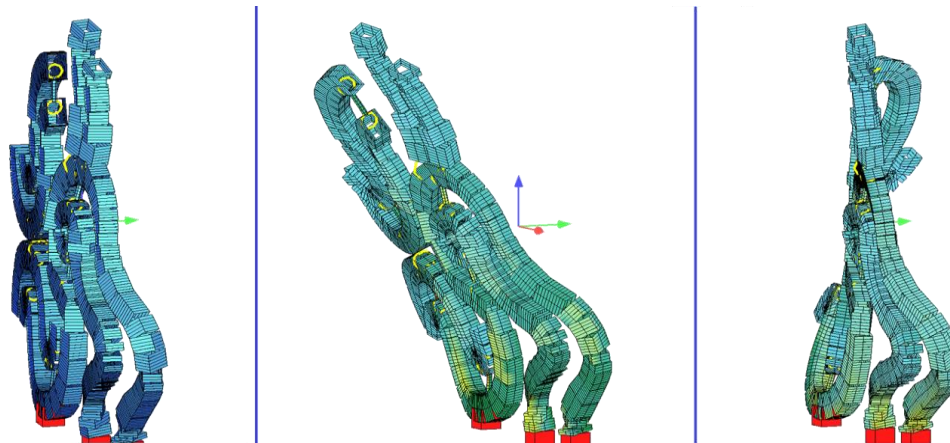
Φωτ. 3 Αρχικές και απομειωμένες διατομές.

Οι δύο διατομές που χρησιμοποιήθηκαν (αμελώντας τις μεταβατικές διατομές) φαίνονται στη Φωτ.3. Οι συγκεκριμένες διατομές σύμφωνα με το EN 1993-1-1, ανήκουν στην κατηγορία 4 (κρίσιμος λόγος $b/t=142>124\epsilon=124*\sqrt{(235/205)}=132$), συνεπώς έχουν αντοχή μικρότερη της ελαστικής. Ο υπολογισμός των ενεργών απομειωμένων διατομών έγινε σύμφωνα με τον EN1993-1-5 και η χαρακτηριστική μορφή τους φαίνεται επίσης στη Φωτ.3. Οι αρχικοί έλεγχοι έγιναν χρήσει του καθολικού προσομοιώματος με τις πλήρεις διατομές, στη συνέχεια επαναλήφθηκε ο έλεγχος τάσεων στο προσομοίωμα με τις ενεργές διατομές.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

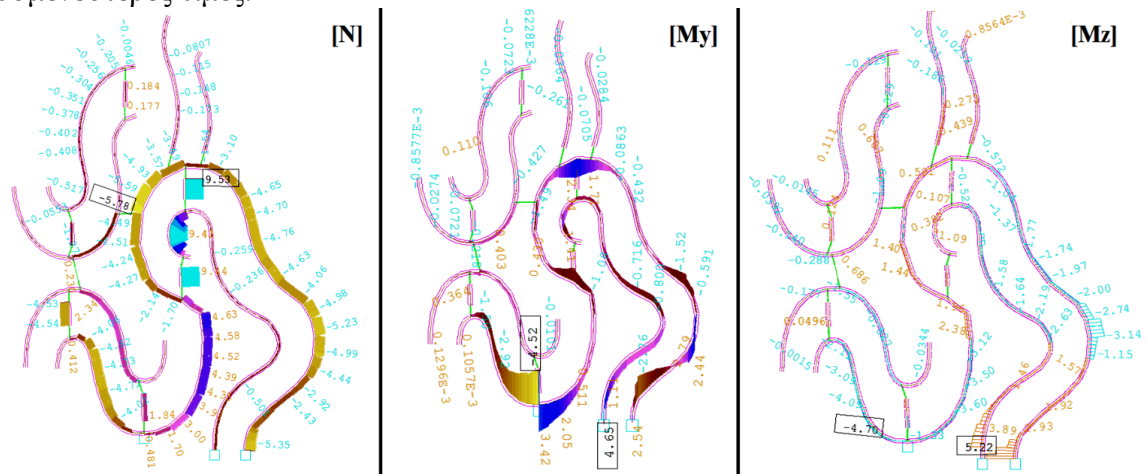
Οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές προσδιορίστηκαν μέσω της δυναμικής ιδιομορφικής ανάλυσης. Η πρώτη ιδιοπερίοδος υπολογίστηκε περίπου ίση με $T_1=0,11$ sec και είναι

μεταφορική, ενώ η δεύτερη προέκυψε $T_2=0,05\text{sec}$ και στρεπτική. Οι δύο πρώτες ιδιομορφές σε σύγκριση με την απαραμόρφωτη κατάσταση εικονίζονται στη Φωτ.4 .



Φωτ. 4 (α)Απαρμόρφωτη κατάσταση, (β) 1η Ιδιομορφή και (γ) 2η Ιδιομορφή.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι αξονικές δυνάμεις καθώς και οι καμπτικές ροπές για τον κρίσιμο συνδυασμό δράσεων. Σε πλαίσιο βρίσκονται οι εκάστοτε δυσμενέστερες τιμές.



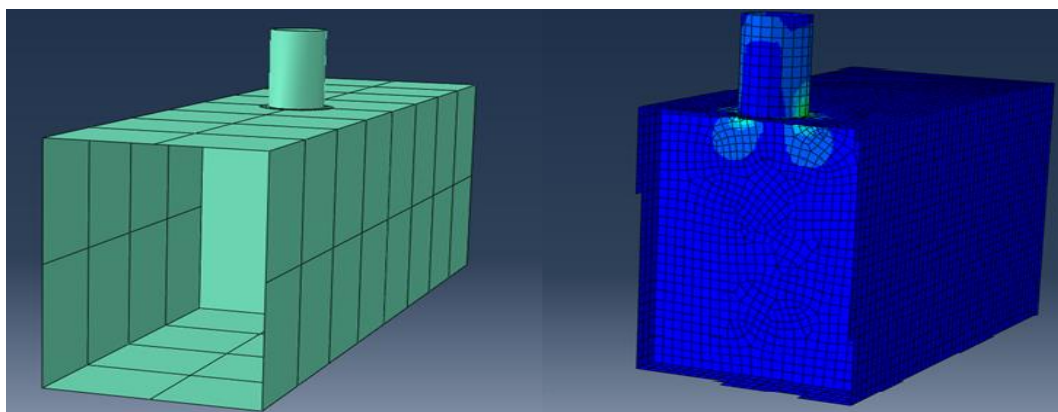
Φωτ. 5 Ενατικά μεγέθη για τον κρίσιμο συνδυασμό δράσεων (α)N (kN), (β) My (kNm), (γ) Mz (kNm)

7. ΤΟΠΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ

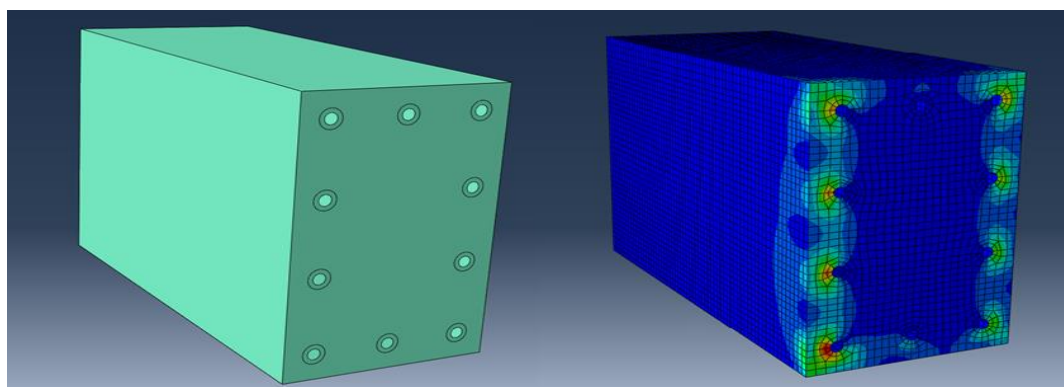
Η προαναφερθείσα ύπαρξη λεπτότοιχων διατομών επιβάλλει την ανάγκη για επιπλέον τοπικούς ελέγχους και πιο συγκεκριμένα στις διάφορες περιοχές σύνδεσης, όπως:

- οι περιοχές όπου οι συνδετήριοι κύλινδροι συνδέονται με το άνω ή κάτω έλμα των κιβωτοειδών διατομών
- οι "τομές" του γλυπού που υπαγορεύτηκαν από την ανάγκη μεταφοράς του
- η στήριξη του γλυπού επί της κοίλης βάσης

Οι ανωτέρω περιοχές προσομοιώθηκαν με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και ελέγχθηκαν μέσω μη γραμμικών ελαστικών αναλύσεων. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα προσομοιώματά τους και οι τάσεις VonMises στην κρισιμότερη εντατική κατάσταση. Τα ενισχυτικά εγκάρσια διαφράγματα είναι πάχους 2.5mm ενώ οι μετωπικές πλάκες στην αποκατάσταση συνέχειας είναι πάχους 4.5mm, όλα τα ελάσματα συγκολλούνται περιμετρικά στα τοιχώματα της κοίλης διατομής.

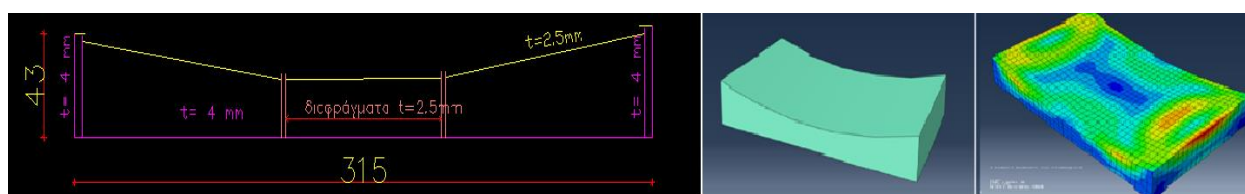


Φωτ. 6 Περιοχή σύνδεσης με κύλινδρο, ενισχυμένη με εγκάρσιο διάφραγμα.



Φωτ. 7 Περιοχή αποκατάστασης συνέχειας μέσω μετωπικής πλάκας και κοχλιών.

Η κοίλη βάση στήριξης του γλυπτού αποτελείται περιμετρικά από ελάσματα πάχους 4mm, έχει διαστάσεις σε κάτοψη 315*224mm και ύψος που μεταβάλλεται από 24 έως 46mm. Στο μεσαίο χαμηλότερο τμήμα της ενισχύεται από δύο συμμετρικά τοποθετημένα εγκάρσια διαφράγματα πάχους 2,5mm.



Φωτ. 8 Κοίλη βάση στήριξης του γλυπτού.

Οι προαναφερθέντες έλεγχοι έδειξαν ότι οι συγκεντρωμένες τάσεις που αναπτύσσονται στις περιοχές άσκησης των φορτίων δεν υπερβαίνουν την αντοχή του υλικού στην περίπτωση των εγκάρσιων διαφραγμάτων και της στήριξης. Στην περίπτωση αποκατάστασης της συνέχειας, οι ισοδύναμες τάσεις υπερβαίνουν οριακά την f_y του υλικού περιμετρικά των γωνιακών κοχλιών. Η υπέρβαση συμβαίνει σε μικρή έκταση και εκτιμάται ότι δεν προκαλεί πρόβλημα στην κατασκευή αφού ελέγχθηκαν οι παραμορφώσεις της σύνδεσης αλλά και οι αντοχές σε ταυτόχρονη διάτμηση και εφελκυσμό των κοχλιών, σύνθλιψη άντυγας του ελάσματος και διάτρηση του ελάσματος.

Όσον αφορά τις δυο τομές που επιβλήθηκαν προς διευκόλυνση της οδικής μεταφοράς του γλυπτού, αξίζει να σημειωθεί ότι η μετέπειτα αποκατάσταση της συνέχειας που έγινε κοχλιωτά πραγματοποιήθηκε δια μέσου θυρίδων πρόσβασης διαστάσεων 120*160mm. Τα

ανοίγματα αυτά ενισχύθηκαν περιμετρικά στο εσωτερικό τους με ελάσματα πάχους 3mm ενώ μετά το πέρας των εργασιών καλύφθηκαν ώστε να μην είναι ορατά.



Φωτ. 9 Θυρίδες πρόσβασης για την κοχλίωση στις αποκαταστάσεις συνέχειας και κάλυψή τους.

8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΔΡΑΣΗΣ

Το γλυπτό εδράζεται σε 3 θέσεις επί επαλλήλων χαλύβδινων ελασμάτων και στη συνέχεια σε ένα βάθρο σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, οι βάσεις του γλυπτού συγκολλούνται περιμετρικά σε ελάσματα πάχους 5mm τα οποία κοχλιώνονται σε ένα ευρύτερο έλασμα πάχους 10mm και το οποίο συνδέεται με τη βάση σκυροδέματος μέσω χημικών αγκυρίων τύπου Hilti. Οι κοχλίες είναι M12 και τοποθετούνται σε αποστάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 100~300mm για να εξυπηρετούν απαιτήσεις παραμορφωσιμότητας και όχι αντοχής (overdesign). Για τον υπολογισμό των αγκυρίων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό που παρέχεται από την κατασκευάστρια εταιρεία. Λαμβάνοντας υπόψη τις δυσμενέστερες αντιδράσεις στήριξης του γλυπτού, την ποιότητα του σκυροδέματος (C16/20), το πάχος του ελάσματος (10mm) και την απόσταση των αγκυρίων από τις παρειές ίση με 40mm, προέκυψαν τα απαιτούμενα χημικά αγκύρια κατηγορίας HIT-RE 500+HIS-RN διαμέτρου M12 και βάθους έμπτυξης 125 mm.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EN 1991-1-4 ,Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-4: General actions- Wind actions, CEN, European Committee for Standardisation, 2005.
- [2] EN 1991-1-5 ,Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-5: General actions- Thermal actions, CEN, European Committee for Standardisation, 2003.
- [3] EN 1993-1-1 ,Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, European Committee for Standardisation, 2003.
- [4] EN 1993-1-5 ,Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5: Plated structural elements, CEN, European Committee for Standardisation, 2004.
- [5] EN 1993-1-4 ,Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-4:Supplementary rules for Stainless steels, CEN, European Committee for Standardisation, 2006.

STRUCTURAL DESIGN OF SCULPTURE FORMED WITH THIN PLATE HOLLOW SECTIONS AND STAINLESS STEEL

Stella Avgerinou¹

Konstantinos Adamakos¹

Ioannis Vayas²

¹Civil Engineer, PhD Candidates

²Dr.-Ing., Professor

Institute of Steel Structures, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Zografou Campus, 15780, Greece

e-mail: avgerinoustella@gmail.com, kadamakos@hotmail.com, vastahl@central.ntua.gr

ABSTRACT

“Le chemin de l’eau” is a sculpture of Aggelika Korovessi created in 2013 and placed at the entrance of the SIAAP building (Syndicat Interdépartemental pour l’Assainissement de l’Agglomération Parisienne). The work is composed by a complex of curved elements of steel rectangular hollow sections. These elements are either welded/bolted to each other, when in contact, or occasionally supported with small cylindrical members when in distance.

The sculpture rests on steel plates bolted to each other and eventually anchored to a concrete base. Stainless steel was used as construction material as the work is placed within a water fountain so that part of it is permanent in water, whereas other parts are in wet environment. All rectangular hollow sections are thin-walled, welded and have varying heights. The formation/fabrication was done entirely in the artist's workshop in Athens and then it was transported in two parts to Paris where its continuity was restored through bolts that were fastened in diaphragms, while its base was anchored to a concrete block.

The structural design procedure followed the provisions of the Eurocodes EN 1991-4, EN 1991-1-5, EN 1993-1-1, EN 1993-1-5 and EN 1993-1-4. Structural analysis and design were performed by both global and local models, where the structure was represented by linear or shell finite elements. In the critical areas of various connections, the structure was reinforced by means of additional diaphragms in order to transfer concentrated forces from the bolts and avoid local failures.