

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΘΑΛΑΜΗΓΟΥ ΑΠΟ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟ ΧΑΛΥΒΑ

Ανδρέας Σπηλιόπουλος<sup>1</sup>

Μαρία-Ελένη Δασίου<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Πολιτικοί Μηχανικοί, Υποψήφιοι Διδάκτορες

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, ΤΚ 15780, Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: [spiliopa@central.ntua.gr](mailto:spiliopa@central.ntua.gr), [medasiou@mail.ntua.gr](mailto:medasiou@mail.ntua.gr)

## 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται η μελέτη και η κατασκευή της κύριας κλίμακας που συνδέει τα δύο ανώτερα επίπεδα πολυτελούς θαλαμηγού. Η κλίμακα η οποία έχει σχεδιαστεί με σκοπό να ικανοποιεί τις ιδιαίτερες αρχιτεκτονικές απαιτήσεις του κυρίου του έργου, έχει φέροντα οργανισμό από ανοξείδωτο χάλυβα ο οποίος συνδυαζόμενος με τις μαρμάρινες επικαλύψεις των βαθμίδων και τα γυάλινα στηθαία προσδίδει στο έργο το επιθυμητό οπτικό αποτέλεσμα. Με σκοπό την εύρεση της εντατικής κατάστασης και των δυναμικών χαρακτηριστικών του, το σύνολο του φορέα προσομοιώθηκε με τη χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων. Ακολούθως με τη χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κατασκευάστηκαν τρισδιάστατα προσομοιώματα των κρίσιμων τμημάτων και εξαρτημάτων του φορέα με σκοπό την ακριβέστερη προσέγγιση της εντατικής τους κατάστασης. Το σύνολο της κατασκευής προσεγγίστηκε και σχεδιάστηκε σαν μηχανολογικό εξάρτημα το οποίο έπρεπε να μπορεί να συναρμολογηθεί, με μεγάλη ακρίβεια ως προς τη γεωμετρία, του εντός του περιορισμένου χώρου της θαλαμηγού.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα ναυπηγεία Ελευσίνας έγινε η κατασκευή πολυτελούς ιδιωτικής θαλαμηγού υψηλών προδιαγραφών τόσο από τεχνικής όσο και από αισθητικής απόψεως. Το σύνολο της κατασκευής αποτελεί 'άσκηση' υψηλής τεχνολογίας με την εφαρμογή καινοτόμων λύσεων τουλάχιστον στον τομέα της ναυπηγικής και μηχανολογίας. Το σκαρί του πλοίου είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής και αντιδιαβρωτικής προστασίας στα κατώτερα επίπεδα και από αλουμίνιο στα ανώτερα. Σε μεγάλο ποσοστό τόσο κύριων όσο και δευτερευουσών κατασκευών έχει χρησιμοποιηθεί ανοξείδωτος χάλυβας, Η παρούσα εργασία αφορά την μελέτη, την τεχνική προσέγγιση αλλά και την κατασκευή της κύριας κλίμακας που συνδέει τα δύο ανώτερα επίπεδα της πολυτελούς θαλαμηγού.

Η αρχιτεκτονική της προσέγγιση είναι ιδιαίτερα απαιτητική τόσο από πλευράς γεωμετρίας όσο και από πλευράς κατασκευαστικών λεπτομερειών με σκοπό την απόδοση του επιθυμητού αποτελέσματος. Ο φέρων οργανισμός της είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και αποτελείται από δύο κύριους φορείς ημιτονοειδούς σχήματος συμμετρικά τοποθετημένους ως προς τον άξονα ανάβασης. Χωρίζεται από το κεντρικό πλατύσκαλο σε δύο τμήματα. Το κατώτερο τμήμα έχει έναν κλάδο ανάβασης με πλάτος 2,80 μέτρα ο οποίος μετά από το πλατύσκαλο διακλαδώνεται σε δύο αντικριστούς κλάδους πλάτους περίπου 1,10 μέτρων έκαστος (Σχ.1). Οι επιφάνειες των κυρίων φορέων θα παραμείνουν εμφανείς,

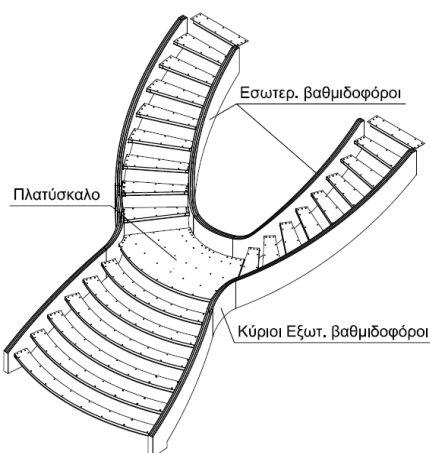


Σχ. 1. Φωτορεαλιστική απεικόνιση της κλίμακας.

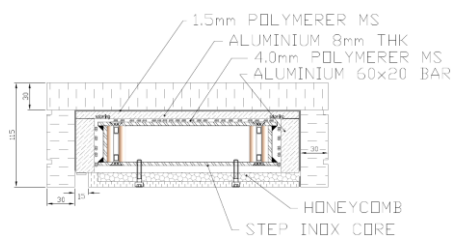
ενώ οι βαθμίδες έχουν μαρμάρινη επικάλυψη. Τα πλαϊνά προστατευτικά στηθαία είναι από κρύσταλλο ασφαλείας. Ο χώρος κάτω από το κλιμακοστάσιο οριοθετείται περιμετρικά με κρύσταλλο το οποίο στηρίζεται ως πρόβολος στο κατώτερο κατάστρωμα και εφάπτεται, με μηδενικό σχεδόν κενό, στην κάτω πλευρά των βαθμιδοφόρων.

### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η κατασκευή όπως προαναφέρθηκε αποτελείται από δύο βαθμιδοφόρους, οι οποίοι είναι και τα κύρια φέροντα στοιχεία της, που συνδέουν τα δύο καταστρώματα της θαλαμηγού. Στο ανώτερο μισό της κλίμακας και λόγω του διαχωρισμού της σε δύο κλάδους οι δύο κύριοι εξωτερικοί βαθμιδοφόροι συμπληρώνονται από δύο εσωτερικούς οι οποίοι εδράζονται στο πλατύσκαλο και το ανώτερο κατάστρωμα. Η διατομή τους μπορεί να οριστεί ως κοίλη ορθογωνική κατά τη γενική έννοια.



Σχ. 2α. Τρισδιάστατη απεικόνιση των φερόντων στοιχείων της κλίμακας.

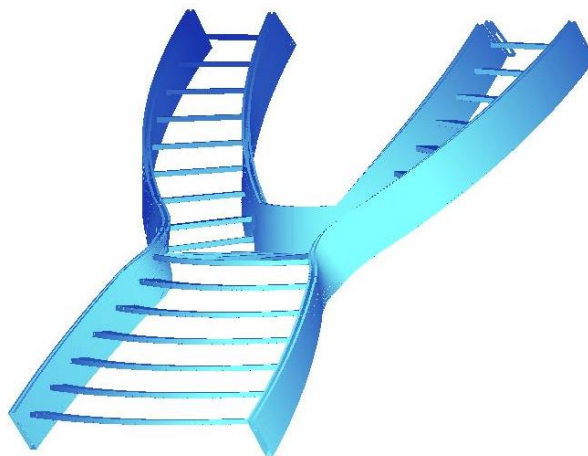


Σχ. 2β. Τυπική τομή βαθμίδας.

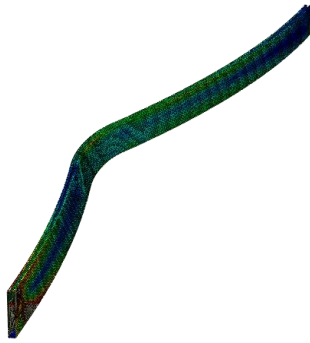
Οι αμφιέριστες βαθμίδες οι οποίες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, γεφυρώνουν το άνοιγμα μεταξύ των βαθμιδοφόρων (Σχ. 2α). Η διατομή τους είναι ορθογωνική, το σχήμα τους σε κάτοψη είναι καμπύλο ενώ το μήκος τους ποικίλει ανάλογα με την θέση. Σε αντίθεση με το μήκος που μεταβάλλεται σημαντικά αφού η κατώτερη έχει διάσταση 2,60 μέτρων ενώ η ανώτερη 1,0 μέτρο το ύψος τους παραμένει σταθερό. Οι συνδέσεις της κλίμακας στα δύο καταστρώματα είναι, κατ' απαίτηση του νηογνώμονα, κοχλιωτές με αυτές του κατώτερου καταστρώματος να επιτρέπει την οριζόντια διαμήκη μετακίνηση. Επί των βαθμιδοφόρων σε ειδικά διαμορφωμένες θέσεις τοποθετούνται τα κρύσταλλα πάχους 20mm των στηθαίων ασφαλείας. Οι βαθμίδες (και το πλατύσκαλο) επικαλύπτονται και πλαγιοκαλύπτονται με πλάκες μαρμάρου πάχους 30mm. Στην κάτω πλευρά τους επικαλύπτονται από σύνθετη κατασκευή, κυψελοειδούς υλικού 10mm και μαρμάρου 6mm, συνολικού πάχους 16mm η οποία συνδέεται με το μεταλλικό φέροντα οργανισμό της βαθμίδας με μηχανική στήριξη (Σχ. 2β).

Η ανάλυση του φορέα έγινε μέσω χωρικών προσομοιωμάτων με τα προγράμματα SofistiK και Abaqus. Οι αναλύσεις ήταν μη γραμμικές, τόσο ως προς τη γεωμετρία όσο και ως προς τη συμπεριφορά του υλικού. Κατασκευάστηκαν τρισδιάστατα προσομοιώματα του συνολικού φορέα με τη χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων και τρισδιάστατα προσομοιώματα επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων των κρίσιμων τμημάτων του, με σκοπό την ακριβέστερη προσέγγιση της εντατικής τους κατάστασης. Στο σχήμα 2α παρουσιάζεται άποψη του τρισδιάστατου προσομοιώματος του συνολικού φορέα. Στο σχήμα 2β παρουσιάζεται το τρισδιάστατο προσομοίωμα επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων του βαθμιδοφόρου ενώ στο 2γ η κατανομή των τάσεων von Mises στο κεντρικό τμήμα του.

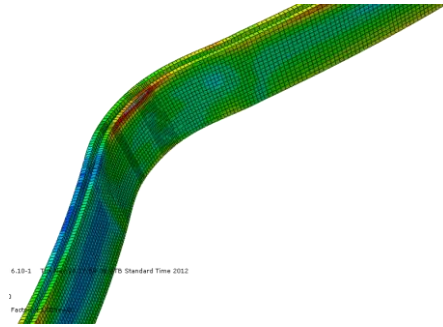
Ένα ιδιαίτερος κρίσιμο για τη συμπεριφορά του φορέα τμήμα του, είναι το κεντρικό πλατύσκαλο. Αυτό διότι εκτός των σχετικά μεγάλων διαστάσεων του πρέπει εκτός από τα σημαντικά φορτία επικάλυψης και κυκλοφορίας να υποστηρίζει και τους δύο εσωτερικούς βαθμιδοφόρους του ανώτερου τμήματος να έχει μικρή λυγηρότητα με το μέγιστο πάχος να περιορίζεται στα 50mm. Για το λόγο αυτό η συμπεριφορά του συγκεκριμένου τμήματος διερευνήθηκε μέσω αναλυτικών προσομοιωμάτων επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων με βάση τα αποτελέσματα των οποίων κατέστη δυνατή η βελτιστοποίηση τόσο της συμπεριφοράς όσο και της δομής του.



Σχ. 2(α). Απεικόνιση του τρισδιάστατου στατικού προσομοιώματος με γραμμικά Π.Σ.

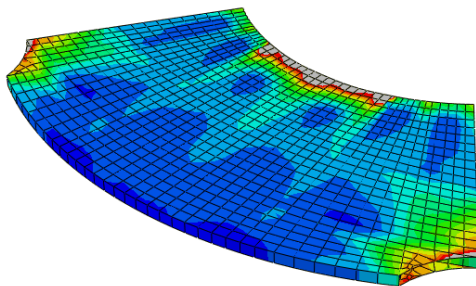


Σχ. 2(β). Προσομοίωμα Π.Σ του συνολικού προσομοιώματος του βαθμιδοφόρου.

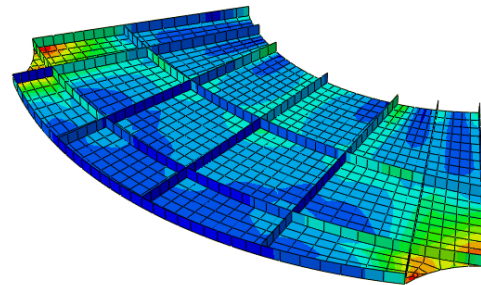


Σχ. 2(γ). Λεπτομέρεια της κατανομής τάσεων von Mises στο μέσο του βαθμιδοφόρου.

Στο σχήμα 3α παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises της εξωτερικής επιφάνειας του πλατύσκαλου ενώ στο 2β στο εσωτερικό και στις νευρώσεις του όπως προέκυψαν από την ανάλυση του αναλυτικού προσομοιώματος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.



Σχ. 3(α). Κατανομή των τάσεων von Mises στην εξωτερική επιφάνεια του πλατύσκαλου.



Σχ. 3(β). Κατανομή των τάσεων von Mises στην εσωτερική επιφάνεια του πλατύσκαλου.

#### 4. ΦΟΡΤΙΑ

Για την ανάλυση της κατασκευής ελήφθησαν υπόψη οι δράσεις από το ίδιο βάρος, τις επικαλύψεις, τα γυάλινα στηθαία και τα ωφέλιμα φορτία. Σημειώνεται ότι τα φορτία χρήσης (βηματισμός, γρήγορος βηματισμός κλπ.) αποτελούν δυναμικές καταπονήσεις στο φορέα. Από τη βιβλιογραφία [9] και [10] προκύπτει ότι η τιμή του στατικού φορτίου μπορεί μέχρι και να τριπλασιαστεί λόγω δυναμικής μεγέθυνσης. Με βάση τα παραπάνω εκτός από τις καθολικές δράσεις των ωφέλιμων φορτίων εξετάστηκαν και περιπτώσεις διάσπαρτων συγκεντρωμένων φορτίων επί των βαθμίδων προσαυξημένων με δυναμικό συντελεστή  $a_{v,h}$ .

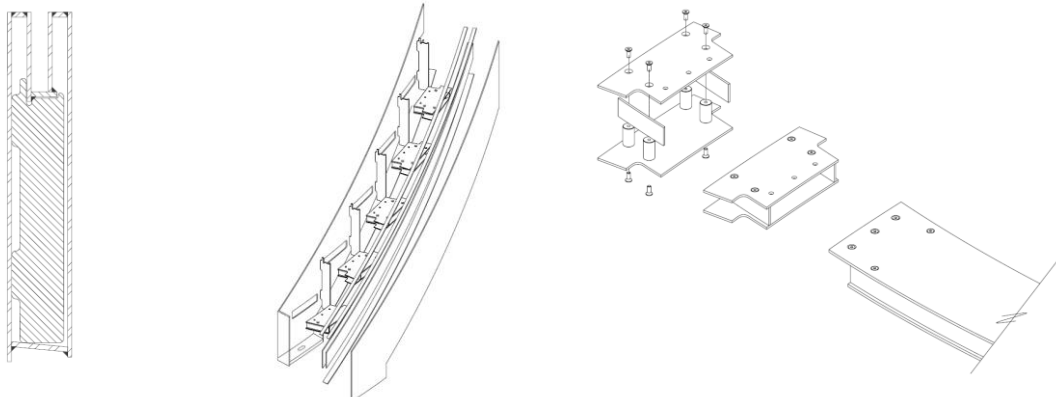
Σε κατασκευές δαπέδων και κλιμάκων κρίσιμη παράμετρος σχεδιασμού είναι αίσθηση άνεσης που αυτές έχουν κατά τη φάση λειτουργίας. Ο συνήθης τρόπος ελέγχου της επάρκειας σε φορτία λειτουργικότητας των δαπέδων είναι ο περιορισμός του βέλους (συνολικού και διακύμανσης) σε συγκεκριμένο ποσοστό του ενεργού ανοίγματος με τις επιτρεπόμενες τιμές να καθορίζονται από τους ισχύοντες κανονισμούς [2]. Στην περίπτωση των κλιμάκων δεν υπάρχουν ανάλογες διατάξεις και η αυθαίρετη προσαρμογή του ελέγχου στην προηγούμενη μεθοδολογία εμπεριέχει μεγάλο ποσοστό αβεβαιοτήτων. Ο ενδεδειγμένος για την περίπτωση τρόπος ελέγχου της επάρκειας σε λειτουργικότητα είναι μέσω του ελέγχου της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής. Η προτεινόμενη ελάχιστη τιμή για κλίμακες, με σκοπό να καλυφθεί η περιβάλλουσα των δράσεων (άνοδος, κάθοδος, γρήγορη διέλευση κλπ.), είναι τα 10 Hz. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η

ιδιοσυχνότητα της κλίμακας θα είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη της 3<sup>ης</sup> αρμονικής η οποία θεωρείται και η τελευταία κρίσιμη ως προς την αίσθηση άνεσης του χρήστη. Ο παραπάνω έλεγχος έγινε μέσω των αποτελεσμάτων της δυναμικής ανάλυσης που έγινε στο συνολικό προσομοίωμα του φορέα από τον οποίο προέκυψε τιμή ιδιοπεριόδου ίση με 16,93 Hz.

## 5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ

Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε ανοξείδωτος χάλυβας ποιότητας 316 κατά ASTM A240, που αντιστοιχεί στην ποιότητα 1.4401 του EN 1993-1-4 (με μηχανικά χαρακτηριστικά:  $f_y = 205 \text{ MPa}$ ,  $f_u = 520 \text{ MPa}$ ,  $E = 193000 \text{ MPa}$ ,  $\alpha = 15.9 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$ ). Πρόκειται για ωστενιτικό χάλυβα με πολύ μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα και σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο και χρώμιο ενώ η αντοχή του έναντι διάβρωσης είναι ιδιαίτερα υψηλή λόγω της περιεκτικότητας του σε μολυβδαίνιο. Αντιστοίχως οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ποιότητας A4.

Το σχήμα και οι επιμέρους λεπτομέρειες της κατασκευής καθιστούσαν αδύνατη την χρήση έτοιμων διατομών από το εμπόριο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι βαθμιδοφόροι των οποίων παρότι η διατομή τους μπορεί σε γενικές γραμμές να οριστεί ως κοίλη ορθογωνική, στην πραγματικότητα το σχήμα της διαφέρει κατά πολύ (Σχ.4α). Η αρχιτεκτονική λύση απαιτεί την ύπαρξη εγκοπής για την τοποθέτηση του γυάλινου στηθαίου στην άνω πλευρά, ενώ η κάτω πλευρά είναι ελαφρώς κεκλιμένη για να υποδέχεται το κρύσταλλο που οριοθετεί το χώρο κάτω από το κλιμακοστάσιο. Αντίστοιχα σχεδιαστικά προβλήματα αντιμετωπίστηκαν σχεδόν για το σύνολο των στοιχείων του φορέα.

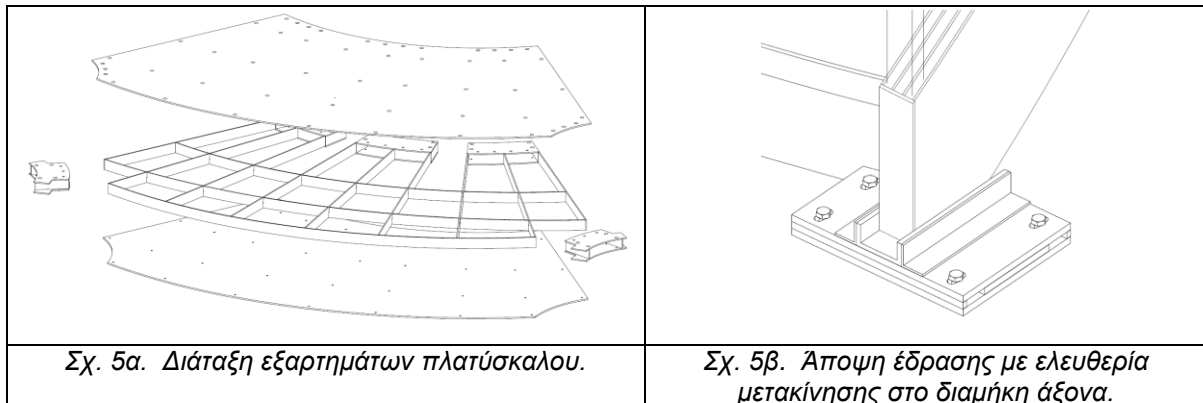


Σχ. 4α. Τυπική διατομή βαθμιδοφόρου. Σχ. 4β. Διάταξη εξαρτημάτων βαθμιδοφόρου. Σχ. 4γ. Εξαρτήματα τυπικής βαθμίδας.

Στο σχήμα 4β φαίνεται το ανάπτυγμα των εξαρτημάτων που αποτελούν τους βαθμιδοφόρους. Διακρίνεται η εσωτερική ενίσχυση της διατομής καθώς και οι προθήκες τοποθέτησης των βαθμίδων. Στο σχήμα 4γ φαίνεται η τυπική σύνδεση των βαθμίδων επί των βαθμιδοφόρων και το ανάπτυγμα της προθήκης η οποία είναι εντεταγμένη στην κύρια δοκό των βαθμιδοφόρων. Στο σχήμα 5α φαίνεται το ανάπτυγμα των εξαρτημάτων του κεντρικού πλατύσκαλου. Διακρίνονται οι οπές ευθυγράμμισης κατά τη φάση συναρμολόγησης στο εργοστάσιο καθώς και οι σχισμές για την συγκόλληση της κάτω πλάκας αυτού. Στο σχήμα 5β φαίνεται η μορφή της έδρασης της κλίμακας στο κατώτερο κατάστρωμα. Η συγκεκριμένη στήριξη επιτρέπει την ελεγχόμενη διαμήκη μετακίνηση του φορέα. Διακρίνεται η 'φωλιά' κίνησης του βαθμιδοφόρου στην ανώτερη πλευρά των ελασμάτων καθώς και τα τριμεταλλικά ελάσματα που απαιτούνται για την αποφυγή της



διάβρωσης στη σύνδεση μεταξύ διαφορετικών υλικών (αλουμίνιο, χάλυβας, ανοξείδωτος χάλυβας).

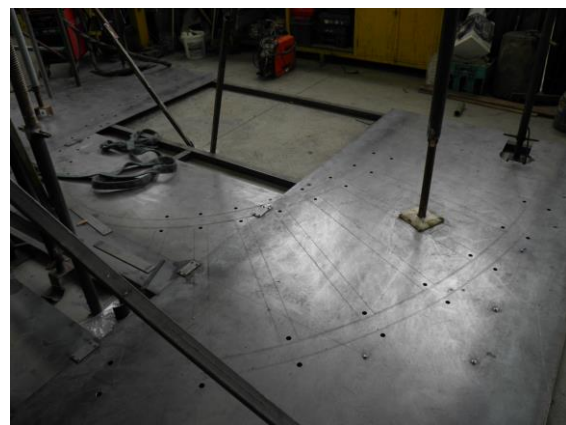


## 6. ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗ - ΑΝΕΓΕΡΣΗ

Η βιομηχανοποίηση των εξαρτημάτων και η μεθοδολογία συναρμολόγησης αποτέλεσαν τις βασικότερες παραμέτρους της μελέτης, λόγω του μεγέθους αλλά και της ιδιαιτερότητας του σχήματος της κλίμακας. Αφενός έπρεπε κατά την κατασκευή να εξασφαλιστεί η απόλυτη ακρίβεια της γεωμετρίας στο χώρο, αφετέρου δεν ήταν δυνατή η προκατασκευή μεγάλων τμημάτων της, λόγω της περιορισμένης πρόσβασης εντός της θαλαμηγού. Επιπρόσθετα κρίσιμο ήταν να μην γίνουν συγκολλήσεις στο εργοτάξιο σε καμία από τις εξωτερικές πλευρές της κλίμακας αφού αυτό θα είχε επιπτώσεις στο αισθητικό αποτέλεσμα. Λαμβανομένων υπόψη των παραπάνω περιορισμών αποφασίστηκε ο φορέας να αποτελείται από τέσσερις ομάδες εξαρτημάτων, τους κύριους εξωτερικούς βαθμιδοφόρους, τους δευτερεύοντες εσωτερικούς, το πλατύσκαλο και τις βαθμίδες τα οποία θα μεταφέρονταν προκατασκευασμένα στο χώρο του έργου όπου θα συνδέονταν μεταξύ τους. Πραγματοποιήθηκε αποτύπωση του χώρου τοποθέτησης η οποία εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του ακριβούς προσομοιώματος των θέσεων στήριξης στο εργοστάσιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως καλίμπρα για την συναρμολόγηση και προκατασκευή των προαναφερθέντων εξαρτημάτων (Σχ. 6α και 6β). Μετά την ολοκλήρωση της προκατασκευής ακολούθησε αποσυναρμολόγηση και μεταφορά των



Σχ. 6(α). Άποψη από τη φάση της προκατασκευής.



Σχ. 6(β). Άποψη της καλίμπρας.

τμημάτων στο ναυπηγείο όπου έγινε και η οριστική συναρμολόγηση του φορέα. Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών και πριν την υλοποίηση των προβλεπόμενων στο εργοτάξιο συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε αποτύπωση και έλεγχος της γεωμετρίας. Οι εργασίες στο φέροντα οργανισμό ολοκληρώθηκαν με το γυάλισμα των εμφανών τμημάτων (Σχ.7).



Σχ. 7. Απόψεις στη φάση κατασκευής..

Η βιομηχανοποίηση και η ανέγερση της κατασκευής έγινε από την εταιρεία ' ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΗΤΡΑΣ & ΣΙΑ Ε.Ε. '.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EN 1090-2: Execution of steel structures and aluminium structures
- [2] EN 1990 (Ευρωκώδικας 0): Βάσεις σχεδιασμού φερουσών κατασκευών, CEN, European Committee for Standardisation, 2004
- [3] EN 1991-1-1 , Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions -Densities, self-weight, imposed loads for buildings
- [4] EN 1991-1-5 ,Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-5: General actions- Thermal actions, CEN, European Committee for Standardisation, 2003.
- [5] 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.
- [6] EN 1993-1-4 ,Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-4:Supplementary rules for Stainless steels, CEN, European Committee for Standardisation, 2006.
- [7] EN 1993-1-5 ,Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5: Plated structural elements, CEN, European Committee for Standardisation, 2004.
- [8] EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints
- [9] ISO 10137:2007, Bases for design of structures — Serviceability of buildings and walkways against vibrations
- [10] S.C. Kerr, N.W.M. Bishop, 'Human induced loading on flexible staircases', Engineering Structures 23 (2001) 37–45

# **DESIGN AND CONSTRUCTION OF INTERNAL STAIRCASE OF A YACHT MADE OF STAINLESS STEEL**

**Andreas Spiliopoulos<sup>1</sup>**

**Maria-Eleni Dasiou<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Civil Engineers, PhD Candidates

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

e-mail: [spiliopa@central.ntua.gr](mailto:spiliopa@central.ntua.gr), [medasiou@mail.ntua.gr](mailto:medasiou@mail.ntua.gr)

## **ABSTRACT**

In the current paper the design and construction of a staircase connecting the two upper levels of a luxury yacht is presented. The architectural approach, which was focused on suiting the specific requirements of the owner, was very demanding in terms of both geometry and construction detailing. Thus the combination of the bearing structure made of stainless steel with the covering of the steps made of marble and the glass parapets generate the desired aesthetic result.