ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΡΘΟΜΑΡΜΑΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΦΛΟΙΟΥ ΣΤΟ ΝΕΟ ΚΤΙΡΙΟ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΓΓΕΜΑΡ ΑΕ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ

Ανδρέας Σπηλιόπουλος

Πολιτικός Μηχανικός Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>spiliopa@central.ntua.gr</u>

Μαρία-Ελένη Δασίου

Πολιτικός Μηχανικός Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών,

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: medasiou@mail.ntua.gr

Στέλλα Αυγερινού

Πολιτικός Μηχανικός Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail : <u>avgerinoustella@gmail.com</u>

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά τις ορθομαρμαρώσεις στο κέλυφος του νέου κτιριακού συγκροτήματος γραφείων της Anangel Maritime Group of Companies, ιδιοκτησίας ΑΓΓΕΜΑΡ ΑΕ, στην Αθήνα. Οι διαστάσεις, το σχήμα και η μορφή του κτιρίου, όπως προέκυψαν από τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του, επέβαλαν το σχεδιασμό και την ανάπτυξη νέων εξαρτημάτων στήριξης των οποίων η επάρκεια θα έπρεπε να πιστοποιηθεί. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πειραματικές διερευνήσεις που αφορούσαν τόσο την εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών των χρησιμοποιούμενων για την ορθομαρμάρωση υλικών (ανοξείδωτος γάλυβας, πλάκες φυσικών λίθων), όσο και την διερεύνηση της συμπεριφοράς και την εύρεση της αντοχής των μεταλλικών εξαρτημάτων και των συνδέσεων αυτών με τον κύριο φέροντα οργανισμό. Γίνεται αναφορά στο κανονιστικό πλαίσιο από το οποίο διέπονται αυτού του είδους οι κατασκευές. Παρουσιάζεται η μόρφωση των συστημάτων στήριξης και του δευτερεύοντος φέροντος οργανισμού που κατασκευάστηκε για το σκοπό αυτό, καθώς και οι απαιτούμενοι έλεγχοι αντοχής και λειτουργικότητας τόσο των πλακών ορθομαρμάρωσης όσο και των αντίστοιχων από ανοξείδωτο χάλυβα στηριγμάτων. Επίσης παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις, τα πειραματικά αποτελέσματα και οι αριθμητικές αναλύσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με το εξειδικευμένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υλοποίηση των ορθομαρμαρώσεων του εξωτερικού φλοιού του νέου κτιριακού συγκροτήματος γραφείων ιδιοκτησίας Anangel Maritime Group of Companies λόγω του ιδιαίτερου αρχιτεκτονικού σχήματος της κατασκευής απαιτούσε την αναζήτηση και ανάπτυξη νέων συστημάτων στήριξης. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε μελέτη για τον έλεγχο επάρκειας τόσο των πλακών ορθομαρμάρωσης (σε όλες τις κρίσιμες θέσεις) όσο και των αντίστοιχων από ανοξείδωτο χάλυβα στηριγμάτων τους, λαμβάνοντας υπόψη τους διαθέσιμους κανονισμούς καθώς και τις προδιαγραφές φορτίσεων και υλικών που προβλέπονται από την στατική μελέτη του έργου. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι πειραματικές διερευνήσεις που διεξήχθησαν στα πλαίσια της μελέτης στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ τόσο των χρησιμοποιούμενων υλικών όσο και των εξαρτημάτων, με σκοπό την εύρεση του καταλληλότερου μεταλλικού εξαρτήματος και συστήματος σύνδεσης αυτού με τον κύριο φέροντα οργανισμό, καθώς και οι αριθμητικές αναλύσεις για την διερεύνηση της συμπεριφοράς των πλακών της ορθομαρμάρωσης και ο έλεγχος της ράγας τοποθέτησης των εξαρτημάτων.



Φωτ. 1 Αεροφωτογραφία κτιριακού συγκροτήματος γραφείων

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 Ορθομαρμάρωση

Για την ορθομαρμάρωση του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε ο φυσικός μαρμάρινος λίθος 'BIANCO SIVEC', της εταιρείας Mermeren Kombinat AD Prileb. Τα απαραίτητα, για την ανάλυση και τον έλεγχο της αντοχής, μηχανικά χαρακτηριστικά ελήφθησαν από τα πιστοποιητικά, τα οποία είχαν εκδοθεί βάση πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο 'Video Marmoteca-Laboratorio Prove' στην Ιταλία, τον Αύγουστο και το Σεπτέμβριο του 2014. Οι δοκιμές αφορούσαν την εύρεση της καμπτικής αντοχής, της θλιπτικής αντοχής, της απορροφητικότητας, της αντοχής σε θραύση σε περιοχή οπής στήριξης, της αντοχής σε τριβή καθώς και τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας του υλικού. Οι τιμές σχεδιασμού των αντοχών του φυσικού λίθου υπολογίστηκαν

απομειώνοντας τις δοθείσες χαρακτηριστικές τιμές του υλικού με τον συντελεστή aexp, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις κλιματικές επιρροές στην αντοχή του φυσικού λίθου, και με τον συντελεστή ασφαλείας υλικού γΜ, ο οποίος λαμβάνει υπόψη το χρονικό διάστημα μεταξύ της πραγματοποίησης των πειραμάτων και της μελέτης καθώς και τον συντελεστή μεταβλητότητας των πειραματικών τιμών.

3.2 Εξεταζόμενο σύστημα στήριξης

Το υπό εξέταση εξάρτημα στήριξης κατασκευάζεται από την εταιρεία Ergofix και αποτελεί το συνδετικό μέσο των πλακών της ορθομαρμάρωσης με τα φέροντα στοιχεία του κτιρίου. Το σύστημα μπορεί να φέρει φορτία τόσο κατά την κατακόρυφη όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση και η σχεδίασή του παρέχει, κατά τη φάση κατασκευής, τη δυνατότητα ρύθμισης και στις τρείς διευθύνσεις. Πιο αναλυτικά το εξάρτημα αποτελείται από (Σχήμα 1) (α) Τον κύριο φορέα μορφής Γ που φέρει τον πείρο πεπλατυσμένης κεφαλής διατομής Ø10, (β) Το έλασμα στερέωσης σχήματος Π, (γ) Τον πείρο στερέωσης, διατομής Ø6, (δ) Τον κοχλία σύσφιξης διατομής Μ6, (ε) την ορθογώνια πλάκα ασφάλισης και (στ) τον πείρο σύνδεσης των πλακών του μαρμάρου με τον πείρο πεπλατυσμένης κεφαλής διατομής Ø5. Το εξάρτημα συνδέεται με τον φέροντα οργανισμό του κτιρίου μέσω διάτρητης μεταλλικής ράγας στερέωσης διατομής Π, η οποία τοποθετείται στην κατακόρυφη διεύθυνση. Το 'τρυπολόγιο' της ράγας επιτρέπει την επιλογή της καθ΄ ύψος θέσης στήριξης με εύρος ±10mm, ενώ το πλάτος της επιτρέπει την ρύθμιση ως προς την οριζόντιο με εύρος ±10mm. Η σύνδεση του κύριου φορέα μορφής Γ με τη ράγα στερέωσης γίνεται μέσω του ελάσματος στερέωσης Π (β) και του πείρου στερέωσης διατομής Ø6 (γ). Η σταθεροποίηση των παραπάνω γίνεται μέσω της ορθογώνιας πλάκας ασφάλισης (ε). Η συγκεκριμένη πλάκα μέσω των διαγώνιων επιμήκων οπών επιτρέπει την τελική μικρόρύθμιση ακρίβειας ±5mm στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η τελική σύσφιξη του εξαρτήματος γίνεται μέσω του κοχλία σύσφιξης διατομής Μ6 μετά την ολοκλήρωση των μικρό-ρυθμίσεων (δ). Η σύνδεση των πλακών της ορθομαρμάρωσης με το εξάρτημα στήριξης γίνεται μέσω του πείρου σύνδεσης (στ).



Σχήμα 1. Εξαρτήματα του εξαρτήματος τύπου Τ1 μετά την ολοκλήρωση πειράματος της σειράς δοκιμών 2.

Στον αρχικό σχεδιασμό από την εταιρεία Ergofix προβλεπόταν ο πείρος πεπλατυσμένης κεφαλής να έχει λείο άξονα και η ολίσθηση κατά την εγκάρσια διεύθυνση να δεσμεύεται από έναν κωνικό κοχλία. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε ένας δεύτερος τύπος εξαρτήματος, ο οποίος διαφοροποιείται από τον πρώτο ως προς την περαιτέρω δυνατότητα μικρόρυθμίσεων που προσφέρει μέσω του σπειρώματος που έχει πλέον προστεθεί στον άξονα του πείρου πεπλατυσμένης κεφαλής (Σχήμα 2). Τέλος, εξετάστηκε και ένας ακόμα τύπος, στον οποίο εκτός από τον ρυθμιζόμενο πείρο πεπλατυσμένης κεφαλής έχει αντικατασταθεί ο πείρος στερέωσης και ο κοχλίας σύσφιξης με ένα κοχλία M8, ο οποίος συνδέει το εξάρτημα απευθείας στη ράγα στερέωσης (Σχήμα 3). Για λόγους συντομίας οι τρείς διαφορετικές παραλλαγές συστημάτων θα αναφέρονται εφεξής ως T1, T2 και T3.



Σχήμα 2. (α) Λείος άζονας στήριξης στον τύπο Τ1 και (β) άζονας στήριξης με σπείρωμα στον τύπο Τ2.



Σχήμα 3. Διαφοροποίηση των τύπων Τ2 (α) και Τ3 (β) λόγω δέσμευσης ως προς την εγκάρσια διεύθυνση δια μέσου πείρου ή κοχλία

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν είχαν ως σκοπό την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας του εξαρτήματος στήριξης, όπως αυτό περιγράφεται ανωτέρω, και δεν περιλαμβάνουν την αγκύρωση της ράγας στερέωσης στον φέροντα οργανισμό του εκάστοτε κτιρίου και τη σύνδεση των πλακών μαρμάρου στον πείρο σύνδεσης.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

4.1 Υλικά

4.1.1 Ανοξείδωτος χάλυβας ελασμάτων – Δοκιμές εφελκυσμού

Με σκοπό την διακρίβωση των βασικών μηγανικών χαρακτηριστικών του ανοξείδωτου χάλυβα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των εξαρτημάτων στήριξης (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε διαρροή και θραύση) πραγματοποιήθηκαν πέντε (5) δοκιμές μονοαξονικής φόρτισης σε μηχανή δοκιμών θλίψεως - εφελκυσμού (universal testing machine) τύπου INSTRON 300LX, στην οποία η δύναμη επιβάλλεται στο δοκίμιο μέσω υδραυλικού εμβόλου με επενεργητή ικανότητας 300 kN (Σχήμα 4α). Οι καταγραφές, οι οποίες λαμβάνονται μέσω του λογισμικού Instron Bluehill Material Testing Software (version 2.15), περιλαμβάνουν την εξασκούμενη από τη δυναμοκυψέλη δύναμη της συσκευής στατικής φορτίσεως και την παραμόρφωση στην κατάλληλα διαμορφωμένη περιοχή των δοκιμίων μέσω ηλεκτρονικού μηκυνσιομέτρου (LVDT). Το μέγιστο μήκος καταγραφής του LVDT είναι 50mm με ακρίβεια μέτρησης ±0,5%. Το υλικό, βάσει των προδιαγραφών του κατασκευαστή είναι ανοξείδωτος χάλυβας κατηγορίας 304 (κατάταξη EN 1.4301 Type 304L) με ονομαστικό όριο διαρροής $f_y = 230$ MPa και όριο θραύσης $f_u =$ 540 MPa. Από τα πειράματα, και λαμβάνοντας υπόψη ότι για μέταλλα χωρίς σαφώς καθορισμένο όριο διαρροής το συμβατικό όριο διαρροής ορίζεται ως η τάση που αντιστοιγεί σε παραμένουσα παραμόρφωση 0.2%, προέκυψε τάση διαρροής $f_{v0.2\%} \approx 270$ ΜΡα. Στο Σχήμα 4β δίνονται τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων των πέντε δοκιμίων και παρατηρείται πολύ παραπλήσια συμπεριφορά μεταξύ τους.



Σχήμα 4. (α) Πειραματική διάταξη και (β) διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων

4.1.2 Ανοξείδωτος χάλυβας πείρου – Δοκιμές εφελκυσμού

Στην ίδια μηχανή δοκιμών θλίψεως - εφελκυσμού, της οποίας τα χαρακτηριστικά έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 4.1.1, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε 3 δοκίμια, πανομοιότυπα με τον πείρο που θα χρησιμοποιηθεί στις συνδέσεις των εξαρτημάτων στήριξης (Σχήμα 5α). Το κυκλικό σχήμα των δοκιμίων δεν επιτρέπει την διαμόρφωση τους με σκοπό τη δημιουργία μιας λεπτότερης ασθενούς περιοχής, στην οποία θα οδηγηθεί η αστοχία, και για το λόγο αυτό δε χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτρονικό μηκυνσιόμετρο. Για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων χαράσσεται πριν τη δοκιμή εφελκυσμού, το δοκίμιο ανά 10mm σε όλο το μήκος του. Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος επιλέγεται και γίνεται μέτρηση σε τμήμα της ράβδου που αντιστοιχεί σε 10 διαστήματα, και σε συνδυασμό με την καταγραφή της μετακίνησης της μηχανής, υπολογίζεται η παραμόρφωση. Από τα πειράματα, και λαμβάνοντας και πάλι υπόψη ότι για μέταλλα χωρίς σαφώς καθορισμένο όριο διαρροής το συμβατικό όριο διαρροής ορίζεται ως η τάση που αντιστοιχεί σε παραμένουσα παραμόρφωση 0.2%, προκύπτει τάση διαρροής $f_{y0.2}\% \approx 650$ MPa. Από τα παραπάνω αποτελέσματα το υλικό του πείρου κατατάσσεται σε ανοξείδωτο χάλυβα κατηγορίας 80 (βάσει EN ISO 3506) με ονομαστικές αντοχές $f_y = 600$ MPa και $f_u = 800$ MPa. Στο Σχήμα 5β δίνονται τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων.



Σχήμα 8. (α) Πειραματική διάταζη και (β) Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίων

4.2 Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς των τριών προτεινόμενων τύπων

Με σκοπό την επιλογή του καταλληλότερου τύπου στηρίγματος εκ των τριών προτεινόμενων, όπως αυτοί περιγράφηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 3.2, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις σειρές τα οποία σχεδιάστηκαν με στόχο τη διερεύνηση της συμπεριφοράς και την εύρεση του μηχανισμού αστοχίας των τριών προτεινόμενων τύπων εξαρτημάτων στήριξης.

4.2.1 Πειραματική δοκιμή πείρου στήριξης μαρμάρων

Η πρώτη σειρά πειραμάτων αφορά μόνο τον πείρο σύνδεσης και τον αντίστοιχο άξονα στήριξης του. Το τμήμα αυτό κρίθηκε απαραίτητο να εξεταστεί ξεχωριστά, καθώς χρησιμοποιείται σε όλους τους τύπους εξαρτημάτων ως το μέσο σύνδεσης των μαρμάρων με το υπόλοιπο μηχανισμό και ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας του αποτελεί σημαντικό στοιχείο, ώστε να μπορούν εν συνεχεία να αξιολογηθούν ανεξάρτητα αυτού οι τύποι εξαρτημάτων. Στο Σχήμα 6(α) δίνεται το τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα και άποψη της πειραματικής διάταξης, ενώ στο Σχήμα 6(γ) δίνονται οι καμπύλες δύναμης – παραμόρφωσης της εν λόγω δοκιμής.



Σχήμα 6. (α) Τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, (β) άποψη της πειραματικής διάταζης της πρώτης σειράς πειραμάτων και (γ) διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης πειραμάτων πείρου σύνδεσης και του αντίστοιχου άζονα στήριζης του με τα λοιπά τμήματα του μηχανισμού.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στην μηχανή δοκιμών τύπου INSTRON 300LX με τη χρήση κατάλληλου μεταλλικού εξαρτήματος, το οποίο προσομοίωσε τις πλάκες της ορθομαρμάρωσης. Η τοποθέτηση του δοκιμίου έγινε στην κατακόρυφη διεύθυνση. Ο άξονας του πείρου πεπλατυσμένης κεφαλής και το εξάρτημα προσομοίωσης της ορθομαρμάρωσης συνδέθηκαν στην άνω και στην κάτω αρπάγη της μηχανής αντίστοιχα.

4.2.2 Πειραματική δοκιμή εξαρτήματος στήριξης μαρμάρων

Για τους τρείς, περιγραφόμενους αναλυτικά στην παράγραφο 3.2, τύπους εξαρτημάτων, πραγματοποιήθηκαν τρείς σειρές πειραμάτων, με σκοπό την συγκριτική αξιολόγηση τους τόσο ως προς την αντοχή, αλλά και ως προς τη συμπεριφορά και το μηχανισμό αστοχίας τους, όταν υπόκεινται σε κατακόρυφα φορτία (σειρά δοκιμών 2), οριζόντια φορτία (σειρά δοκιμών 3) και σε συνδυασμένη κατακόρυφη και οριζόντια φόρτιση (σειρά δοκιμών 4). Στο Σχήμα 7 φαίνεται η πειραματική διάταξη για τη σειρά πειραμάτων 2, όπου ασκείται φορτίο στην κατακόρυφη διεύθυνση για τους τύπους T1, T2 και T3 αντίστοιχα. Στο Σχήμα 8(α) δίνεται η εικόνα των εξαρτημάτων του τύπου T1 μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, στην οποία διακρίνεται η αστοχία του άξονα στήριξης σε ολίσθηση. Για τον τύπο T2 φαίνεται στο Σχήμα 8(β) ότι δεν υπάρχει αστοχία στον πείρο σύνδεσης με τις μαρμάρινες πλάκες ή στον άξονα αυτού, αλλά στα ελάσματα (τοπικός λυγισμός) και στον πείρο σύνδεσης (μεταξύ των μεταλλικών στοιχείων) σε κάμψη. Αντίστοιχα, από την εικόνα των εξαρτημάτων του τύπου T3 μετά την ολοκλήρωση της αντίστοιχης δοκιμής, που δίνεται στο Σχήμα 8(γ), η αστοχία περιορίζεται στον τοπικό λυγισμό των ελασμάτων. Οι καμπύλες δύναμης – παραμόρφωσης που προκύπτουν και για τους τρείς τύπους στήριξης δίνονται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 7. Πειραματική διάταξη για τον τύπο (α) Τ1, (β) Τ2 και (γ) Τ3 στη σειρά δοκιμών 2.



Σχήμα 8. .Εξαρτήματα του τύπου (α) Τ1, (β) Τ2 και (γ) Τ3 μετά την ολοκλήρωση πειράματος.



Σχήμα 9. Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης σειράς δοκιμών 2.

Η πειραματική διάταξη για τη σειρά δοκιμών 3, όπου ασκείται φορτίο στην οριζόντια διεύθυνση, δίνεται στο Σχήμα 10(α) για τον τύπο T1, στο Σχήμα 10(β) για τον τύπο T2 και στο Σχήμα 10(γ) για τον τύπο T3. Στο Σχήμα 11(α) δίνεται η εικόνα των εξαρτημάτων του τύπου T1 μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, στην οποία διακρίνεται η αστοχία του άξονα στήριξης σε ολίσθηση. Για τον τύπο T2 φαίνεται στο Σχήμα 11(β) ότι δεν υπάρχει αστοχία στον πείρο σύνδεσης με τις μαρμάρινες πλάκες ή στον άξονα αυτού, αλλά στα ελάσματα (τοπικός λυγισμός) και στον πείρο σύνδεσης (μεταξύ των μεταλλικών στοιχείων) σε κάμψη. Αντίστοιχα, από την εικόνα των εξαρτημάτων του τύπου T3 μετά την ολοκλήρωση της αντίστοιχης δοκιμής, που δίνεται στο Σχήμα 11(γ), η αστοχία περιορίζεται στον τοπικό λυγισμό των ελασμάτων. Οι καμπύλες δύναμης – παραμόρφωσης που προκύπτουν και για τους τρείς τύπους στήριξης δίνονται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 10. Πειραματική διάταξη για τον τύπο (α) Τ1, (β) Τ2 και (γ) Τ3 στη σειρά δοκιμών 3.



Σχήμα 11. Εξαρτήματα του τύπου (α) Τ1, (β) Τ2 και (γ) Τ3 μετά την ολοκλήρωση πειράματος της σειράς δοκιμών 3.



Σχήμα 12. Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης σειράς δοκιμών 3.

Στο Σχήμα 13 φαίνεται η πειραματική διάταξη για τη σειρά πειραμάτων 4, όπου λόγω της γωνίας τοποθέτησης των δοκιμίων ασκείται σε αυτά φορτίο στην κατακόρυφη και στην οριζόντια διεύθυνση. Στο Σχήμα 14(α) δίνεται η εικόνα των εξαρτημάτων του Τ1 μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, στην οποία διακρίνεται η αστοχία του άξονα στήριξης σε ολίσθηση. Για τον τύπο Τ2 φαίνεται στο Σχήμα 14(β) ότι δεν υπάρχει αστοχία στον πείρο σύνδεσης με τις μαρμάρινες πλάκες ή στον άξονα αυτού, αλλά στα ελάσματα (τοπικός λυγισμός) και στον πείρο σύνδεσης (μεταξύ των μεταλλικών στοιχείων) σε κάμψη. Αντίστοιχα, από την εικόνα των εξαρτημάτων του τύπου Τ3 μετά την ολοκλήρωση της αντίστοιχης δοκιμής, που δίνεται στο Σχήμα 14(γ), η αστοχία περιορίζεται στον τοπικό λυγισμό των ελασμάτων. Οι καμπύλες δύναμης – παραμόρφωσης που προκύπτουν και για τους τρείς τύπους εξαρτημάτων δίνονται στο Σχήμα 15. Από τις τρεις σειρές πειραμάτων είναι σαφές ότι η συμπεριφορά του τύπου Τ1 κρίνεται ως μη επιθυμητή λόγω του κρίσιμου μηγανισμού αστογίας που είναι η αστογία του άξονα στήριξης σε ολίσθηση. Αντιθέτως οι τύποι Τ2 και Τ3 παρουσίασαν παραπλήσια συμπεριφορά, μηχανισμό αστοχίας και αντοχή και στις τρείς σειρές πειραμάτων, και κρίνονται και οι δύο ως απόδεκτοί. Ως καταλληλότερος επιλέγεται ο τύπος Τ2 ο οποίος παρουσιάζει πιο πλάστιμη συμπεριφορά και ικανοποιητική δυσκαμψία (αντίστοιγη του τύπου Τ1), δίνοντας όμως τη δυνατότητα ακριβέστερης ρύθμισης ως προς το διαμήκη άξονα.



Σχήμα 13. Πειραματική διάταξη για τον τύπο (α) Τ1, (β) Τ2 και (γ) Τ3 στη σειρά δοκιμών 4.



Σχήμα 14. Εξαρτήματα του τύπου (α) Τ1, (β) Τ2 και (γ) Τ3 μετά την ολοκλήρωση πειράματος της σειράς δοκιμών 4.



Σχήμα 15. Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης σειράς δοκιμών 4.

4.2.3 Πειραματικές δοκιμές εξαρτημάτων στήριξης

Με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής σχεδιασμού του επιλεχθέντος τύπου στήριξης (τύπος 2), για τις τρείς πιθανές περιπτώσεις φόρτισης αυτού, πραγματοποιήθηκαν τρείς σειρές πειραμάτων στη μηχανή δοκιμών θλίψεως - εφελκυσμού. Ζητούμενο των προαναφερθέντων πειραμάτων ήταν ο στατιστικός προσδιορισμός της αντοχής Fra του εξαρτήματος, για φορτία παράλληλα και εγκάρσια ως προς τη ράγα στήριξης αυτού. Τα πρώτα φορτία αντιστοιχούν σε φορτία βαρύτητας και κατακόρυφες ταλαντώσεις, ενώ τα δεύτερα σε ανεμοπιέσεις και οριζόντιες ταλαντώσεις. Στο Σχήμα 16(α) φαίνεται η πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κατακόρυφα φορτία Fy.Rd. Η συγκεκριμένη δοκιμή πραγματοποιήθηκε για τρείς διαφορετικές θέσεις του ρυθμιζόμενου buzzon στήριξης με σκοπό να διερευνηθεί η επιρροή του στην συνολική αντοχή του εξαρτήματος. Στην πρώτη περίπτωση έγινε δοκιμή για την μικρότερη δυνατή έκταση του buzzon σε σχέση με τον κορμό της ράγας στήριξης που αντιστοιχεί σε απόσταση 75mm. Στη δεύτερη περίπτωση έγινε δοκιμή για τη μέγιστη δυνατή έκταση του buzzon σε σχέση με τον κορμό της ράγας στήριξης που αντιστοιχεί σε απόσταση 110mm. Και στην τρίτη περίπτωση έγινε δοκιμή για ενδιάμεση θέση του buzzon σε σχέση με τον κορμό της ράγας στήριξης που αντιστοιχεί σε απόσταση 95mm. Στο Σχήμα 16(β) και 16(γ) φαίνεται η πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της αντοχής σε οριζόντια, θλιπτικά (Fe,Rd) και εφελκυστικά (Ft,Rd) αντίστοιχα, φορτία ως προς το εξάρτημα στήριξης. Τα πρώτα αντιστοιχούν σε ανεμοπιέσεις προς το εσωτερικό του εκάστοτε κτιρίου, ενώ τα δεύτερα σε αναρροφήσεις. Οι καμπύλες δύναμης - παραμόρφωσης που προκύπτουν και για τις τρείς διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης δίνονται Σχήμα 17.



Σχήμα 16. Πειραματική διάταζη για τον προσδιορισμό της αντοχής (α) σε κατακόρυφα φορτία F_{V,Rd}, (β) σε οριζόντια θλιπτικά φορτία F_{c,Rd} και (γ) σε οριζόντια εφελκυστικά φορτία F_{T,Rd}.



Σχήμα 17. Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης για (α) κατακόρυφα φορτία $F_{V,Rd}$, (β) οριζόντια θλιπτικά φορτία $F_{c,Rd}$ και (γ) οριζόντια εφελκυστικά φορτία $F_{T,Rd}$.

4.2.4 Πειραματικές δοκιμές εξαρτημάτων στήριξης

Με βάση τα παραπάνω έγινε στατιστική επεξεργασία των πειραματικών καμπυλών και λήφθησαν τα αποτελέσματα των αντοχών F_{Rd} ανά τύπο φόρτισης για τις παραπάνω εύλογες τιμές μέγιστης αποδεκτής παραμόρφωσης. Δεδομένου ότι οι προτεινόμενες τιμές αντοχής καθορίζονται από απαιτήσεις λειτουργικότητας και είναι αισθητά μικρότερες από τις αντίστοιχες οριακές τιμές, σε συνδυασμό με την πλάστιμη συμπεριφορά, εκτιμάται ότι δεν θα υπάρχει ευαισθησία του εξαρτήματος σε θέματα κόπωσης η οποία και δεν αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσας διερεύνησης. Στους πίνακες 1, 2 και 3 φαίνεται η στατιστική επεξεργασία των πειραμάτων και η τελική τιμή αντοχής F_{Rd} για αντοχή σε κατακόρυφα φορτία, οριζόντια θλιπτικά φορτία και οριζόντια εφελκυστικά φορτία αντίστοιχα. Οι τιμές αντοχής ισχύουν για τα όρια των 3mm και τα 5mm όπως αυτά προαναφέρονται και θα πρέπει να προσαρμόζονται κατάλληλα αν οι αποδεκτές παραμορφώσεις είναι διαφορετικές.

	Δοκίμιο	x _i =F[kN]	x _m	(x-x _m) ²	Τυπ.απόκλιση σ _x	Διακύμανση (σ _x) ²	Συντ. Μεταβλητότητας ν _x	k,	k _d	Λογαριθμικό F _{5%} [kN]	Συντελεστής ασφαλείας γ _Μ	Τιμή σχεδιασμού F _{v,rd} [kN]
	1	1.56	1.55	0.0001	0.019	0.00036	0.012	3.15	4.83	1.49	1.02	1.46
	2	1.54		0.0001								
	3	1.57		0.0005								
I	4	1.53		0.0003								
- [5	1.54		0.0001								

Πίνακας 1. Στατιστική επεξεργασία και τελική τιμή αντοχής FV,Rd για κατακόρυφα φορτία και επιτρεπόμενη παραμόρφωση 3mm.

Δοκίμιο	x _i =F[kN]	×m	(x-x _m) ²	Τυπ.απόκλιση σ _x	Διακύμανση (σ _x) ²	Συντ. Μεταβλητότητας ν _x	ks	k _d	Λογαριθμικό F _{5%} [kN]	Συντελεστής ασφαλείας γ _Μ	Τιμή σχεδιασμού F _{c,Rd} [kN]
1	3.29		0.007	0.061	0.0037	0.018	2.10	3.80	3.24	1.03	3.14
2	3.40		0.001								
3	3.40		0.001								
4	3.45		0.007								
5	3.42	1 2 27	0.002								
6	3.37	3.57	0.000								
7	3.38		0.000								
8	3.38		0.000								
9	3.25		0.014								
10	3.35		0.001								

Πίνακας 2. Στατιστική επεξεργασία και τελική τιμή αντοχής Fc,Rd για οριζόντια θλιπτικά φορτία και επιτρεπόμενη παραμόρφωση 5mm.

Δοκίμιο	x _i =F[kN]	x _m	(x-x _m) ²	Τυπ.απόκλιση σ _x	Διακύμανση (σ _x) ²	Συντ. Μεταβλητότητας ν _*	k _s	k _d	Λογαριθμικό F _{5%} [kN]	Συντελεστής ασφαλείας Υм	Τιμή σχεδιασμού F _{t.Rd} [kN]
1	2.41		5.290E-04	0.018	0.0003	0.007	2.10	3.80	2.35	1.01	2.32
2	2.38		4.900E-05								
3	2.37		2.890E-04								
4	2.38	2.39	4.900E-05								
5	2.40		1.690E-04								
6	2.36		7.290E-04								
7	2.40		1.690E-04								
8	2.39		9.000E-06								
9	2.41		5.290E-04								
10	2.37		2.890E-04								

Πίνακας 3. Στατιστική επεξεργασία και τελική τιμή αντοχής FT,Rd για οριζόντια εφελκυστικά φορτία και επιτρεπόμενη παραμόρφωση 5mm.

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΤΗΣ ΟΡΘΟΜΑΡΜΑΡΩΣΗΣ

Η προσομοίωση των πλακών ορθομαρμάρωσης υλοποιήθηκε με χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού ABAQUS μέσω χωρικών τετραεδρικών πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος των συγκεκριμένων αναλύσεων είναι η εύρεση της εντατικής κατάστασης των μαρμάρινων λίθων με σκοπό τον έλεγχο της επάρκειας τους. Στην παρούσα προσομοίωση δεν συμπεριλήφθηκε το εξάρτημα της σύνδεσης στο σύνολο του, αλλά μόνο ο πείρος. Η σύνδεση του πείρου και του μαρμάρου προσομοιώθηκε με στοιχεία επαφής (contact elements), με ιδιότητες μη επιτρεπτής εισχώρησης των δύο συνδεόμενων μελών στην ορθή διεύθυνση και τριβής στην εγκάρσια ενώ η επίλυση έγινε με θεωρία Β΄ ταξεως. Στο Σγήμα 18 δίνεται η τυπική διακριτοποίηση του στατικού προσομοιώματος πλάκας μαρμάρου όπου διακρίνεται ο πείρος στήριξης και η πύκνωση των χωρικών πεπερασμένων στοιχείων στις θέσεις στήριξης. Η ανάλυση έγινε σε δύο στάδια φόρτισης, ασκώντας αργικώς το φορτίο του ίδιου βάρους και εν συνεχεία την πίεση/υποπίεση ανέμου. Κατά τη πρώτη φάση φόρτισης το φορτίο του ίδιου βάρους παραλαμβάνεται από τους δύο κατώτερους πείρους, αφού οι δύο ανώτεροι είναι ανενεργοί μέσω των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών που γρησιμοποιούνται στην ανάλυση. Κατά τη δεύτερη φάση φόρτισης (πγ. πίεση ανέμου) ενεργοποιούνται και οι ανώτεροι πείροι και τα επιπλέον φορτία παραλαμβάνονται και από τις τέσσερις θέσεις στήριξης. Σημειώνεται ότι η τελική εντατική κατάσταση της πρώτης φάσης αποτελεί την αφετηρία για τη δεύτερη φάση φόρτισης. Λόγω της μορφής και της γεωμετρίας του κτιρίου, οι διαστάσεις των πλακών ορθομάρμαρωσης διαφοροποιούνται ανάλογα με το τμήμα τοποθέτησης τους. Οι συνήθεις διαστάσεις είναι 1100x600x30mm, 600x600x30mm και 300x1200x30mm, ενώ σε ορισμένες θέσεις υπάρχουν πλάκες διαστάσεων είναι 1800x600x30mm, 1400x650x30mm, 1545x600x30, 1105x665x30, 1200x650x30 και 1200x650x50. Προσομοιώθηκαν και αναλύθηκαν έξι (6) διαφορετικές διαστάσεις πλακών. Η επιλογή τους έγινε με βάση το μέγεθος το οποίο είναι ανάλογο της εντατικής κατάστασης αλλά και της γωνίας τοποθέτησης σε σχέση με την κατακόρυφο. Στον πίνακα 4 φαίνονται οι διαστάσεις πλακών καλύπτονται από τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων αναλύσεων. Συνεπώς η ανάλυση των μαρμάρων με διαστάσεις μικρότερες από 1200x650x30 για επίπεδη και για κεκλιμένη τοποθέτηση καλύπτεται από αυτή της συγκεκριμένως διάστασης. Στο σχήμα 19 δίνεται μια τυπική γραφική απεικόνιση από τα αποτελέσματα των αναλύσεων.



Σχήμα 18. Διακριτοποιήση προσομοιώματος πλακών μαρμάρου.



Σχήμα 19. Τυπική γραφική απεικόνιση ροής κύριων τάσεων λόγω ανεμοφόρτισης.

6. ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΑΓΑΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Για τον προσδιορισμό της αντοχής και του ελέγχου επάρκειας του μηχανισμού στήριξης των πλακών ορθομαρμάρωσης, κρίθηκε σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνηση της αντοχής και επάρκειας της ράγας τοποθέτησης των ως άνω αναφερόμενων εξαρτημάτων με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Από τα αποτελέσματα των καθολικών αναλύσεων της κατασκευής στήριξης της ορθομαρμάρωσης που για λόγους συντομίας δεν παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία προσδιορίστηκε η καθολική συμπεριφορά των ραγών ανά περίπτωση καθώς και η αναμενόμενη μέγιστη εντατική κατάσταση. Δημιουργήθηκαν τρία (3) προσομοιώματα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία τα οποία αντιστοιχούν σε δύο κατακόρυφες θέσεις ορθομαρμάρωσης και μία τυπική κεκλιμένη τύπου στηθαίου (Σχήμα 19). Οι θέσεις επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελούν αφ΄ενός τυπική περίπτωση αφετέρου να καταπονούνται με τα μέγιστα προβλεπόμενα φορτία. Για τα εν λόγω προσομοιώματα πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση τόσο ως προς τη γεωμετρία όσο και ως προς το υλικό. Ελήφθησαν υπόψη αρχικές ατέλειες ίσες με L/250, με βάση την πρώτη ιδιομορφή λυγισμού για εγκάρσια φόρτιση ανέμου, οι οποίες εφαρμόσθηκαν στον φορέα στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης. Η προηγούμενη παραμορφωμένη γεωμετρία χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των ραγών στη φάση λειτουργίας. Η επάρκεια της διατομής έγινε μέσω ελέγχου τάσεων με όριο την τάση διαρροής του ανοξείδωτου χάλυβα ποιότητας 304. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων αποδεικνύεται η επάρκεια των ραγών τόσο στην οριακή κατάσταση αστοχίας όσο και λειτουργικότητας. Στο Σχήμα 20 δίνονται η διακριτοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης και τα τυπικά γραφικά αποτελέσματα για έναν τύπο ράγας.



Σχήμα 20. Γεωμετρία των τριών προσομοιωμάτων για κατακόρυφη και κεκλιμένη στήριζη.



Σχήμα 21 Διακριτοποίηση προσομοιώματος και κατανομή τάσεων v.Mises

7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των υπό εξέταση συστημάτων ορθομαρμάρωσης, έναντι κατακόρυφων και οριζόντιων στατικών φορτίων, προέκυψαν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

• Ο σχεδιασμός εξαρτήματος τύπου 2, εμφανίζει πλάστιμη συμπεριφορά και ταυτόχρονα ικανοποιητική δυσκαμψία, δίνοντας παράλληλα τη δυνατότητα ακριβέστερης ρύθμισης ως προς το διαμήκη άξονα.

• Σε καμία περίπτωση φόρτισης δεν εμφανίζεται ψαθυρή αστοχία σε οποιοδήποτε επιμέρους εξάρτημα της σύνδεσης, συμπέρασμα που ισχύει για όλους τους εξετασθέντες τύπους εξαρτήματος.

• Ο πείρος στήριξης των μαρμάρων παρουσιάζει σημαντική υπεραντοχή και παραμένει στην ελαστική περιοχή λειτουργίας για υψηλές, σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία του εξαρτήματος, τιμές φορτίων.

• Η αντοχή του εξαρτήματος περιορίζεται από την αντοχή κατ΄αρχήν του πείρου ρύθμισης και στη συνέχεια από εκείνη της ράγας στήριξης για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης.

• Σε καμία περίπτωση δεν παρατηρείται αστοχία στην άντυγα της οπής του πείρου στήριξης, παρότι η απόσταση του κέντρου αυτής από το άκρο του ελάσματος είναι ιδιαίτερα μικρή.

Λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά των μεταλλικών εξαρτημάτων, όπως αυτή περιγράφεται ανωτέρω, οι προτεινόμενες τιμές αντοχής καθορίζονται από απαιτήσεις λειτουργικότητας και είναι αισθητά μικρότερες από τις αντίστοιχες οριακές τιμές.

Η μέγιστη αποδεκτή παραμόρφωση κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας, είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις προβλεπόμενες κατασκευαστικές λεπτομέρειες του εκάστοτε έργου και την παραμορφωσιακή του ικανότητα του υλικού επικάλυψης.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EN 1993-1-1. Design of steel structures. Part 1-1 General rules and rules for buildings, CEN 2005.
- [2] EN 1993-1-1. Design of steel structures. Part 1-4 General rules
 Supplementary rules for stainless steels.
- [3] BS_EN_ISO_3506-1. Mechanical properties of corrosion resistance stainless steel fastener.
- [4] DIN18516_3_2011. Cladding for External Walls, Rear-Ventilated Part 1: Requirements, Principles of Testing.
- [5] DIN18516_3_2011. Cladding for External Walls, Rear-Ventilated Part 3: Natural Stone requirements, design.

SUPPORT STEEL STRUCTURE OF THE EXTERNAL MARBLE CLADDING OF THE NEW OFFICE OF AGGEMAR SA IN ATHENS

Andreas Spiliopoulos

Civil Engineer Institute of Steel Structures, School of Civil Engineering, NTUA Athens, Greece e-mail: spiliopa@central.ntua.gr

Maria-Eleni Dasiou

Civil Engineer Institute of Steel Structures, School of Civil Engineering, NTUA

Athens, Greece

e-mail: medasiou@mail.ntua.gr

Stella Avgerinou

Civil Engineer Institute of Steel Structures, School of Civil Engineering, NTUA

Athens, Greece

e-mail: avgerinoustella@gmail.com

SUMMARY

In the current paper the numerical and experimental investigation regarding the fixing of the external marble cladding of the new building office complex of Anangel Maritime Group of Companies of Aggemar S.A. is presented. Due to the continuous curved shape form and the specific architectural requirements, the design and development of new support systems of the natural stone cladding was necessary. Thus, a number of material and device tests were performed in the Steel Structures Laboratory of NTUA, in order to determine the mechanical characteristics of the materials and evaluate the behavior of the newly developed devices and their connection to the main structural system. From the test results the strength and deformation limits of the devices were set and optimization was achieved.