

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΤΗΣ ΠΙΖΑΣ

ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΗ ΕΥΤΥΧΙΑ
ΓΚΙΖΛΗ ΜΥΡΤΩ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει στόχο την αναλυτική παρουσίαση της κατασκευής και των διαδικασιών αποκατάστασης του Κεκλιμένου Πύργου της Πίζας, ενός από τα σημαντικότερα ιστορικά μνημεία από φέρουσα τοιχοποιία. Η εργασία περιλαμβάνει ιστορικά στοιχεία, τεχνικά χαρακτηριστικά και πλήρη περιγραφή των προβλημάτων που έπρεπε να αντιμετωπιστούν μέσω της αποκατάστασης και των λύσεων που τελικά εφαρμόστηκαν.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Χτισμένος στις εκβολές ενός ποταμού, ο κεκλιμένος πύργος της Πίζας άρχισε να γέρνει σχεδόν αμέσως μετά την τοποθέτηση των θεμέλιων λίθων από τους μεσαιωνικούς κατασκευαστές του. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1173 και ολοκληρώθηκε το 1370. Στη διάρκεια των 200 χρόνων που μεσολάβησαν οι εργασίες διακόπηκαν 2 φορές για μεγάλα χρονικά διαστήματα, για άγνωστους σε εμάς λόγους. Μετέπειτα αναλύσεις από ερευνητές απέδειξαν ότι αν δεν είχε συμβεί αυτό ο πύργος θα είχε καταρρεύσει στη φάση κατασκευής.



Εικόνα 1 : Δυτική Όψη του Κεκλιμένου Πύργου της Πίζας

Μετά από σχεδόν 500 χρόνια, το 1838, ο αρχιτέκτονας Alessandro Della Gherardesca εκχωμάτωσε ένα πεζοδρόμιο γύρω από τη βάση του κτηρίου με σκοπό να εκθέσει τα υποστυλώματα και τα σκαλιά θεμελίωσης, τα οποία είχαν θαφτεί λόγω της καθίζησης του εδάφους στη νότια πλευρά του πύργου. Υπάρχουν στοιχεία που δείχνουν ότι η κλίση του πύργου αυξήθηκε σημαντικά εκείνη την εποχή και έτσι η εκσκαφή του Gherardesca έφερε τον πύργο πολύ κοντά στην κατάρρευση. 100 χρόνια αργότερα, το 1934, γίνεται μία απόπειρα ενίσχυσης της τοιχοποιίας των θεμελίων με τσιμεντενέσεις. Η απόπειρα αυτή είχε σαν αποτέλεσμα την ξαφνική αύξηση της κλίσης, λόγω αύξησης του βάρους. Η κατάρρευση του πύργου της Ραβία, το 1989, θα οδηγήσει τους μηχανικούς στην απόφαση να κλείσουν τον πύργο της Πίζας το 1990 φοβούμενοι ένα παρόμοιο συμβάν. Αποφασίστηκε έναρξη εργασιών για τη μείωση της κλίσης οι οποίες διήρκεσαν 11 χρόνια. Τον Δεκέμβριο του 2001 ο πύργος άνοιξε ξανά για το κοινό (Εικόνα 1) [6].

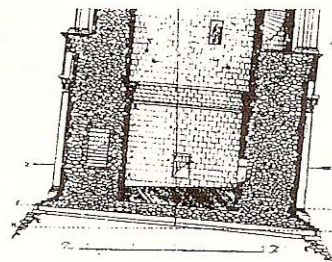
2. ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ

2.1 Διαστάσεις και δομικά υλικά του πύργου

Ο πύργος του καμπαναριού υψώνεται 53,3 μέτρα πάνω από το έδαφος με συνολικό ύψος 60 μέτρων από τα θεμέλια ως το καμπαναριό [6]. Η περιφέρεια του κτηρίου στη βάση του είναι 48,8 μέτρα. Ο πύργος ζυγίζει 14.500 Τόνους και εδράζεται σε πέτρινα θεμέλια σε σχήμα δαχτυλιδιού με διάμετρο ίση με 19,6 μ και το βαθύτερο σημείο είναι 5,5 μ κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Τα θεμέλια έχουν βυθιστεί προς το νότο 5,5 μοίρες από την οριζόντιο και το έβδομο πάτωμα υπερέρχει από την οριζόντιο 4,5 μ στη νότια πλευρά. Το εξωτερικό του πύργου έχει μορφή κυλίνδρου με κιονοστοιχία σε κάθε όροφο. Οι κίονες έχουν μήκος 3,5 μ και το ύψος της κιονοστοιχίας από το πάτωμα μέχρι το ταβάνι είναι 4,8 μ. Δεκαπέντε κίονες πλαισιώνουν το κτήριο στη βάση του και κάθε όροφος αποτελείται από 30 κίονες. Το καμπαναριό αποτελείται από δώδεκα κίονες. Μια σπειροειδής σκάλα αποτελούμενη από 284 σκαλοπάτια οδηγεί προς τα πάνω μέσω των τοίχων στους τοξωτούς ορόφους και στο καμπαναριό. Το πάχος του τοίχου είναι 4,1 μ στο πρώτο επίπεδο. Στα υψηλότερα επίπεδα στενεύει στα 2,7 μ, ταυτόχρονα για λόγους αισθητικής και σταθερότητας [2]. Ο άξονας του πύργου δεν είναι ίσιος. Αντίθετα γέρνει προς το βορρά και είναι καμπυλοειδής. Κατά τη διάρκεια των 200 ετών κατασκευής του οι αρχιτέκτονες καμπύλωσαν τον άξονά του για να αντισταθμίσουν την κλίση. Παρόλο που δεν είναι ξεκάθαρο ποιο κανόνες ακολουθήθηκαν για να επιτευχθεί αυτό, υποτέθηκε ότι οι κτίστες προσπάθησαν να επαναφέρουν τον άξονα κατακόρυφο πάνω από το κέντρο των θεμελίων [5].



Εικόνα 2 : Λεπτομέρεια της Μαρμαρίνης Κιονοστοιχίας του Πύργου



Εικόνα 3 : Εσωτερική Δόμηση του Πύργου

Η ανωδομή σχηματίζεται από χυτή τοιχοποιία που αποτελείται από 3 διαφορετικά στρώματα [5] : την εξωτερική επικάλυψη από μάρμαρο του San Giuliano, την εσωτερική επικάλυψη που αποτελείται από μαλακό ασβεστόλιθο (εκτός από τα τρία πρώτα πατώματα τα οποία είναι πάλι από μάρμαρο) και από εσωτερικό έγχυτο γέμισμα από κροκάλες με κονίαμα από το San Giuliano (Εικόνα 3). Η τοιχοποιία του δακτυλίου των θεμελίων αποτελείται από μίγμα κονιάματος ασβέστου και άμμου με κροκαλοειδείς πέτρες και δεν περιέχει καθόλου κενά λόγω τσιμεντενέσεων που έλαβαν χώρα το 1934. Τέλος, οι κιονοστοιχίες είναι κυρίως μαρμαρίνες, παρόλο που με την πάροδο των χρόνων χρησιμοποιήθηκαν και άλλα είδη πέτρας όταν αντικαταστάθηκαν οι κίονες (Εικόνα 2).

2.2 Εδαφικά χαρακτηριστικά

Το έδαφος κάτω από τον πύργο αποτελείται από τρία ξεχωριστά στρώματα [6]. Το επάνω στρώμα είναι περίπου 10 μ παχύ και αποτελείται από διάφορα, μαλακά, λασπώδη ιζήματα τα οποία βρίσκονται σε ρηχό νερό από ποταμίσια και λιμνάζοντα ύδατα πάνω από 10.000 χρόνια. Το δεύτερο στρώμα αποτελείται από πολύ μαλακά και ευαίσθητα θαλάσσια αργιλικά υλικά τα οποία βρίσκονται εκεί για 30.000 χρόνια. Εκτείνονται σε βάθος 40 μ και παρουσιάζουν πλευρική ομοιομορφία. Το τρίτο στρώμα αποτελείται από πυκνή άμμο και εκτείνεται σε αξιοσημείωτο βάθος. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται 1 με 2 μ κάτω από την επιφάνεια. Πολλά εδαφικά δείγματα που πάρθηκαν γύρω και κάτω από τον πύργο δείχνουν ότι η επιφάνεια του δεύτερου στρώματος είναι κοίλη λόγω του μεγάλου βάρους του πύργου. Από αυτό μπορεί κάποιος αφαιρετικά να συμπεράνει ότι η συνολική καθίζηση του εδάφους κυμαίνεται από 2,5 μέχρι 3,0 μ, γεγονός που δείχνει πόσο το υποκείμενο έδαφος μπορεί να συμπιεστεί.

3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ

3.1 Εντατική κατάσταση και δυνάμεις στην πρώτη στοά

Αρχικά έπρεπε να γίνει μια εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας E της μαρμάρινης επένδυσης και της τοιχοποιίας από χαλίκι. Το μέτρο ελαστικότητας της **επένδυσης** προήλθε από προηγούμενες δοκιμές που είχαν γίνει με διπλούς επίπεδους γρύλους και υποτέθηκε ότι είναι **$E = 50.000 \text{ MPa}$** . Το μέτρο ελαστικότητας της **τοιχοποιίας πληρώσεως** πάρθηκε από δοκιμές με όργανο μέτρησης της διαστολής που είχαν γίνει προηγουμένως σε μερικούς πυρήνες και εκτιμήθηκε ότι είναι **$E = 7.000 \text{ MPa}$** . Το πιθανό σφάλμα στις μέσες τιμές των τάσεων εκτιμήθηκε 25% στην επικάλυψη και 35% στην εσωτερική τοιχοποιία [3].

Πυρήνες που πάρθηκαν από τις προηγούμενες επιτροπές απέδειξαν ότι η εσωτερική τοιχοποιία διακόπτεται από αρκετά κενά, ωστόσο το να ληφθούν πυρήνες από την κρίσιμη ζώνη θεωρήθηκε επικίνδυνο κι έτσι μια λογική εκτίμηση της ποιότητας της τοιχοποιίας βασίστηκε μόνο σε μη καταστρεπτικές δοκιμές (ηχητικές μέθοδοι, μετρήσεις με ραντάρ κατά μήκος του τοίχου, θερμογραφία). Τα αποτελέσματα ήταν ανησυχητικά αλλά δεν μπορούσαν να παρέχουν περισσότερες ακριβείς πληροφορίες για μη ομογενή μοντελοποίηση της τοιχοποιίας.

Παρόλα αυτά μια πολύ σημαντική τοπική έλλειψη μπόρεσε να τεκμηριωθεί καλά και να ληφθεί υπ' όψη. Αυτή η έλλειψη ήταν η παρουσία 27 μεγάλων κοιλοτήτων (το μέσο μέγεθος ήταν περίπου 360x230x200 mm), αριστερά στο επίπεδο της πρώτης στοάς, οι οποίες δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής για προσαρμογή των ικριωμάτων. Τέτοια κενά μειώνουν κατά 18% τον ανθεκτικό οριζόντιο τομέα της μαρμάρινης επικάλυψης και αυξάνουν κατά 13% τις τάσεις στις γωνίες από μόνιμα φορτία.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις κοιλοότητες (αλλά όχι ακόμα τα εσωτερικά κενά) η συμβατική προσέγγιση γραμμικής ελαστικής δοκού οδήγησε στις εξής τιμές των κατακόρυφων τάσεων στην επιφάνεια με τη μέγιστη κλίση:

- στη μαρμάρινη επικάλυψη: $\sigma_{z,\max} = 7.6 \text{ MPa}$
- στην τοιχοποιία από χαλίκι: $\sigma_{z,\max} = 1.1 \text{ MPa}$

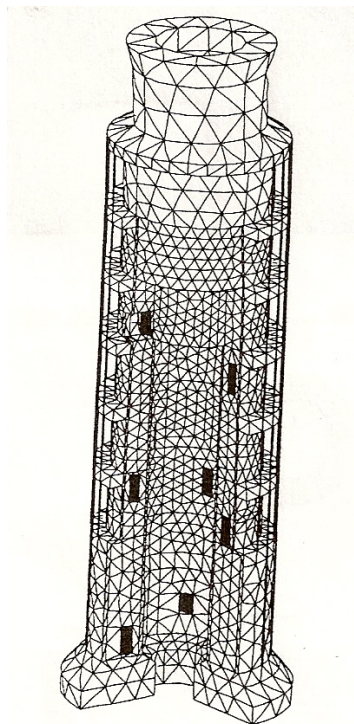
Τέτοιες τιμές μπορεί να μην φαίνονται υπερβολικές για καλές μαρμάρινες πέτρες και για καλή τοιχοποιία. Ωστόσο η κατάσταση είναι ανησυχητική. Στην πραγματικότητα:

- οι μαρμάρινες λίθοι της επικάλυψης κανονικά έχουν μόνο περιορισμένη επαφή στους οριζόντιους αρμούς, αυτό μπορεί να αυξήσει πολύ τις τοπικές τάσεις ή να επιτρέψει τοπικό λυγισμό.
- η αντοχή της τοιχοποιίας πληρώσεως από χαλίκι βασίζεται πολύ στην ποιότητα του κονιάματος και πολύ λίγο στην αντοχή των ανεπίχριστων λίθων, η γνώση της είναι μη ικανοποιητική στην παρούσα φάση (έχει εκτιμηθεί διαφορετικά από διαφορετικές επιτροπές με βάση λίγες δοκιμές αλλά τα 4 MPa φαίνεται να είναι μια λογική συντηρητική θλιπτική τάση, δοκιμές με όργανο που μετράει τη διόγκωση έδειξαν περιπτώσεις μέγιστης μόνιμης τάσης 5 MPa).
- η αβεβαιότητα του μέτρου ελαστικότητας οδήγησε σε τιμές 35% υψηλότερες από ότι υπολογίστηκε, οι κοιλότητες μειώνουν την τοπική αντοχή.
- η συγκέντρωση τάσεων κοντά στα ανοίγματα μπορεί να οδηγήσει σε πρόιμη αστοχία (η κατάρρευση στην Ραμία έγινε κάτω από μέση θλίψη 1,1 MPa τη στιγμή που η μέση αντοχή της τοιχοποιίας ήταν 2,8 MPa).

Ωστόσο, η κύρια ανησυχία οφείλεται στην υψηλή πίεση που εφαρμόζει η εξωτερική μαρμάρινη επικάλυψη στην υποκείμενη τοιχοποιία, μέσω μιας μαρμάρινης πλάκας με πάχος μόλις 160 mm. Γι' αυτό έγινε μια πιο λεπτομερής μελέτη της εντατικής κατάστασης σ' αυτήν την περιοχή από ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Εκεί που η μαρμάρινη επικάλυψη πιέζει το πεζοδρόμιο της στοάς βρέθηκε μια κατακόρυφη τάση **5,9 MPa** και κάτω από αυτήν, στην τοιχοποιία πληρώσεως **3,0 MPa**, τιμή η οποία πλησιάζει την εκτιμώμενη αντοχή. Ακτινικές τάσεις μέχρι **0,3 MPa** βρέθηκαν στα πατήματα και στην οροφή της ελικοειδούς σκάλας και μπορεί να είναι η εξήγηση των κυκλικών ρωγμών.

3.2 Καθολική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία



Εικόνα 4 : Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

Σύμφωνα με την πηγή [3], το 1992, μια καθολική τρισδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία παρείχε ευρεία γνώση των επιπτώσεων μόνιμων φορτίων, ανέμου και περιφερειακής προέκτασης τα οποία ήταν μερικώς γνωστά μέσω των προκαταρκτικών μελετών. Υπό την καθοδήγηση της επιτροπής, το ISMES πρώτο έφτιαξε ένα αριθμητικό μοντέλο του πύργου και μετά ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων από τετράεδρα στοιχεία (που εξομοιώνουν τον πύργο κι ένα κομμάτι γραμμικού ελαστικού εδάφους) με ένα σύνολο 67.000 βαθμών ελευθερίας.

Το μοντέλο (Εικόνα 4) λαμβάνει υπ' όψη όλα τα σχετικά ανοίγματα, τα σκαλιά και 7 διαφορετικές πυκνότητες για τμήματα της κατασκευής (από 18,2 έως 2,7 kN/m³). Ένα μειωμένο επίπεδο λεπτομέρειας του πλέγματος στο ανώτερο τμήμα επέτρεψε μια αξιοσημείωτη μείωση της πολυπλοκότητας του μοντέλου, ενώ στις πιο κρίσιμες ζώνες (στο Νότο για τους 4 κατώτερους ορόφους) η λεπτομέρεια βελτιώθηκε. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα θα ήταν εξαιρετική αν το περιστύλιο είχε μοντελοποιηθεί με λεπτομέρεια, έτσι τα στοιχεία του εξωτερικού περιστυλίου (οι κολώνες και τα τόξα) εξομοιώνονται με στηρίξεις ισοδύναμης αξονικής δυσκαμψίας.

Η ανάλυση επαναλήφθηκε με δεύτερο πλέγμα που λάμβανε υπ' όψη τις βασικές ρωγμές που υπήρχαν στην κατασκευή, και παρέλειπε όλες τις κολώνες (καθολική τρισδιάστατη ανάλυση μοντέλου με καταστροφές).

Οι δύο τρισδιάστατες αναλύσεις ήταν πολύτιμες για την παροχή πληροφοριών που αλλιώς δεν θα ήταν διαθέσιμες:

- Η θέση των ζωνών μέγιστης έντασης (στην Εικόνα 5 οι περιβάλλουσες των κατακόρυφων τάσεων δείχνουν ότι ο κρίσιμος τομέας της πρώτης στοάς δεν είναι στο επίπεδο της μέγιστης κλίσης αλλά στα Νοτιοδυτικά στην ακμή της πόρτας).

- Το μέγιστο των τάσεων.

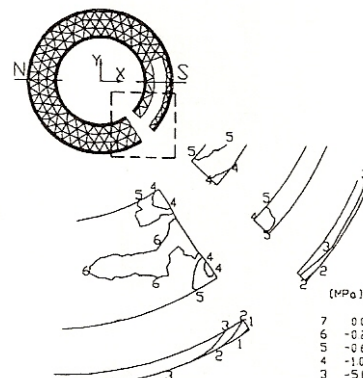
- Η εντατική κατάσταση εξ' αιτίας ανέμων 50 ετών (μόνο 0,2 MPa).

- Οι περιφερειακές και αξονικές τάσεις και η έκταση των θετικών επιπτώσεων της προέκτασης.

- Η επίπτωση των υπάρχουσών ζημιών κυρίως λόγω πιθανής έλλειψης συνέχειας των υποστυλωμάτων.

Ένα εξ' ίσου σημαντικό εύρημα ήταν η ανάπτυξη ροπής στρέψης στη βάση του πύργου περί τον κατακόρυφο άξονα [5]. Στην παρούσα γωνία κλίσης, τα θεμέλια εμφανίζουν στρεπτικές τάσεις που μεταβάλλονται από +45,53 σε -53,61 KPa όπου το συν συμβολίζει την ωρολογιακή φορά περί τον κατακόρυφο άξονα. Η μέση στρεπτική τάση είναι περίπου ίση με -0,466 KPa προκαλώντας ροπή στρέψης περίπου ίση με -335 KNm. Καθώς η γωνία κλίσης μεταβάλλεται, η στρεπτική ροπή βρίσκεται να αυξάνεται με ρυθμό περίπου ίσο με -1,07 KNm ανά δεύτερο του τόξου.

Σίγουρα η γωνία κλίσης παίζει ρόλο στην παρουσία της ροπής, όμως θεωρείται ότι είναι η ελικοειδής σκάλα σε συνδυασμό με τη γωνία κλίσης που έχουν σαν αποτέλεσμα μια ανομοιογενή φόρτιση δημιουργώντας το δίκτυο στρεπτικής ροπής στα θεμέλια του πύργου. Παρόλο που η ροπή στρέψης δεν έχει δημιουργήσει κάποια αξιοσημείωτη στροφή στον πύργο, αυτά τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να είναι πολύ χρήσιμα στους μηχανικούς καθώς θα μελετούν το έδαφος κάτω από τον πύργο. Ο συνυπολογισμός της ροπής στρέψης σαν τμήμα των οριακών συνθηκών μπορεί να έχει αντίκτυπο επάνω στα συμπεράσματά τους.



Εικόνα 5 : Περιβάλλουσα των Κατακόρυφων Τάσεων στην Πρώτη Στοά

4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΛΥΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΑΞΙΑΣ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ



Εικόνα 6 : Στήριξη της Κατασκευής Μέσω Τενόντων (Reuters)

Ο πύργος της Πίζας οφείλει τη φήμη και την επισκεψιμότητά του ακριβώς στο γεγονός που δημιούργησε και το πρόβλημα της ευστάθειάς του, δηλαδή στην ύπαρξη της κλίσης. Για τον λόγο αυτό η κλίση έπρεπε να μειωθεί τόσο, ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια και παράλληλα αυτό να μην γίνεται αντιληπτό από έναν απλό παρατηρητή.

Επιπλέον οι επεμβάσεις δεν έπρεπε να επηρεάζουν την εξωτερική εικόνα του πύργου. Ουσιαστικά το πρόβλημα εντοπίζεται στην κακή ποιότητα και τη μεγάλη συμπίεστικότητα του εδάφους της περιοχής. Έτσι αποφασίστηκε μια επέμβαση που θα εστίαζε στην εξάλειψη αυτού του προβλήματος. Η ιδέα ήταν να τυλίξουν έναν αριθμό από προεντεταμένα συρματόσχοινα στην περιφέρεια του κτηρίου ώστε να τον συγκρατούν εωσότου ολοκληρωθούν οι εργασίες στο υπέδαφος (Εικόνα 6).

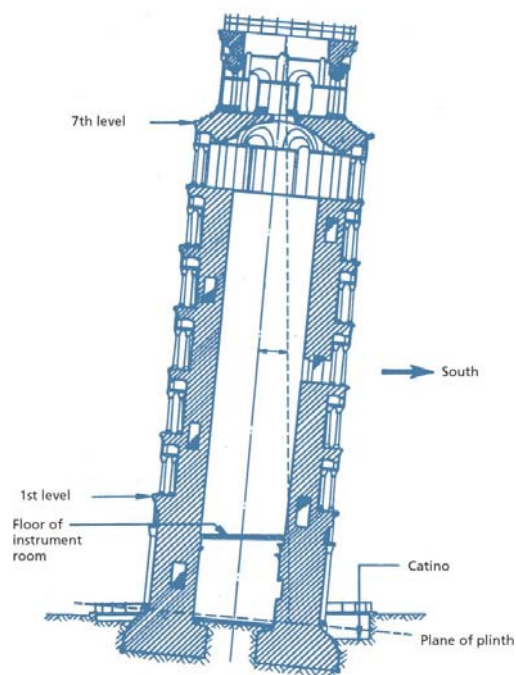
Η λύση που εφαρμόστηκε τελικά ικανοποιούσε τις εξής απαραίτητες προϋποθέσεις, οι οποίες τέθηκαν εξ αρχής, λόγω της φύσης του κτηρίου [4] :

- προσωρινοί τένοντες
- μικρή οπτική επίδραση πάνω στη μαρμάρινη επιφάνεια
- καθόλου επιβλαβείς επιδράσεις πάνω στη μαρμάρινη επιφάνεια
- προστασία από μακροπρόθεσμη διάβρωση
- καθόλου λιπαντικό στα συρματόσχοινα
- οι τένοντες προσεκτικά κρυμμένοι κατά το μήκος τους
- αντίσταση σε μικροοργανισμούς
- αντίσταση στην υπεριώδη ακτινοβολία
- αποδεδειγμένα αποτελεσματική τεχνολογία προς χρήση
- το σύστημα έντασης να είναι ανεπηρέαστο από ανθρώπινα λάθη

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

5.1 Επεμβάσεις στην τοιχοποιία

Στις αρχές των εργασιών και πριν ξεκινήσουν οι διαδικασίες επέμβασης στο έδαφος έγιναν οι πρώτες προσπάθειες ενίσχυσης της τοιχοποιίας του πύργου (Εικόνα 7). Αυτή η πρώτη σταθεροποίηση της τοιχοποιίας έγινε τυλίγοντας γύρω της μέχρι το ύψος του δεύτερου ορόφου χαλύβδινους τένοντες με επικάλυψη από πλαστικό. Έτσι έκλεισαν πολλές ρωγμές και μειώθηκε σημαντικά η πιθανότητα αστοχίας [3].



Εικόνα 7 : Τομή των Θεμελίων και της Ανωδομής και να δημιουργηθεί μια τέλεια βάση πάνω στην

Αργότερα και παράλληλα με τις εργασίες μείωσης της κλίσης του πύργου, μικρής έκτασης εργασίες ενίσχυσης έλαβαν χώρα στις περιοχές της τοιχοποιίας με τη μεγαλύτερη ένταση. Αυτό αφορούσε τσιμεντενέματα στα διάκενα της αργολιθοδομής και τοποθέτηση ακτινωτών οπλισμών από ανοξείδωτο ατσάλι στις περιοχές όπου ο κίνδυνος για αποκόλληση της επικάλυψης ήταν αυξημένος. Οι περιφερειακοί χαλύβδινοι τένοντες γύρω από το πρώτο διάζωμα και από τον δεύτερο όροφο αντικαταστάθηκαν από προεντεταμένα καλώδια εμποτισμένα σε ρητίνη, κάνοντάς τα πολύ λιγότερο αντιληπτά.

Αφού επιτεύχθηκε η επιθυμητή κλίση, έπρεπε να ληφθούν μέτρα για τη διεύρυνση και υποστήριξη των υφισταμένων θεμελίων [1]. Γίνεται μία εκσκαφή γύρω από τα θεμέλια σε πλάτος 4 μ και βάθος 3 μ. Αυτό είναι ένα προληπτικό μέτρο για να εκτιμηθεί η υπάρχουσα κατάσταση της τοιχοποιίας

οποία θα τοποθετηθούν οι νέοι θεμέλιοι λίθοι. Η διαδικασία στερεοποίησης αποτελείται από μία τραπεζοειδή κατασκευή από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Η κατασκευή αυτή αποτελείται από ένα κυκλικό τμήμα το οποίο αγκυρώνεται γερά πάνω στην κατασκευή (με την οποία δημιουργεί ένα ενιαίο σώμα) μέσω οπών πάνω στα υφιστάμενα θεμέλια. Οι νέοι θεμέλιοι λίθοι θα έχουν βάση 4 μ και κυμαινόμενο ύψος από 3 μ (αντίστοιχο με το ύψος των παλιών θεμελίων) μέχρι 1,5 μ στο άλλο άκρο. Για δημιουργηθεί η μέγιστη πρόσφυση με την υφιστάμενη κατασκευή το νέο κυκλικό στέμμα οπλισμένου σκυροδέματος θα προενταθεί μέσω τενόντων δακτυλοειδούς μορφής. Για καλύτερη εγγύηση (και επίσης για λόγους ισορροπίας στην προσπάθεια μεταφοράς της θλίψης από την παλιά στη νέα κατασκευή) ο κεντρικός πυρήνας των υφισταμένων θεμελίων θα γεμιστεί επίσης με Ο.Σ..

5.2 Επεμβάσεις στο έδαφος

Όπως προαναφέρθηκε, ήταν προφανές ότι η παρούσα κατάσταση είχε προκληθεί λόγω προβλημάτων στο έδαφος όπου ήταν θεμελιωμένος ο πύργος. Γι' αυτό το 1993 έγιναν οι πρώτες επιτυχημένες προσπάθειες σταθεροποίησης των θεμελίων. Η προσωρινή αυτή επέμβαση έγινε με τοποθέτηση 600 Τόνων από βάρη μόλυβδου στη βόρεια πλευρά των θεμελίων μέσω ενός προεντεταμένου, μετακινούμενου χυτού δακτυλιδιού από σκυρόδεμα στη βάση του πύργου στο επίπεδο των λίθων θεμελίωσης, προκαλώντας μικρή μείωση της κλίσης (Εικόνα 8) [1].

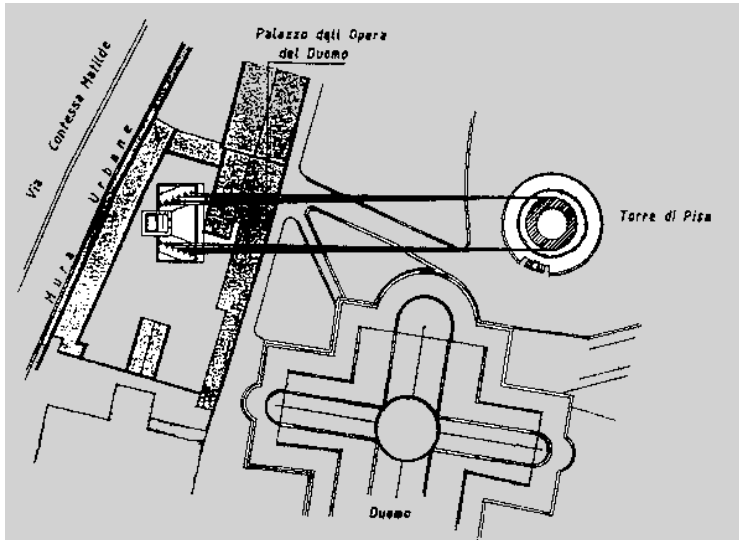
Έπρεπε όμως να βρεθεί μια μόνιμη λύση που θα προκαλούσε αποτελεσματική μείωση της κλίσης. Η προηγούμενη ενίσχυση δεν είχε ορατά αποτελέσματα, αλλά ήταν αρκετή για να μειώσει τις εντάσεις και να σταθεροποιήσει τα θεμέλια. Δεδομένου ότι τα θεμέλια του πύργου ήταν στα όρια της αστάθειας και ότι ακόμα και η παραμικρή αναταραχή του εδάφους στη νότια πλευρά θα μπορούσε να οδηγήσει στην κατάρρευση, το να μειωθεί η κλίση ήταν πολύ αισιόδοξη πρόταση.



Ερευνήθηκαν διάφορες μέθοδοι που πρότειναν πρόκληση ελεγχόμενης καθίζησης της βόρειας πλευράς. Αυτές περιλάμβαναν αποστράγγιση μέσω πηγαδιών, συμπύκνωση της βόρειας πλευράς μέσω ηλεκτρώσμωσης και φορτίζοντας το έδαφος γύρω από τη βόρεια πλευρά του πύργου με μια πλάκα που φορτίζεται θλιπτικά μέσω αγκυρώσεων στο έδαφος. Καμιά από αυτές τις μεθόδους δεν αποδείχτηκε ικανοποιητική.

Κατέληξαν σε μία μέθοδο που αφορούσε την αφαίρεση εδάφους ακριβώς κάτω από τη βόρεια πλευρά των θεμελίων του πύργου με τοποθέτηση κατάλληλων σωλήνων. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή έπρεπε η κατασκευή να υποστηριχθεί επαρκώς, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί απόλυτη σταθερότητα και ασφάλεια κατά τη διάρκεια των προσπαθειών.

Η στήριξη αυτή έγινε με αγκύρωση του πύργου μέσω χαλύβδινων τενόντων. Το σχέδιο προέβλεπε την κατασκευή, περίπου 90 μ από το κέντρο του πύργου, ενός θεμέλιου στύλου από οπλισμένο σκυρόδεμα για την αγκύρωση των τενόντων (Εικόνα 9). Ο στύλος αυτός είχε μία γενική βάση από οπλισμένο σκυρόδεμα διαστάσεων 12 x 20 μ και πάχους 2 μ και κατακόρυφους τοίχους με προεξέχοντα στοιχεία στην κορυφή τους που θα παρείχαν περιοχική στήριξη των συνδέσεων για την ένταση των τενόντων.

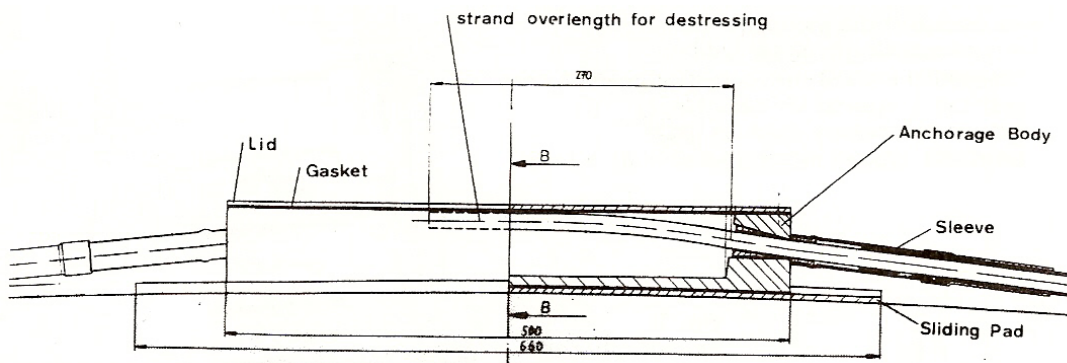


Εικόνα 9 : Σχεδιάγραμμα ακριβούς τοποθεσίας του Στύλου Αγκύρωσης Τενόντων

31 τένοντες από πλέγμα χάλυβα αγκυρώθηκαν στο στύλο. Ο κάθε τένοντας τυλίχθηκε γύρω από τον πύργο σε 5 σειρές δαχτυλιδιών ανάμεσα στον 2ο και 6ο όροφο. Για τη σωστή ένταση, μια σταδιακή μείωση έγινε στον αριθμό των τενόντων που θα έφθαναν από το στύλο στον πύργο. Οι συνδέσεις, μια σε κάθε κατάληξη του τένοντα, ήταν επαρκώς αγκυρωμένες σε βάθος. Οι αγκυρώσεις κατασκευάστηκαν εξ' ολοκλήρου από St 52-3 και μετά γαλβανίστηκαν εν θερμώ με ελάχιστο πάχος ψευδαργύρου 80 μm [4].

Το πλέγμα προέντασης 7 καλωδίων γαλβανίστηκε εν θερμώ μετά την επικάλυψη κάθε καλωδίου χωριστά με ψευδάργυρο ελάχιστου πάχους 50μm. Το πλέγμα επικαλύφθηκε με ένα σωλήνα περιβολής από PVDF, διαμέτρου 20/16,2 mm. Αυτό το υλικό είναι εξαιρετικής αντοχής έναντι χημικών ουσιών και καιρικών φαινομένων, και επιτρέπει ολίσθηση με χαμηλή τριβή του πλέγματος μέσα στο σωλήνα περιβολής παρά την απουσία λιπαντικού. Στα άκρα εφαρμόστηκε μια νέα μέθοδος κατά της διάβρωσης που λέγεται Dacromet 320, παρόμοια με το γαλβανισμό εν θερμώ αλλά 2,5 φορές πιο αποτελεσματική με το ίδιο πάχος επικάλυψης. Λόγω της απαίτησης να μην υπάρχει καμία ανάμιξη με τα υπάρχοντα υλικά του κτηρίου η αγκύρωση έπρεπε να είναι στον αέρα, π.χ. να ολισθαίνει χωρίς να καταστρέφει την μαρμάρινη επιφάνεια κατά την προένταση. Γι' αυτό το λόγο τοποθετήθηκε ένας ειδικός μανδύας από PVDF ανάμεσα στο σώμα της αγκύρωσης και της κατασκευής. Αυτός ο μανδύας επέτρεψε πολύ χαμηλής τριβής ολίσθηση, προστατεύοντας ταυτόχρονα το μάρμαρο.

Το σύστημα αγκύρωσης ελαχιστοποίησε τις εξωτερικές διαστάσεις, προκαλώντας έτσι πολύ μικρή οπτική επίδραση στο κτήριο. Μετά την προένταση, το μήκος πλέγματος που περίσσευε κρύφτηκε από το σώμα της αγκύρωσης και καλύφτηκε κλείνοντας το καπάκι της αγκύρωσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10 : Ειδικά Σχεδιασμένο Σώμα Αγκύρωσης Τένοντα

Πριν την εφαρμογή της μεθόδου στον πύργο, έγινε μια δοκιμή προέντασης σε ένα κυλινδρικό σιλό παρόμοιο με αυτόν. Ο στόχος της δοκιμής ήταν να επιδείξει την καταλληλότητα ολόκληρου του συστήματος, και συγκεκριμένα του σώματος αγκύρωσης και

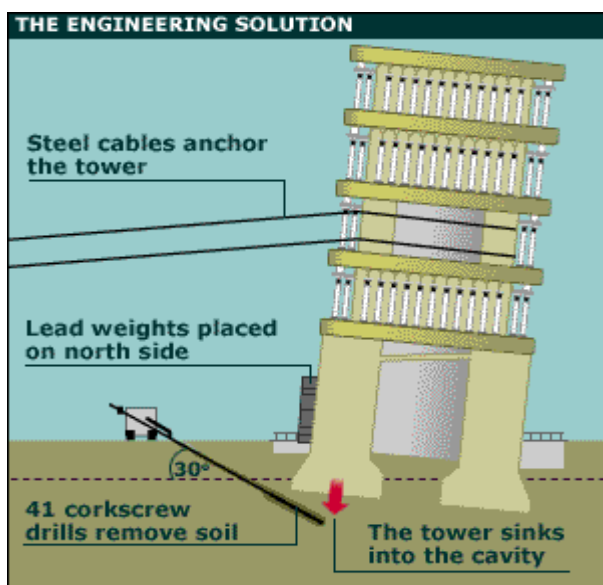
του μανδύα ολίσθησης PVDF. Η εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και της προέντασης απέδειξε ότι το ειδικό σώμα αγκύρωσης και οι διαδικασίες προέντασης δουλεύουν όπως έπρεπε. Ο συντελεστής τριβής της συγκέντρωσης των πλεγμάτων χωρίς λιπαντικό ήταν περίπου $\mu = 0,11$. Η εγκατάσταση των κυκλικών τενόντων έγινε τον Ιούνιο του 1992.

Για λόγους ακριβείας η ποσότητα έντασης των τενόντων επιτεύχθηκε με τη μεσολάβηση ηλεκτρονικού χειριστηρίου το οποίο ακολουθούσε υπολογισμούς με απόλυτη ακρίβεια και προσαρμογή στη στιγμιαία και μεταβλητή κλίση του πύργου [1]. Σε πρώτη φάση, κατά εφαρμογή της τάσης αναπτύσσεται μια σταδιακή αντίσταση λόγω τριβής στα καλώδια. Αυτή εγγυάται ότι το φορτίο δε θα επιφέρει κανένα κίνδυνο στο υλικό του



πύργου. Η διαδικασία γίνεται από τα κατώτερα προς τα ανώτερα επίπεδα του πύργου (Εικόνα 11). Προστατευτικά και καλώδια τοποθετούνται αρχικά μόνο στο πρώτο επίπεδο. Η αντίσταση λόγω τριβής σε αυτή τη φάση ισούται με το 10% της τελικής τιμής. Ακολουθεί η τοποθέτηση του προστατευτικού και των τενόντων στο επόμενο ανώτερο επίπεδο με ταυτόχρονη αύξηση της έντασης των υποκείμενων τενόντων (του πρώτου επιπέδου). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται εφόσον ολοκληρωθεί η τοποθέτηση όλων των προστατευτικών και των τενόντων στην κατασκευή. Μόνο τότε μπορούν οι τένοντες να υποβληθούν σε πλήρη ένταση. Από αυτή τη στιγμή και μετά η στηριζόμενη κατασκευή δρα προσωρινά σαν ένα έργο αυτόνομο και απόλυτα ασφαλές.

Εικόνα 11 : Τοποθέτηση Προστατευτικών και Καλωδίων στην Ανωδομή του Πύργου, πριν αρχίσουν οι Διαδικασίες Εκσκαφής

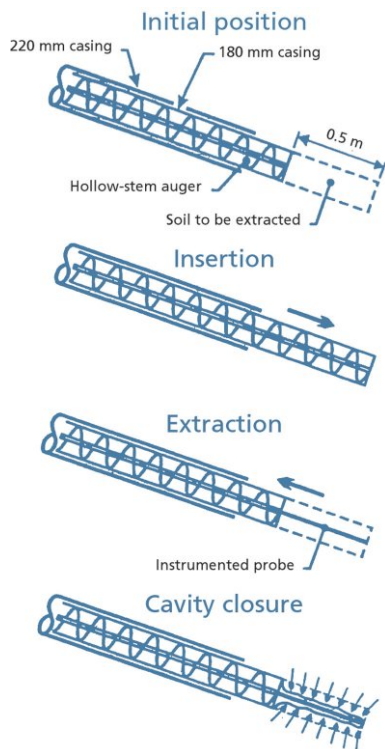


Εικόνα 12 : Σχεδιάγραμμα που περιγράφει την Κατάσταση του Πύργου κατά τη Διαδικασία Εκσκαφής (BBC News)

Αφού έγινε μία δοκιμαστική αφαίρεση εδάφους σε περιορισμένο πάχος 6 μέτρων, η οποία αποδείχτηκε αποτελεσματική και ασφαλής, οι μελετητές αποφάσισαν να προχωρήσουν σε πλήρη εφαρμογή της μεθόδου σε όλο το βάθος των θεμελίων [6]. Έτσι έγιναν 41 τρύπες αφαίρεσης οι οποίες διανοίχτηκαν ανά απόσταση 0,5μ και κάθε μία είχε δικό της τρυπάνι και μεταλλικό σωλήνα (Εικόνες 12, 13, 14). Με το ολοκληρωμένο πρόγραμμα πέτυχαν μεγαλύτερο δείκτη στροφής προς τα βόρεια. Έτσι προκλήθηκε μια μέση μετακίνηση 6 δευτέρων του τόξου την ημέρα, η οποία αντιστοιχούσε σε 120 λίτρα χώματος. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ο πύργος έδειξε μία τάση να μετακινηθεί προς την ανατολή. Έτσι χρειάστηκε να αφαιρεθεί 20% περισσότερο χώμα από τη δυτική πλευρά για ελεγχθεί η μετακίνηση.

Η αντίδραση του πύργου στην αφαίρεση του εδάφους ήταν πολύ θετική και έτσι οι εργάτες αφαίρεσαν 3 από τα βάρη μολύβδου με την προοπτική της σταδιακής αφαίρεσης και όλων των υπολοίπων ράβδων μέχρι το τέλος της διαδικασίας εκσκαφής. Έτσι άρχισε η αφαίρεση των ράβδων μολύβδου με συχνότητα δύο ράβδων ανά εβδομάδα. Αργότερα αυξήθηκε σε τρεις ανά εβδομάδα και έπειτα τέσσερις. Η αφαίρεση των ράβδων είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης ανατροπής, αλλά η αφαίρεση εδάφους συνέχισε να είναι αποτελεσματική.

Η μείωση της κλίσης κατά μισό βαθμό μπορεί να μην είναι ορατή σε έναν κοινό παρατηρητή, αλλά ήταν αρκετή για να σταθεροποιήσει τα θεμέλια και να μειώσει κατά σημαντικό ποσοστό της τάσεις στην τοιχοποιία. Η μείωση της κλίσης ισοδυναμεί με μια μετακίνηση του έβδομου ορόφου προς το Βορρά κατά 442 χιλιοστά. Ο πύργος τώρα έχει επιστρέψει στη γωνία κλίσης που είχε πριν την εκσκαφή του πεζοδρομίου από τον Gherardesca.



Εικόνα 13 : Τα Γεωτρύπανα που χρησιμοποιήθηκαν για την Εφαρμογή της Μεθόδου Αφαίρεσης Εδάφους

Εικόνα 14 : Σχέδιο περιγραφής της Μεθόδου Αφαίρεσης Εδάφους

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έπειτα από αυτή την επέμβαση στον κεκλιμένο πύργο της Πίζας αναπτύχθηκαν δύο σενάρια για το πώς μπορεί να συμπεριφερθεί ο πύργος στο μέλλον. Το απαισιόδοξο λέει ότι ο πύργος θα μείνει σταθερός για λίγο και θα ακολουθήσει μια επανάληψη της περιστροφής προς τα νότια. Με αυτό το σενάριο θα πάρει 300 χρόνια για να απαιτηθεί μία νέα επέμβαση στον πύργο. Ένα αισιόδοξο σενάριο λέει ότι η συνεχιζόμενη στροφή θα πάψει, εκτός από μερικές μικρές κυκλικές μετακινήσεις λόγω εποχιακών αλλαγών στον υδροφόρο ορίζοντα και την επιρροή διαφόρων καθιζήσεων, οι οποίες θα επηρεάσουν ολόκληρη την πλατεία και κατά συνέπεια τον πύργο.

Η τεχνική της αφαίρεσης εδάφους αποδείχτηκε μία ήπια μέθοδος αύξησης της σταθερότητας του πύργου και ταυτόχρονα απόλυτα συμβατή με την απαίτηση αρχιτεκτονικής διατήρησης του κτηρίου.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] www.icivilengineer.com/Big_Project_Watch/Pisa_Tower_Restoration/
- [2] Finzi L., Sanpaolesi L., Baertelletti R., **Investigation on the Masonry of the Leaning Tower of Pisa**, IABSE Symposium Rome 1993, Prevention of the Architectural Heritage, Vol. 70, Rome, pp.115-122, 1993
- [3] Macchi G., Ruggeri G., Eusebio M., Moncecchi M., **Structural Assessment of the Leaning Tower of Pisa**, IABSE Symposium Rome 1993, Prevention of the Architectural Heritage, Vol. 70, Rome, pp.401-408, 1993
- [4] Bohn K., **Strengthening of Pisa Tower by External Post- Tensioning**, IABSE Symposium Rome 1993, Prevention of the Architectural Heritage, Vol. 70, Rome, pp.715-716, 1993
- [5] Zhou Z., Ogot M., Schwartz L., **A finite element analysis of the effects of an increasing angle on the tower of Pisa**, Finite Elements in Analysis and Design 37, pp.901-911, 2001
- [6] Burland J., Jamiolkowski M., Viggiani C., **Preserving Pisa’s Treasure**, Civil Engineering Magazine, 2002,
www.icivilengineer.com/Big_Project_Watch/Pisa_Tower_Restoration/
- [7] www.GreatBuildings.com (Λήψη Φωτογραφικού Υλικού)