επίπτωση της διάνοιξης του Μετρό Θεσσαλονίκης στον φέροντα οργανισμό της Αψίδας του Γαλερίου («Καμάρας»)

ΣΟΦΙΑΝΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΟΦΙΑΝΟΣ ΜΙΧΑΗΛ ΣΕΞΤΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΣΤΥΛΙΑΝΙΔΗΣ ΚΟΣΜΑΣ-ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

περίληψη

Όταν προβλέπεται μια σοβαρή παρέμβαση στο περιβάλλον μιας υφιστάμενης κατασκευής, το πρόβλημα της εκτίμησης της συμπεριφοράς της είναι πολυπαραμετρικό και σύνθετο. Στην περίπτωση αυτή είναι συνηθισμένη η καταφυγή σε έντονα μέτρα επέμβασης, για λόγους κάλυψης των σχετικών αβεβαιοτήτων, «προς την πλευρά της ασφαλείας». Αν όμως τα μέτρα αυτά είναι ως ένα βαθμό δικαιολογημένα και εύλογα για συνήθη κτίρια, για μνημειακές κατασκευές μπορεί να οδηγούν σε υπερβολικές επεμβάσεις, οι οποίες θίγουν την αυθεντικότητα τόσο της κατασκευής όσο και του περιβάλλοντός της. Υπό την έννοια λοιπόν αυτή, μια καλύτερη προσέγγιση στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας κατασκευής περιορίζει τα μέτρα επέμβασης στα απολύτως αναγκαία, μερικές μάλιστα φορές, όπως στην παρούσα περίπτωση, μπορεί και να τα αποτρέψει πλήρως. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση των ενδεχομένων επιπτώσεων της διάνοιξης της διπλής σήραγγας του Μετρό Θεσσαλονίκης στο φέροντα οργανισμό της Αψίδας του Γαλερίου (Καμάρα), με τη χρήση σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων αριθμητικής ανάλυσης. Οι επιπτώσεις αυτές εκτιμώνται με βάση τις προκύπτουσες απόλυτες και διαφορικές καθιζήσεις στη θέση του μνημείου αλλά και τη συνακόλουθη πιθανή επαύξηση των εντατικών μεγεθών (ορθών και διατμητικών τάσεων) στον υπό μελέτη φορέα. Επιδιώχθηκε η κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής, του εδάφους και της σήραγγας συνεκτιμώντας την μεταξύ τους αλληλεπίδραση υπό στατική φόρτιση και την επιρροή της απώλειας όγκου (volume loss) κατά την εκσκαφή. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε σύγκριση της αριθμητικής προσέγγισης με αντίστοιχα τρισδιάστατα προσομοιώματα του φορέα αλλά και με διαθέσιμες εμπειρικές μεθόδους ώστε να υπάρξει αυξημένος βαθμός αξιοπιστίας της ανάλυσης.

1. εισαγωγή

Αποτελεί συνηθισμένο φαινόμενο σε σύγχρονες μεγαλουπόλεις, η χάραξη υπογείων μέσων μεταφοράς σταθερής τροχιάς να διατέμνει τον πυκνοδομημένο αστικό ιστό του εμπορικού ή του ιστορικού τους κέντρου. Είναι επίσης ενδεχόμενο η γειτνίαση του άξονα του Μετρό με μνημεία μεγάλης ιστορικής και πολιτισμικής σημασίας να οδηγεί σε σημαντικές καθιζήσεις στα γειτνιάζοντα κτίρια. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι απαραίτητο να προηγείται της κατασκευής του Μετρό η ενδελεχής μελέτη των πιθανών επιπτώσεων της διάνοιξης της σήραγγας επί της στατικής επάρκειας των υπερκείμενων κατασκευών που βρίσκονται στη ζώνη επιρροής του έργου. Οι επιπτώσεις αυτές συναρτώνται με το μέγεθος των μονίμων μετακινήσεων του εδάφους κατά τη διάνοιξη των σηράγγων (Rots, 2000, Charles et al., 2004) καθώς και, μακροπρόθεσμα, των δονήσεων που προκαλούνται από την ίδια τη λειτουργία του Μετρό που μπορεί να μην είναι αμελητέες όπως αποδείχθηκε στην περίπτωση της Αθήνας όπου παρατηρήθηκαν σημαντικές καθιζήσεις σε αρκετές θέσεις (πλατεία Καραϊσκάκη, Αγίου Κωνσταντίνου, Ομόνοια, Πανεπιστημίου, Νίκης στο Σύνταγμα αλλά και στη λεωφόρο Βουλιαγμένης μεταξύ άλλων). Το πρόβλημα αυτό επιτείνεται ακόμη

περισσότερο από το γεγονός ότι συχνά, πόλεις κτίζονται επί άλλων ιστορικών πόλεων, με αποτέλεσμα η εδαφική διαστρωμάτωση να μην είναι συνεχής αλλά να περιλαμβάνει πληθώρα χαλαρότερων σχηματισμών αποτελούμενων από ερείπια που έχουν συσσωρευτεί ανά τους αιώνες (Hatzigogos et al., 1988).

Ο στόχος της εργασίας αυτής, είναι να εξειδικεύσει τον ανωτέρω προβληματισμό στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης και να αξιοποιήσει τις σύγχρονες δυνατότητες αριθμητικής ανάλυσης προκειμένου να εκτιμήσει τις πιθανές επιπτώσεις της διάνοιξης της σήραγγας του υπό κατασκευή Μετρό στον φέροντα οργανισμό ενός σημαντικού μνημείου στο κέντρο της πόλης. Εν προκειμένω, μελετάται η επιρροή της διάνοιξης στην Αψίδας του Γαλερίου, κτίσμα γνωστό ως «Καμάρα» (Εικόνα 1) του οποίου η μορφή αποτελεί σημείο αναφοράς από τη Ρωμαϊκή περίοδο μέχρι σήμερα. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά τα ιστορικά και αρχιτεκτονικά στοιχεία του μνημείου, οι τεχνικές λεπτομέρειες της διάνοιξης του Μετρό στη θέση του μνημείου, αναλυτικοί υπολογισμοί και η μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης που επιλέχθηκε για την εκτίμηση των καθιζήσεων που αναμένεται να προκληθούν από την κατασκευή του Μετρό καθώς και εκτιμήσεις αναφορικά με την συνακόλουθη πρόσθετη ένταση επί του σώματος του μνημείου.

> 2. Αψίδα του Γαλέριου (Καμάρα)

Η αψίδα του Γαλέριου (Καμάρα) αποτελεί μέρος του ανακτορικού συγκροτήματος (Μακαρόνας, 1969) που έκτισε ο Γαλέριος στη Θεσσαλονίκη. Κατά την πρώτη πενταετία του 4ου αιώνα μ.Χ. έκτισε στη Θεσσαλονίκη ένα λαμπρό οικοδομικό συγκρότημα, που σύμφωνα με τις ιστορικές πηγές ήταν τα "βασίλεια" δηλαδή τα ανάκτορα. Τα ανάκτορα, συνολικής έκτασης 180.000 τ.μ., αποτελούσαν μια μικρή πόλη, με πληθώρα κτηρίων και μνημειακών οικοδομημάτων. Από τις ανασκαφές που έχουν γίνει ξεχωρίζει ένα οκταγωνικής μορφής κτήριο, πλαισιωμένο εσωτερικά με κυκλικές αψίδες, που σκεπαζόταν με τρούλο. Το οκτάγωνο δεν είναι εξακριβωμένο για ποια χρήση προοριζόταν. Το συγκρότημα κτίσθηκε σε δύο άξονες με κάθετη διάταξη. Ο ένας άξονας είχε κατεύθυνση από τα Νοτιοδυτικά προς τα Βορειοανατολικά και ταυτίζεται με τη σημερινή οδό Δημητρίου Γούναρη. Ο δεύτερος άξονας ακολουθούσε τη σημερινή Εγνατία. Στο σημείο που διασταυρώνονται οι δύο άξονες κτίστηκε ένα λαμπρό μνημείο, η Καμάρα, του οποίου ο προορισμός δεν ήταν πρακτικός αλλά αναμνηστικός και τιμητικός. Πρόκειται για ένα θριαμβικό τόξο που κατασκευάστηκε λίγο πριν το 305 μ.Χ. ύστερα από την οριστική νίκη του Γαλέριου κατά των Περσών. Η διάταξη της Καμάρας ήταν τέτοια ώστε να περνούν κάτω απ' αυτήν και να διασταυρώνονται ακριβώς στο κέντρο της, οι δύο μεγάλες οδικές αρτηρίες, η σημερινή Εγνατία και η οδός που ξεκινούσε από την Καμάρα και κατέληγε στη νότια πύλη του περιβόλου της Ροτόντας. Η Ροτόντα αποτελούσε ένα περίκεντρο κτήριο με εσωτερικές κόγχες, του οποίου ο προορισμός ήταν λατρευτικός. Η κατασκευή της Καμάρας βασίστηκε σε δύο παράλληλους τοίχους, μήκους 37m περίπου και πάχους 3,80m (σήμερα διασώζεται ο ένας σε μήκος 27m). Οι δύο τοίχοι απείχαν 9m ο ένας από τον άλλο και άφηναν τρία ανοίγματα τοξωτά, ένα μεγάλο στο κέντρο, πλάτους 9,70m και δύο άλλα μικρότερα στα πλάγια, πλάτους 4.85m. Έτσι, όλο το συγκρότημα στηριζόταν σε οκτώ πεσσούς, τέσσερις κύριους στο κέντρο και από δύο δευτερεύοντες στα πλάγια. Κάτω από το κεντρικό άνοιγμα, που είχε ύψος περίπου 12.50m περνούσε η σημερινή Εγνατία οδός, η Λεωφόρος κατά τους Βυζαντινούς ή Μεγάλη οδός του Βαρδάρ κατά την Οθωμανική περίοδο. Η ονομασία Εγνατία δόθηκε μετά την απελευθέρωση της πόλης το 1912 καθώς η ρωμαϊκή οδός Via Egnatia, που ξεκινούσε από το Δυρράχιο και έφθανε ως την Κωνσταντινούπολη, δεν περνούσε μέσα από την πόλη. Τα δάπεδα των στοών ήταν ψηλότερα από το κατάστρωμα της οδού, ήταν δηλαδή διαμορφωμένα σαν πεζοδρόμια. Το κεντρικό τμήμα της Καμάρας κάλυπτε ένας μακρουλός τρούλος, υποστηριζόμενος στις τέσσερις γωνίες από σφαιρικά τρίγωνα ενώ το εσωτερικό ύψος του τρούλου από το δάπεδο ήταν περίπου 15m.Τα

άλλα δύο πλαϊνά τμήματα στεγάζονταν από απλές καμάρες, χαμηλότερες από τον τρούλο, αλλά ψηλότερες από τα πλάγια τοξωτά ανοίγματα των τοίχων. Η δεύτερη δίοδος, η οποία είχε ως αφετηρία το μεγάλο πρόπυλο των ανακτόρων, περνούσε κάθετα κάτω από το τόξο, κάθετα προς την "Εγνατία" και οδηγούσε διαμέσου της πομπικής οδού προς τη Ροτόντα. Οι πεσσοί ήταν κτισμένοι με τη μεικτή τεχνική (opus mixtum), δηλαδή εναλλασσόμενες ζώνες πλίνθων και λαξευμένων λίθων. Συγκεκριμένα, οι τέσσερις πεσσοί ήταν χτισμένοι από χοντρά μάρμαρα, παρμένα από παλαιότερα μνημεία και προσαρμοσμένα ακατάστατα με ισχυρό ασβεστοκονίαμα.



Εικ.1 : Ανακτορικό συγκρότημα Γαλερίου και διαδοχικές όψεις της Καμάρας από τη Ρωμαϊκή εποχή μέχρι σήμερα.

Fig.1: Galerios complex view of Kamara (Galerios Arch) from the Roman to contemporary times.

Ο πυρήνας ήταν επενδεδυμένος από άλλα μάρμαρα και χοντρές πλάκες, τοποθετημένες με εναλλασσόμενη διάταξη, οριζόντια και κάθετη. Πάνω στην επένδυση αυτή ήταν προσαρμοσμένες οι μαρμάρινες πλάκες με τις ανάγλυφες διακοσμήσεις. Για το χτίσιμο της υπόλοιπης Καμάρας είχαν χρησιμοποιηθεί ακανόνιστες πέτρες με ισχυρό κονίαμα και τούβλα για μια εξωτερική επένδυση πάχους 0,70m. Οι επιφάνειες των τοίχων, εκτός φυσικά των τεσσάρων κεντρικών πεσσών, καλύπτονταν από ορθομαρμαρώσεις ή κονιάματα ή ίσως και μωσαϊκά. Οι πρώτες στερεωτικές εργασίες έγιναν επί Τουρκοκρατίας (1889). Το 1945 στερεώθηκε και υποθεμελιώθηκε ο βορειοανατολικός πεσσός. Το 1952 έγιναν σε ευρεία έκταση στερεωτικές και συντηρητικές εργασίες στις επιφάνειες των δύο κεντρικών πεσσών. Το 1954 η στάθμη της Εγνατίας κατέβηκε στο σημερινό επίπεδο και εμφανίστηκαν οι βάσεις των πεσσών. Τέλος, η ΙΣΤ΄ Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων πραγματοποίησε συντήρηση, στερέωση και καθαρισμό των μαρμάρινων αναγλύφων κατά το διάστημα 1991-2001 για την εξάλειψη των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σήμερα σώζονται δύο κύριοι πεσσοί και ένας δευτερεύων, που συνδέονται με πλίνθινο τόξο.



Εικ.2 : Χάρτης γραμμή διέλευσης του Μετρό Θεσσαλονίκης Fig.2: Overview of the Thessaloniki new Metro line



Εικ.3 : Μηχάνημα Ολομέτωπης Διάνοιξης Σηράγγων (TBM) με Ασπίδα Εξισορρόπησης της Πίεσης Εδάφους EPB. Fig.3: Tunnel Boring Machine with Earth Pressure Balance.

3. τεχνικά χαρακτηριστικά του Μετρό Θεσσαλονίκης

Το Μετρό Θεσσαλονίκης (Στυλιανίδης και Χατζηγώγος, 2007, Τσότσος, 2007), μήκους 9,6 χλμ. με 13 σύγχρονους Σταθμούς, αποτελεί ένα σημαντικό εγχείρημα το οποίο θα μετασχηματίσει σημαντικά τις μετακινήσεις των κατοίκων της πόλης τα επόμενα χρόνια. Ταυτόχρονα όμως αποτελεί ένα μεγάλο τεχνικό έργο σε συνθήκες πυκνού αστικού περιβάλλοντος όπου πρόκειται να πραγματοποιηθεί η μεγαλύτερη ενιαία αρχαιολογική ανασκαφή στη Θεσσαλονίκη. Με βάση την εμπειρία της κατασκευής του Μετρό στην Αθήνα, επιλέχθηκαν μέθοδοι κατασκευής που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση την όχλησης των κατοίκων της πόλης, την παρεμπόδιση της οδικής κυκλοφορίας αλλά κυρίως των σημαντικών καθιζήσεων. Εν προκειμένω, η διάνοιξη των σηράγγων του Μετρό Θεσσαλονίκης έχει προγραμματιστεί να γίνει με τη χρήση Μηχανήματος Ολομέτωπης Διάνοιξης Σηράγγων (TBM) με Ασπίδα Εξισορρόπησης της Πίεσης Εδάφους EPB (Earth Pressure Balance), το κύριο χαρακτηριστικό της οποίας είναι η στήριξη του μετώπου εκσκαφής με την εφαρμογή σε αυτό «ελεγχόμενης εξισορροπητικής» πίεσης δια μέσου του εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού. Το μηχάνημα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη Γερμανική εταιρία Herrenknecht A.G. και θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τμημάτων σήραγγας μονής τροχιάς μεταξύ των σταθμών «Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός» και «Νέα Ελβετία» με συνολικό μήκος 7,7 χλμ. (Εικόνα 2). Το ΕΡΒ χωρίζεται σε δύο κύρια τμήματα (Εικόνα 3): (α) την κεφαλή ολομέτωπης κοπής με ασπίδα (cutterhead with shield) και (β) το σύστημα υποστήριξης (backup). Η κεφαλή κοπής είναι εξοπλισμένη με σταθερούς κοπτικούς δίσκους, σιαγόνες σύνθλιψης και ρυθμιζόμενους έκκεντρους μονταρισμένους κοπτικούς δίσκους. Η διάμετρος του ΕΡΒ είναι 6,19m και το συνολικό μήκος, συμπεριλαμβανομένου και του υποστηρικτικού τμήματος, είναι 90m. Το μηχάνημα αυτό σκάβει, μεταφέρει πίσω τα υλικά εκσκαφής, και ταυτόχρονα τοποθετεί τα έτοιμα προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος έχοντας τη δυνατότητα παράδοσης 15m έτοιμης σήραγγας σε καθημερινή βάση. Η κατασκευή των δύο ανεξάρτητων σηράγγων μονής τροχιάς του Μετρό Θεσσαλονίκης θα πραγματοποιηθεί σε βάθος 16 έως 31m. Παράλληλα, οι σταθμοί κατασκευάζονται με διαφραγματικούς τοίχους και με τη μέθοδο «κάλυψη και μετά εκσκαφή» (coverand-cut) ενώ ελαχιστοποιούνται συγκριτικά με την αρχική μελέτη οι κατασκευές σηράγγων που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος.

Στην περιοχή της Καμάρας, που αποτελεί το μνημείο ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας, προβλέπεται να διανοιχθούν 2 ανεξάρτητες σήραγγες (σε αντίθεση με τις Γραμμές 2 και 3 του Μετρό της Αθήνας όπου κατασκευάστηκε μια σήραγγα διπλής τροχιάς), διαμέτρου 6m και σε αξονική μεταξύ τους απόσταση 12m. Στη θέση της Καμάρας οι ανωτέρω σήραγγες προβλέπεται να διέρχονται σε βάθος 20m.

4. εύρεση μετακινήσεων με εμπειρικές μεθόδους

Ως πρώτο επίπεδο εκτίμησης των απόλυτων και σχετικών μετακινήσεων του μνημείου που οφείλονται στη διάνοιξη της σήραγγας, χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική μέθοδος του Peck (1969). Δεδομένου ότι η εν λόγω μέθοδος αφορά βυθίσεις ελεύθερου πεδίου, η εκτίμηση αυτή δε λαμβάνει υπόψη της την επιρροή της ανωδομής (Καμάρα). Έτσι, με την εμπειρική μέθοδο βρέθηκαν οι καθιζήσεις (κατακόρυφες μετακινήσεις) καθώς και οι οριζόντιες μετακινήσεις στα σημεία που πραγματικά βρίσκεται η Καμάρα έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση αυτών των μετακινήσεων με αυτές που προκύπτουν από την εφαρμογή της (ακριβέστερης) μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με την εμπειρική μέθοδο, η κατανομή των καθιζήσεων εγκάρσια στο διαμήκη άξονα της σήραγγας μπορεί να περιγραφεί από την ανεστραμμένη καμπύλη της κανονικής κατανομής (καμπύλη του Gauss, Εικόνα 4) και να υπολογιστεί από τις σχέσεις 4.1 έως 4.4:

$$S_v = S_{max} \cdot e^{\frac{x^2}{2i^2}}$$
 (4.1)

όπου S_v η κατακόρυφη καθίζηση σε απόσταση x από τον άξονα της σήραγγας, S_{max} η μέγιστη καθίζηση που εμφανίζεται πάνω από τον άξονα της σήραγγας, *i* η οριζόντια απόσταση του σημείου καμπής του προφίλ καθιζήσεων από τον άξονα της σήραγγας η οποία εκφράζει την τυπική απόκλιση της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων και εξαρτάται (ως *i=Kz*₀) από το δείκτη εύρους *K* που με τη σειρά του αποτελεί συνάρτηση των εδαφικών ιδιοτήτων καθώς και από το βάθος διάνοιξης (*z*₀) της σήραγγας από την επιφάνεια εδάφους έως τον άξονα αυτής. Ως θέση της μέγιστης κλίσης, το σημείο καμπής χωρίζει τη ζώνη θλίψης (sagging zone) από τη ζώνη εφελκυσμού (hogging zone) του εδάφους S_{max} προκύπτει ως:

$$S_{max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} \tag{4.2}$$

ενώ ο συντελεστής V_S αποτελεί συνάρτηση της απώλειας όγκου (volume loss, V_L) σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$V_S = V_L \frac{\pi D^2}{4} \tag{4.3}$$

Αντίστοιχα, οι οριζόντιες μετακινήσεις *S_h* προκύπτουν από τη σχέση:

$$S_h = S_v \frac{x}{z_0} \tag{4.4}$$

Επισημαίνεται ότι σε περιπτώσεις διπλών (δίδυμων) σηράγγων, όπως αυτή που μελετάται, θα πρέπει να πραγματοποιείται επαλληλία των μετακινήσεων που προκύπτουν για κάθε σήραγγα καθότι η διάνοιξη της μιας επιδρά στην άλλη, ιδιαίτερα εάν η αξονική τους απόσταση είναι μικρή. Δεδομένων των πραγματικών γεωμετρικών δεδομένων (διάμετρος σήραγγας D=6m, αξονική απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων ίση προς 12m και βάθος z₀=20m), στην παραμετρική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν δύο ακραίες τιμές του συντελεστή *K* ήτοι, *K*=0.3 για άμμώδες έδαφος και *K*=0.6 για αργιλικό, ενώ ο συντελεστής απώλειας όγκου V_L έλαβε τέσσερις τιμές (0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%). Έτσι, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 διαφορετικές επιλύσεις και ελήφθησαν 16 διαφορετικά διαγράμματα μετακινήσεων κατά μήκος της Καμάρας (8 διαγράμματα κατακόρυφων καθιζήσεων και 8 διαγράμματα οριζόντιων μετακινήσεων).



Εικ.4: Διάγραμμα κατανομής βυθίσεων ελεύθερης επιφάνειας εξαιτίας διάνοιξης κυκλικής σήραγγας διαμέτρου D.

Fig.4: Diagram of the free field settlement distribution due to the construction of a circular tunnel of diameter D.

5. προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Σε συνέχεια της εφαρμογής της εμπειρικής μεθόδου, η οποία όπως προαναφέρθηκε οδήγησε στην εκτίμηση των μετακινήσεων (κατακόρυφων και οριζοντίων) του ελεύθερου πεδίου, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS ώστε αφενός να συνεκτιμηθεί η επιρροή της Καμάρας στις αναπτυσσόμενες βυθίσεις. αφετέρου δε να εκτιμηθεί η πιθανή δυσμενής επαύξηση του υφιστάμενου (προ διάνοιξης) εντατικού πεδίου. Για την ανάλυση αυτή θεωρήθηκε διστρωματικό έδαφος με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά (μέτρο ελαστικότητας E₁=20000 kPa , λόγος poisson v=0.3 και ειδικό βάρος γ=2 t/m³ για το βαθύτερο στρώμα και E₂=10000 kPa, v=0.35, y=2t/m³ για το επιφανειακό). Καθώς ο τρόπος λειτουργίας του (γενικής εφαρμογής προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων) ANSYS δεν επέτρεψε να γίνει απευθείας εισαγωγή της απώλειας εδαφικού όγκου VL που οφείλεται στην κατασκευή και διάνοιξη της σήραγγας, και προκειμένου να προσομοιωθούν οι «συνθήκες επένδυσης» των διανοιγόμενων σηράγγων, επιλέχθηκε ένα διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας για τα πεπερασμένα στοιχεία που (υποτέθηκε ότι) βρίσκονται εντός της σήραγγας, κατάλληλα επιλεγμένο ως συνάρτηση της δυσκαμψίας του ανώτερου εδαφικού στρώματος ώστε να διασφαλίζεται ότι οι μετακινήσεις της επιφάνειας του εδάφους που βρέθηκαν με την εμπειρική μέθοδο για το ελεύθερο πεδίο (άνευ ανωδομής) θα συμπίπτουν κατά προσέγγιση με αυτές που υπολογίζονται με το πρόγραμμα ANSYS, επίσης αγνοώντας την ύπαρξη της Καμάρας. Είναι φανερό, ότι η τιμή αυτή της δυσκαμψίας των στοιχείων επένδυσης αποτελεί συνάρτηση της σκοπούμενης απώλειας όγκου, όπως αναπτύσσεται στη επόμενη ενότητα.

Ακολούθώς πραγματοποιήθηκε μια συνολική επίλυση (συμπεριλαμβανομένου του φορέα της Καμάρας), απ' όπου υπολογίστηκαν οι μετακινήσεις (κατακόρυφες και οριζόντιες) σε όλο το μήκος της θεμελίωσής της, καθώς και οι τάσεις (εφελκυστικές και θλιπτικές) στην ανωδομή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην επίλυση αυτή υποτέθηκε, ελλείψει άλλων δεδομένων, βάθος θεμελίωσης ίσο προς δύο μέτρα αν και από παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν δεν προέκυψε σημαντική επιρροή του βάθους στην εντατική επιπόνηση της ανωδομής. Στην Εικ. 5 παρουσιάζεται το δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα της Καμάρας, του υποκείμενου εδάφους δοθείσης της διάνοιξης των δύο σηράγγων καθώς και ο παραμορφωμένος φορέας και οι κατακόρυφες τάσεις ενός τρισδιάστατου προσομοιώματος της Καμάρας εξαιτίας της καταναγκασμένης επιβολής των μετακινήσεων που οφείλονται στη εκσκαφή.

Στην περίπτωση του δισδιάστατου προσομοιώματος του φορέα της Καμάρας και του εδάφους πραγματοποιήθηκε πυκνότερη διακριτοποίηση σε θέσεις αναμενόμενης συγκέντρωσης τάσεων και παραμορφώσεων δηλαδή πλησίον της διάνοιξης. Χρησιμοποιήθηκε το επιφανειακό πεπερασμένο στοιχείο SHELL 63 με έξι βαθμούς ελευθερίας (U_x, U_y, U_z, R_x, R_y, R_z) και για λόγους σύγκρισης συνολικά επιλύθηκαν τέσσερα διαφορετικά προσομοιώματα: (α) εδαφικό προφίλ χωρίς ανωδομή (free field) (β) μόνο φορέας ανωδομής υποκείμενος στο προφίλ των μετακινήσεων που προέκυψαν από το ανωτέρω προσομοίωμα του ελεύθερου πεδίου, (γ) φορέας Καμάρας με θεμελίωση 2m επί ενδόσιμου εδάφους, και (δ) φορέας Καμάρας χωρίς θεμελίωση επί ενδόσιμου εδάφους, Το έδαφος θεωρήθηκε ότι εκτείνεται σε μήκος 100m, δηλαδή σημαντικά μακρύτερα από την περιοχή επιρροής της διάνοιξης.

Με βάση τα αρχιτεκτονικά σχέδια της Καμάρας (κατόψεις και τομές) καθορίστηκε η γεωμετρία της ανωδομής (συνολικό μήκος 27m και πλάτος 5m) ενώ τα μηχανικά χαρακτηριστικά του φορέα προσδιορίστηκαν με βάση προγενέστερες μελέτες ως ακολούθως: γ=2t/m³, E=4GPa και v=0.2. Η θεμελίωση (στα προσομοιώματα όπου συνεκτιμήθηκε) ελήφθη ως ομοιόμορφος τοίχος 2m καθ' όλο το μήκος της Καμάρας και με πάχος ίσο με το πλάτος του πεσσού, δηλαδή ίσο προς 5m, με μηχανικά χαρακτηριστικά ταυτόσημα με αυτά της ανωδομής.



Εικ.5 : Δισδιάστατο (άνω) και τρισδιάστατο (κάτω) αριθμητικό προσομοίωμα της Καμάρας συμπεριλαμβανομένου του εδάφους και της διάνοιξης της σήραγγας (άνω). Fig.5: 2D (up) and 3D (bottom) finite element model of Kamara considering the supporting soil and the tunneling (up).

6. εκτίμηση απώλειας όγκου (V_L) βάσει αριθμητικής ανάλυσης

Για την εκτίμηση της ισοδύναμης δυσκαμψίας των στοιχείων επένδυσης των σηράγγων (πεπερασμένων στοιχείων μη μηδενικής δυσκαμψίας εντός της διαμέτρου τους) πραγματοποιήθηκε σειρά αναλύσεων μέχρι την επίτευξη σύγκλισης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τις μετακινήσεις της επιφάνειας του εδάφους που βρέθηκαν με την εμπειρική μέθοδο για την περίπτωση ελεύθερου πεδίου. Θεωρήθηκε συνεπώς αρχικά, ότι η δυσκαμψία των στοιχείων επένδυσης ήταν ίση προς $\lambda^* E_2$ όπου E_2 το μέτρο ελαστικότητας του ανώτερου εδαφικού στρώματος και λ ο προς διερεύνηση μειωτικός συντελεστής. Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων των καθιζήσεων και των οριζοντίων μετακινήσεων κατά μήκος της Καμάρας για διάφορες τιμές απώλειας όγκου V_L και για θεώρηση αργιλικού εδάφους (περίπτωση K=0.6) προκύπτει ότι εάν προκριθεί ως ρεαλιστικότερη η τιμή απώλειας όγκου V_L = 0.5% τότε η κατάλληλη ισοδύναμη δυσκαμψία του υλικού εντός της σήραγγας βρίσκεται ίση προς 0.55E₂ (Εικόνα 7).



Εικ.6 : Σύγκριση καθιζήσεων (άνω) και οριζοντίων μετακινήσεων (κάτω) ως συνάρτηση της απόστασης από το σημείο αναφοράς της Καμάρας (άκρο πεσσού εγγύτερου προς τη διάνοιξη) για διάφορες τιμές απώλειας όγκου V_L (περίπτωση K=0.6).Παρατηρείται σύμπτωση αναλυτικής και αριθμητικής λύσης για $V_L = 0.5\%$ και λ =0.8.

Fig.6: Comparison of settlements (up) and horizontal displacements (bottom) as a function of the distance from the reference point (edge of Kamara closest to the excavation) for various values of volume loss V_L (soil case K=0.6).Matching between analytical and numerical results is achieved for $V_L = 0.5\%$ and λ =0.8.



Απόσταση (m)

Εικ.7 : Σύγκριση καθιζήσεων (άνω) και οριζοντίων μετακινήσεων (κάτω) ως συνάρτηση της απόστασης από το σημείο αναφοράς της Καμάρας (άκρο πεσσού εγγύτερου προς τη διάνοιξη) για διάφορες τιμές απώλειας όγκου V_L (περίπτωση K=0.6).Παρατηρείται σύμπτωση αναλυτικής και αριθμητικής λύσης για V_L = 1.5% και λ=0.55.

Fig.7: Comparison of settlements (up) and horizontal displacements (bottom) as a function of the distance from the reference point (edge of Kamara closest to the excavation) for various values of volume loss V_L (soil case K=0.6).Matching between analytical and numerical results is achieved for $V_L = 1.5\%$ and $\lambda = 0.55$.

7. επιρροή της διάνοιξης των σηράγγων στις μετακινήσεις κατά μήκος της Καμάρας

Μετά την ταυτοποίηση της αναλυτικής και της αριθμητικής λύσης σε επίπεδο καθιζήσεων και οριζοντίων μετακινήσεων ελεύθερου πεδίου, υπολογίστηκε το αντίστοιχο πεδίο μετακινήσεων με τη χρήση του προγράμματος ANSYS συνεκτιμώντας την επιρροή της Καμάρας. Στις Εικόνες 8 και 9 παρουσιάζεται το προφίλ των κατακόρυφων και οριζοντίων μετακινήσεων αντίστοιχα για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις απώλειας όγκου (V_L=0.5%, V_L=1.5%) και για όλα τα προσομοιώματα που μελετήθηκαν σε δύο διαστάσεις, ήτοι (α), (γ) και (δ).



Απόσταση (m)

Εικ.8: Σύγκριση καθιζήσεων ως συνάρτηση της απόστασης από το σημείο αναφοράς της Καμάρας (άκρο πεσσού εγγύτερου προς τη διάνοιξη) για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις απώλειας όγκου (V_L=0.5%, V_L=1.5%).

Fig.8: Comparison of settlements as a function of the distance from the reference point (edge of Kamara closest to the excavation) for various values of volume loss (V_L =0.5%, V_L =1.5%).

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης των υπό εξέταση προσομοιωμάτων του συστήματος Καμάρας-εδάφους-σηράγγων προκύπτει ότι:

(α) όπως αναμενόταν, οι καθιζήσεις του εδάφους υπό την παρουσία της Καμάρας είναι σχετικά μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές του ελεύθερου εδάφους, παρόλα αυτά όμως δεν υπερβαίνουν τις 2cm ακόμη και για (τη δυσμενή) τιμή απώλειας όγκου V_L=1.5%.

(β) η παρουσία της θεμελίωσης αμβλύνει σημαντικά τη διαφοροποίηση των μετακινήσεων (οριζοντίων και κατακόρυφων) που παρατηρούνται στο άνοιγμα μεταξύ των δύο πεσσών εν τη απουσία της, καθώς εξομαλύνει και καθιστά τελικά γραμμικό το προφίλ των μετακινήσεων (ιδιαίτερα των οριζοντίων).

(γ) δεδομένης συνεπώς της ύπαρξης της θεμελίωσης στον πραγματικό φορέα, προκύπτει ότι υπό τους καταναγκασμούς της διάνοιξης των δύο σηράγγων η Καμάρα αναμένεται μεν να στραφεί ως στερεό σώμα εν γένει, χωρίς όμως αυτό να σχετίζεται με υπερβολικές μετακινήσεις.





Απόσταση (m)

Εικ.9 : Σύγκριση οριζοντίων μετακινήσεων ως συνάρτηση της απόστασης από το σημείο αναφοράς της Καμάρας (άκρο πεσσού εγγύτερου προς τη διάνοιξη) για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις απώλειας όγκου (V_L=0.5%, V_L=1.5%).

Fig.9: Comparison of horizontal displacements as a function of the distance from the reference point (edge of Kamara closest to the excavation) for various values of volume loss (V_L =0.5%, V_L =1.5%).

8. επιρροή της διάνοιξης των σηράγγων στην εντατική κατάσταση της Καμάρας

Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις επί του σώματος της Καμάρας εξαιτίας της διάνοιξης των δύο σηράγγων για τα υπό εξέταση αριθμητικά προσομοιώματα. Σημειώνεται ότι η θλιπτική αντοχή του φορέα ελήφθη ίση προς 4 MPa ενώ η εφελκυστική ίση προς 0,25 MPa (Στυλιανίδης και Ιγνατάκης, 2006). Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης προκύπτει ότι:

(α) όπως αναμενόταν, οι μεγαλύτερες τιμές εφελκυστικών τάσεων συναρτώνται με τις οριζόντιες ορθές τάσεις σ_{xx} ενώ οι μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις (κατ ' απόλυτη τιμή) με τις κατακόρυφες ορθές τάσεις σ_{yy}.

(β) οι τιμές των θλιπτικών τάσεων είναι πολύ μικρότερες από τις επιτρεπόμενες (δεν υπερβαίνουν το 10% της διαθέσιμης αντοχής).

(γ) οι τιμές των εφελκυστικών τάσεων είναι επίσης μικρότερες των επιτρεπομένων οδηγώντας σε τιμή συντελεστή ασφαλείας ίσο προς 1.33 για τη δυσμενέστερη περίπτωση απώλειας όγκου.

(δ) η διάνοιξη των σηράγγων ελάχιστα διαφοροποιεί (έως 10%) τις ανωτέρω τιμές των αναπτυσσομένων (εφελκυστικών, θλιπτικών και διατμητικών) τάσεων γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο μεγάλο βάθος του άξονα της χάραξης που διέρχεται 20m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους)

(ε) η ύπαρξη της θεμελίωσης ελάχιστα διαφοροποιεί (έως 11%) τις τιμές των αναπτυσσομένων τάσεων (εφελκυστικών, θλιπτικών και διατμητικών) συνεπώς ο ακριβής προσδιορισμός της γεωμετρίας της δεν είναι κρίσιμος από άποψη έντασης, παραμένει όμως σημαντικός αναφορικά με το προφίλ των βυθίσεων.

9. συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διερευνήθηκαν οι ενδεχόμενες επιπτώσεις της διάνοιξης της διπλής σήραγγας του Μετρό Θεσσαλονίκης στη στατική επάρκεια της Αψίδας του Γαλερίου (Καμάρας). Επιδιώχθηκε η κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής, του εδάφους και της σήραγγας συνεκτιμώντας την μεταξύ τους αλληλεπίδραση υπό στατική φόρτιση και την επιρροή της απώλειας όγκου (volume loss). Παράλληλα πραγματοποιήθηκε σύγκριση της αριθμητικής προσέγγισης με αντίστοιχα τρισδιάστατα προσομοιώματα του φορέα αλλά και διαθέσιμες εμπειρικές μεθόδους ώστε να υπάρξει αυξημένος βαθμός αξιοπιστίας της μελέτης. Από την μελέτη αυτή προκύπτει ότι:

- δεδομένου του μεγάλου βάθους στο οποίο πρόκειται να πραγματοποιηθεί η διάνοιξη δεν αναμένεται σημαντική επιβάρυνση του μνημείου καθώς οι πρόσθετες καθιζήσεις είναι της τάξης των 2cm υπό το δυσμενέστερο σενάριο απώλειας όγκου ενώ οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι αμελητέες.
- η αναμενόμενη πρόσθετη ένταση στον φορέα δεν υπερβαίνει το 10% της υφιστάμενης οδηγώντας έτσι σε έναν ικανοποιητικό συντελεστή ασφαλείας έναντι εφελκυσμού.
- η καλή γνώση των εδαφικών ιδιοτήτων, η διερεύνηση της γεωμετρίας της θεμελίωσης και η αντιμετώπιση της ανωδομής και του υπεδάφους ως ένα ενιαίο σύνολο μεγάλης κλίμακας, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες του προβλήματος.
- ο ανωτέρω περιορισμός των αβεβαιοτήτων είναι δυνατόν υπό προϋποθέσεις να αποτρέψει (ακόμη και μέχρι μηδενισμού) τη λήψη τυχόν υπερβολικών μέτρων προστασίας του εν λόγω μνημείου, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με κατάλληλα στοχευμένες επί τόπου μετρήσεις κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου.
- εκτιμάται ότι η διαδικασία που προτείνεται μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες περιπτώσεις ιστορικών κατασκευών επιτυγχάνοντας μια εύλογη εξισορρόπηση μεταξύ της επιδιωκόμενης ασφάλειάς τους έναντι της διέλευσης του Μετρό και της αποφυγής εκτεταμένων επεμβάσεων, μη τεκμηριωμένων επαρκώς.

ευχαριστίες

Ευχαριστίες οφείλονται προς την κ. Φανή Αθανασίου, Αρχιτέκονος της ΙΣΤ' Εφορείας Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων, για το προσωπικό της ενδιαφέρον και την επιμέλεια του υλικού που παραχωρήθηκε στους συγγραφείς.

θεμελίωση	: 1,5 %	0,55*E ₂	max εφελικυσμ	182,196	110,913	146,189
μελίωση Χωρίς Ε	= 1,5 % V _L =	0,55*E ₂ >	max θλίψη	-255,144	-656,939	-190,636
			max εφελκυσμ	185,995	23,609	127,490
θεμελίωση Με θε	= 0,5 % V _L =	0,80*E ₂ >	max θλίψη	-229,510	-657,631	-172,264
			max εφελκυσμ	161,327	119,951	152,575
μελίωση Χωρίς Ε	= 0,5 % VL =	0,80*E ₂ >	max θλίψη	-259,189	-653,944	-192,539
			max εφελκυσμ	176,516	24,464	131,279
θεμελίωση Με θε	σήραγγες	1,00*E ₂ >	max θλίψη	-228,494	-654,423	-172,308
			max εφελκυσμ	151,140	124,385	155,718
μελίωση Χωρίς (σήραγγες Χωρίς	1,00*E ₂ >	max θλίψη	-261,125	-652,693	-193,487
			max εφελικυσμ	171,716	24,887	133,156
Με θε	Χωρίς ι	^ 	max θλίψη	-228,055	-653,057	-172,524
TAZEIZ (KPa)				σ _{xx} (KPa)	^σ yy (KPa)	σ _{xy} (KPa)

βιβλιογραφία

- 1. Charles, N., Simons, N. & Menzies, B. (2004) Soil-structure Engineering of Deep Foundation, Excavations and Tunnels, Αθήνα.
- Μακαρόνας Χ. (1969) Η Καμάρα, το θριαμβικό τόξο του Γαλερίου στη Θεσσαλόνικη, Θεσσαλονίκη.
- 3. Franzius, J.N. (2003) Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence, Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London
- 4. Κορδελούλη, Μ., Μιχαλοπούλου, Α και Σακελλαρίου, Μ. (2005) Καθιζήσεις και συγκλίσεις προκαλούμενες από τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων, Αναλυτικές και υπολογιστικές μέθοδοι εκτίμησης, 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20 Μαΐου.
- 5. Peck, B. (1969) Deep excavations and tunneling if soft ground, Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: State-of-the-Art Volume. Mexico: Department of Transportation Federal Highway Adminstrator, 225-290.
- Rots JG. (2000) Settlement damage predictions for masonry. In Maintenance and Restrengthening of Materials and Structures - Brick and Brickwork, Verhoef LGW, Wittmann FH (eds). Proceedings International Workshop on Urban Heritage and Building Maintenance. Freiburg: Aedificatio; 47-62.
- Στυλιανίδης Κ., Χατζηγώγος Θ. (2007) Αφιέρωμα στο Μετρό Θεσσαλονίκης, Περιοδικό Πολυμήχανο, τεύχος 19.
- 8. Στυλιανίδης Κ., Ιγνατάκης Χ. (2006) Κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία (Πανεπιστημιακές παραδόσεις), Θεσσαλονίκη.
- Τσότσος Σ. (2007) Τα γεωτεχνικά προβλήματα κατά την κατασκευή ενός Μετρό Αφιέρωμα στο Μετρό Θεσσαλονίκης, Περιοδικό Πολυμήχανο, τεύχος 19.
- 10. Hatzigogos Th., Tsotsos S. & Manou-Andreadis N (1988) Geotechnical problems of the foundations of Byzantine and post Byzantine monuments in Thessaloniki, Greece, Proceedings of an international symposium organized by the Greek national group of IAEG, Athens.

Σοφιανός Νικόλαος

διπλ. πολιτικός μηχανικός Α.Π.Θ. e-mail: nsofiano@civil.auth.gr

Σοφιανός Μιχαήλ

διπλ. πολιτικός μηχανικός Α.Π.Θ. e-mail: msofiano@civil.auth.gr

Σέξτος Αναστάσιος

λέκτορας Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 54124, Θεσ/νίκη τηλ.: 2310995697, e-mail: asextos@civil.auth.gr

Στυλιανίδης Κοσμάς-Αθανάσιος

καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 54124, Θεσ/νίκη τηλ.: 2310995803, e-mail: kcstyl@civil.auth.gr

Χατζηγώγος Θεόδωρος

καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 54124, Θεσ/νίκη τηλ.: 2310995713, e-mail: hatz@civil.auth.gr

Extended summary

Effect of the Thessaloniki Metro excavation on the structural integrity of the Arch of Galerious (Kamara).

The present study focuses on the investigation of the potential effect of the tunneling works for the Thessaloniki Metro on the structural integrity of the Arch of Galerious (known as 'Kamara'). The approach adopted, involved the use of state-of-the-art computational tools for the numerical analysis of the coupled monument-subsoil-tunnel system in order to elaborate the assessment of the absolute and relative displacements of the arch as well as the anticipated stress increase of the superstructure due to the imposed displacements that might arise from the excavation. An effort was also made to provide reliable estimates regarding the material properties of both the monument and the soil and to describe accurately the tunnel geometry and the subsequent volume loss. Moreover, comparative assessment was performed between the 2D and 3D finite element models developed and available analytical expressions from the literature.

The results indicate that:

- given the significant depth of the tunnel axis (20m from the surface) the resulting settlements at the location of the monuments do not exceed 2cm while the horizontal displacements are essentially negligible.
- the anticipated additional stress of the superstructure arising from the imposed foundation displacements does not exceed 10% of the existing stress field leading to an acceptable safety factor of the order of 1.3.
- the good knowledge of the soil properties, the foundation and superstructure geometry and the consideration of both the monument and the subsoil as a holistic coupled system should be foreseen.
- handling of the uncertainties related to the determination of the above, might under certain circumstances prevent from extensive protective measures and interventions on monuments that are located at the vicinity of Metro works. The latter is inevitably dependent on extensive monitoring during the duration of construction.
- it is believed that the process adopted for the study of the potential effect of Metro tunneling on the structural integrity of Kamara might also be implemented for the case of other monuments as well aiming at striking a balance between the desirable levels of safety and protection measures.