

Ψηφιακή αποτύπωση μνημείων με σύγχρονες υπολογιστικές τεχνικές. Η περίπτωση του Ζινζιρλί Τζαμί στις Σέρρες

Γεώργιος Θ. Σεραφείμ

MSc Εφαρμοσμένης Πληροφορικής, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του ΔΙΠΑΕ
Τέρμα Μαγνησίας, 62124, Σέρρες

Γεώργιος Παυλίδης*

Διευθυντής Ερευνών Ερευνητικού Κέντρου Αθηνά
Πανεπιστημιούπολη Κιμμερίων, 67100, Ξάνθη

Δημήτριος Βαρσάμης

Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του ΔΙΠΑΕ
Τέρμα Μαγνησίας, 62124, Σέρρες

*Τηλ: 2541078787x225, E-mail: gpavlid@athenarc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η ψηφιοποίηση μπορεί να ορισθεί ως το μέσο για τη διατήρηση της πληροφορίας που αφορά τον πολιτισμό, τις επιστήμες και την τεχνολογία. Στον ολοένα και περισσότερο ψηφιακό κόσμο μας, η ψηφιοποίηση αποκτά μεγαλύτερη σημασία, καθώς η δημιουργία ψηφιακών υποκατάστατων δεν έχει στόχο μόνο να διασώσει τη μορφή των φυσικών οντοτήτων, αλλά και να προσφέρει καινοτόμες προσεγγίσεις στον τρόπο μελέτης και προβολής τους. Στην παρούσα εργασία η στόχευση είναι στον τομέα του Πολιτισμού και στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζεται το έργο τριδιάστατης ψηφιοποίησης του Ζινζιρλί Τζαμί στις Σέρρες με την πλέον σύγχρονη φωτογραμμετρική προσέγγιση, με στόχο να αναδείξει τις ιδιαιτερότητες και τα πλεονεκτήματα της μεθόδου και να αποτελέσει έμπνευση για αντίστοιχες εργασίες.

Λέξεις Κλειδιά: φωτογραμμετρία, 3D ψηφιοποίηση, δομή από κίνηση, όραση υπολογιστών, ψηφιακή αποτύπωση, ψηφιακή ανακατασκευή

ABSTRACT: Digitization can be defined as the means of preserving information about culture, science and technology. In our increasingly digital world, digitization is becoming significantly important, as the creation of digital substitutes or replicas not only aims to save the form of physical entities, but also to offer innovative approaches to how they are studied and disseminated. In the present work the focus is on the field of Culture and in this context the project of three-dimensional digitization of the monument of Zincirli Mosque in Serres is presented. The project utilized the most modern computational photogrammetric approach, in order to highlight the advantages of the method and to inspire more practitioners following the same approach.

Keywords: photogrammetry, 3D digitization, structure from motion, computer vision, digital recording, digital reconstruction

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ψηφιοποίηση δεν είναι άλλο από τη δειγματοληψία ενός φυσικού μεγέθους σε τακτά χρονικά διαστήματα για την παραγωγή ενός υποκατάστατου (αντίγραφου) του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Το υποκατάστατο που παράγεται από τη διαδικασία της ψηφιοποίησης αποτελεί τυπικά ένα ψηφιακό αντικείμενο, δηλαδή αποτελείται από κβαντισμένες τιμές μέτρησης, είτε σε τακτά χρονικά διαστήματα, είτε πάνω σε ένα

κανονικό χωρικό πλέγμα. Ως εκ τούτου, ένα ψηφιακό υποκατάστατο αποτελεί μια προσέγγιση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους (ή αντικειμένου). Η πρόκληση στην ψηφιοποίηση είναι να επιτευχθεί το μικρότερο δυνατό σφάλμα μεταξύ του ψηφιακού υποκατάστατου και του φυσικού μεγέθους. Η θεωρία και η τεχνολογία της ψηφιοποίησης έχει μια μακρά ιστορία στον τομέα της μηχανικής, ενώ πρόσφατα ενισχύθηκε σημαντικά και από την πληροφορική με νέες υπολογιστικές τεχνικές και ισχυρά υπολογιστικά συστήματα που επιτρέπουν πολύπλοκους υπολογισμούς, μεγαλύτερες αναλύσεις και υψηλότερη ακρίβεια στις μετρήσεις.

Ειδικότερα η τριδιάστατη (3D) ψηφιοποίηση αποτελεί τη διαδικασία εκείνη που αφορά στη δημιουργία ψηφιακών υποκατάστατων φυσικών αντικειμένων, πραγματοποιώντας μετρήσεις στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Συνήθως το αποτέλεσμα της 3D ψηφιοποίησης είναι ένα σύνολο από σημειακές τιμές που αποτελούνται από 3 συντεταγμένες χώρου (X,Y,Z) και 3 συντεταγμένες χρώματος (R,G,B), δηλαδή δημιουργούν ένα σύνολο 6-διάστατων σημειακών δεδομένων, το λεγόμενο νέφος σημείων (point cloud). Στο νέφος αυτό εφαρμόζονται στη συνέχεια εξειδικευμένοι αλγόριθμοι μετατροπής σε πολυγωνική πλεγματοσειρά (polygonal mesh) και σε χάρτη υφής (texture map), ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω χρήση των δεδομένων αυτών σε πληθώρα εφαρμογών 3D γραφικών.

Η 3D ψηφιοποίηση έχει διεισδύσει σημαντικά στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς τα τελευταία χρόνια, όπου η ανάγκη για την αποτύπωση μνημείων για λόγους διάσωσης, μελέτης, διαφύλαξης και διάδοσης είναι εξόχως υψηλή. Ειδικότερα δε στη χώρα μας, όπου η πλούσια πολιτιστική κληρονομιά αποτελεί σημαντικό κεφάλαιο της ταυτότητας του λαού μας, η 3D ψηφιοποίηση της υλικής κληρονομιάς αποκτά μια ακόμη μεγαλύτερη σημασία. Για το λόγο αυτό, στην Ελλάδα έχει γίνει σημαντική επένδυση τις τελευταίες δεκαετίες, μέσω επενδυτικών και επιχορηγούμενων εργαλείων, τόσο στην ανάπτυξη τεχνογνωσίας στον εν λόγω τομέα, όσο και στην ψηφιοποίηση της υλικής κληρονομιάς με σημαντικά αποτελέσματα, καθώς

ερευνητικές ομάδες της χώρας έχουν επιτύχει τόσο υψηλή θέση στην παγκόσμια έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα όσο και υψηλής ποιότητας έργα 3D ψηφιοποίησης της υλικής πολιτιστικής κληρονομιάς¹.

Μέχρι πρόσφατα η εφαρμογή της 3D ψηφιοποίησης απαιτούσε την προμήθεια και χρήση ιδιαίτερα εξειδικευμένου και μεγάλου κόστους εξοπλισμού και λογισμικού. Παράλληλα οι εργασίες ψηφιοποίησης απαιτούσαν (και συνεχίζουν βέβαια να απαιτούν) εξειδικευμένο και έμπειρο προσωπικό. Ιδιαίτερα στην 3D ψηφιοποίηση μνημείων και αρχιτεκτονικών συνόλων πολιτιστικής αξίας, η πολυπλοκότητα του θέματος ενισχύει ακόμη περισσότερο τη δυσκολία του έργου. Παραδοσιακά, τα έργα 3D ψηφιοποίησης αρχιτεκτονικών συνόλων αποτελούν αντικείμενο είτε της παραδοσιακής επίγεια ή εναέριας μονο-οπτικής φωτογραμμετρίας, είτε τοπογραφίας και τοπομετρίας, είτε της σάρωσης με συστήματα ακτίνων λέιζερ πεδίου, ενώ πρόσφατα προστέθηκε και η επιλογή της χρήσης μη-επανδρωμένων ιπτάμενων μέσων [1],[2].

Πέραν από τις συμβατικές τεχνικές μετρήσεων με χρήση συστημάτων ακτίνων λέιζερ [3]-[10], εμπειρικές και κλασικές φωτογραμμετρικές τεχνικές [11]-[13], η σημερινή τεχνολογία της όρασης υπολογιστών (computer vision) μας προσφέρει διάφορες αξιόπιστες και οικονομικές λύσεις συμπεριλαμβανομένων τεχνικών στερεοφωτογράφισης [14]-[16], τεχνικών αξιοποίησης της σιλουέτας [17]-[19] ή της σκίασης [20],[21] και της σκιάς [22],[23], ή ακόμη και της εστίασης [24]-[28], τεχνικών δομημένου φωτισμού [29]-[32], τεχνικών φωτομετρίας [33]-[35] αλλά και τεχνικών αξιοποίησης της κίνησης [36]-[40] και της υψής [41]-[43]. Ιδιαίτερα, η αξιοποίηση της κίνησης γνωρίζει μεγάλη άνθηση την τελευταία δεκαετία λόγω της εξέλιξης του βασικού αλγορίθμου αναγνώρισης δομής από κίνηση (structure from motion - SfM), της ενσωμάτωσης της πολύ-εικονικής στερεομετρίας (multi-view stereo) και την εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τους πολύπλοκους υπολογισμούς που απαιτούνται. Σήμερα με τον τίτλο δομή από κίνηση (SfM) νοείται η σύνθετη αυτή μέθοδος που περιλαμβάνει όλα τα βήματα, ξεκινώντας από τη φωτογράφιση του αντικειμένου από διαφορετικές οπτικές γωνίες μέχρι την τελική δημιουργία του 3D υποκατάστατου. Μάλιστα η σημαντική βελτιστοποίηση της μεθόδου SfM δίνει τη δυνατότητα με απλές φωτογραφικές μηχανές, είτε επίγεια, είτε από χαμηλού κόστους μη-επανδρωμένα ιπτάμενα μέσα, να πραγματοποιηθούν υψηλής ποιότητας ψηφιοποιήσεις, εφόσον φυσικά υπάρχει γνώση των περιορισμών και της σωστής μεθοδολογίας.

Στο πλαίσιο αυτό, επιχειρήθηκε η εφαρμογή της μεθόδου SfM για την 3D ψηφιοποίηση του μνημείου Ζινζιολί Τζαμί με εναέρια και επίγεια μέσα, εντός των υποχρεώσεων ολοκλήρωσης μεταπτυχιακής διατριβής στο ΠΜΣ Εφαρμοσμένη Πληροφορική του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής του ΤΕΙ Σερρών (πλέον Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος). Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα της ψηφιοποίησης του μνημείου και συνοψίζονται γενικά συμπεράσματα και σκέψεις από την εν λόγω εμπειρία.

II. Η 3D ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

Τα έργα 3D ψηφιοποίησης της πολιτιστικής κληρονομιάς απαιτούν εκτενή και προσεκτική σχεδίαση όλων των επιμέρους ενεργειών που περιλαμβάνουν για την επίτευξη του τελικού τους στόχου. Η υλοποίηση του κάθε έργου θα πρέπει να βασίζεται σε ένα πλάνο που καλύπτει με σαφήνεια θέματα όπως είναι τα εξής:

- Ο κύριος σκοπός και οι στόχοι του έργου
- Τα αναμενόμενα αποτελέσματα
- Το κοινό στο οποίο απευθύνονται τα παράγωγα του έργου
- Τα οφέλη από μια τέτοια δραστηριότητα
- Το προσωπικό που θα συμμετέχει στην υλοποίηση
- Η ασφάλεια και ακεραιότητα του πρωτοτύπου
- Η οργάνωση και ο χρονικός προγραμματισμός των επιμέρους εργασιών
- Ο χώρος υλοποίησης της συλλογής δεδομένων
- Διαδικασίες διαχείρισης των δεδομένων που προκύπτουν

Ο κύκλος ζωής ενός έργου 3D ψηφιοποίησης αποτελείται από διαφορετικά στάδια:

- Προετοιμασία τη διαδικασίας ψηφιοποίησης
- Μέθοδοι διαχείρισης τέχνηργων και ευπαθών αντικειμένων
- Αδειοδοτήσεις και δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας
- Συλλογή των δεδομένων (μέτρηση)
- Δημιουργία μεταδεδομένων (metadata) και παραδεδομένων (paradata)
- Αποθήκευση και διαφύλαξη του ψηφιακού πρωτότυπου υλικού
- Δημιουργία παραγώγων
- Δημοσίευση υλικού και διάδοση της πληροφορίας

Κατά την πρακτική εφαρμογή των σταδίων αυτών παρατηρούνται σχέσεις και εξαρτήσεις ανάμεσά τους, ενώ η σειρά που εμφανίζονται παραπάνω δε θα πρέπει να θεωρηθεί απόλυτη αλλά, τουλάχιστον, ενδεικτική. Πολλές φορές, η μελέτη παρόμοιων εργασιών αποτελεί σημαντική πηγή γνώσης και εμπειρίας και έναν πρακτικό οδηγό. Πρόσφατες εργασίες αποτελούν πραγματικό θησαυρό ιδεών για πιθανές υλικο-

¹ Για παράδειγμα η ομάδα του Ερευνητικού Κέντρου «Αθηνά» μέσω του ευρωπαϊκού έργου 3D-Icons (<http://3dicons-project.eu>, <http://www.ipet.gr/~akoutsou/3dicons/showall.php>) που είχε στόχο την ψηφιοποίηση μνημείων στη λίστα της UNESCO, ήταν η πρώτη που δημοσίευσε 3D μνημεία στο πανευρωπαϊκό πολιτιστικό αποθετήριο Europeana (<https://goo.gl/jqbcHE>).

τεχνικές και διαδικαστικές προσεγγίσεις. Η αναζήτηση απαντήσεων σε προηγούμενες εργασίες απαιτεί αρκετό χρόνο αλλά συνήθως αποφέρει οφέλη και αποδεικνύεται πολύτιμη. Είναι πλέον κοινά αποδεκτό πως ο χρόνος που αφιερώνεται για τη σχεδίαση και οργάνωση ενός έργου ψηφιοποίησης σχετίζεται απόλυτα με την ευχέρεια διαχείρισης και, εν τέλει, της εκτέλεσής του.

Κανένα έργο 3D ψηφιοποίησης δε θα πρέπει να ξεκινά πριν τον καθορισμό των τελικών στόχων και τη μορφή των παραδοτέων, ούτε πριν την κατάλληλη προετοιμασία και αντιμετώπιση όλων των πιθανών σχεδιαστικών αστοχιών. Για παράδειγμα, ένα έργο που έχει στόχο την προβολή πολιτιστικών αντικειμένων χωρίς την εξασφάλιση κατάλληλης αδειοδότησης από την αρμόδια Εφορεία Αρχαιοτήτων μπορεί πολύ εύκολα να βρεθεί εκτός προγραμματισμού. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση εφαρμογής μιας «α-σύμβατης» με τα μνημεία μεθόδου ψηφιοποίησης. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του χρόνου συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων και ίσως επίσης να οδηγήσει σε 3D ψηφιακά αντίγραφα που δεν πληρούν τις προδιαγραφές του έργου. Καθώς η αξία των τέχνηρων και των μνημείων είναι ανυπολόγιστη λόγω της μοναδικότητας, της σπανιότητάς τους αλλά και της πληροφορίας που φέρουν, ενώ, ταυτόχρονα, τα δομικά τους υλικά τις περισσότερες φορές είναι εύθραυστα, επιβάλλεται η εφαρμογή ειδικών μέτρων πρόσβασης και χειρισμού τους. Είναι πολύ σημαντικό κατά την εκτέλεση ενός έργου ψηφιοποίησης να μην προκληθεί η παραμικρή φθορά.

Πριν την έναρξη της συλλογής δεδομένων, πραγματοποιείται διερεύνηση του μνημείου και του περιβάλλοντος χώρου και αποφασίζεται η δυνατότητα εφαρμογής συγκεκριμένης μεθόδου ψηφιοποίησης και το αναμενόμενο αποτέλεσμα από πλευράς πλήρους ή όχι κάλυψης της επιφάνειας του μνημείου.

Ο κατάλληλος υλικοτεχνικός εξοπλισμός και το λογισμικό θα πρέπει να είναι διαθέσιμα και έτοιμα προς χρήση πριν την έναρξη του έργου. Ταυτόχρονα, κάποιες δοκιμές του εξοπλισμού είναι συνετό να πραγματοποιηθούν πριν τη συλλογή των πραγματικών δεδομένων. Είναι ευρέως αποδεκτό πως τα καλύτερα αποτελέσματα αποφέρει ο ενδεδειγμένος έλεγχος της παραμικρής λεπτομέρειας που διέπει τη διαδικασία συλλογής δεδομένων καθώς και την μετέπειτα αλυσίδα διαδικασιών επεξεργασίας τους.

Η συλλογή δεδομένων είναι μόνο η αρχή μιας ιδιαίτερα σύνθετης διαδικασίας. Τα βήματα που ακολουθούνται, αποσκοπούν στην αποτελεσματική χρήση των δεδομένων που παρέχουν τα συστήματα ψηφιοποίησης. Η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων περιλαμβάνει πέντε κύρια βήματα [16]:

- προ-επεξεργασία
- ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων
- μετατροπή σε πολυγωνικές πλεγματοσειρές
- μετά-επεξεργασία

- επεξεργασία υψών και δημιουργία εκδόσεων 3D ψηφιακών αντιγράφων διαφορετικών αναλύσεων

Ο διαχωρισμός που γίνεται στις διαδικασίες ψηφιοποίησης είναι φυσικό να μη συμβαδίζει με όλες τις διαθέσιμες μεθόδους ψηφιοποίησης. Ως εκ τούτου τα βήματα της διαδικασίας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ως ένα γενικευμένο διάγραμμα ροής εργασιών που μεταβάλλεται ανάλογα με την υιοθετημένη μέθοδο αποτύπωσης. Συνολικά, τα βήματα μιας διαδικασίας ψηφιοποίησης είναι τα εξής:

1. Συλλογή δεδομένων (γεωμετρίας και υψών)
2. Προ-επεξεργασία δεδομένων
3. Αποθρομβοποίηση στο νέφους σημείων
4. Ομαδοποίηση και οργάνωση των δεδομένων
5. Ευθυγράμμιση και ενοποίηση σαρώσεων
6. Δημιουργία πολυγωνικών πλεγματοσειρών
7. Απλοποίηση πλεγματοσειρών
8. Απαλοιφή γεωμετρικών ασυνεχειών
9. Δημιουργία υψών

III. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΟΜΗ-ΑΠΟ-ΚΙΝΗΣΗ

Η μέθοδος Δομή από Κίνηση (SfM) ανήκει στις τεχνικές υπολογιστικής φωτογραμμετρίας και αποτελεί γενίκευση της στερεο-φωτογραμμετρίας, καθώς αντί να εφαρμόζει τη γεωμετρία δύο θεάσεων (στερεοφωτογράφιση) εφαρμόζει τη γεωμετρία πολλαπλών θεάσεων (multiple view stereo) [14]. Είναι μία σύγχρονη μέθοδος που έγινε εφικτή τα τελευταία χρόνια μέσα από σημαντικές προόδους στον τομέα της όρασης υπολογιστών και υλοποίησης ισχυρών αλγορίθμων. Αποτελεί μία «παθητική» τεχνική που βασίζεται στην πολλαπλή φωτογράφιση ενός αντικειμένου με πλήρη κάλυψη της επιφάνειάς του και με σημαντική επικάλυψη μεταξύ των φωτογραφιών [2]. Η επικάλυψη αυτή εγγυάται ότι σε περισσότερες από δύο φωτογραφίες θα υπάρχει ταύτιση χαρακτηριστικών σημείων που θα οδηγήσουν με αντίστροφη μηχανική στον εντοπισμό των σημείων αυτών στον πραγματικό 3D χώρο από τον οποίο ελήφθησαν. Το πρόβλημα είναι όπως λέγεται, «αντίστροφος», δηλαδή από 2D εικόνες πρέπει να εξαχθεί 3D πληροφορία.

Επειδή η συγκεκριμένη μέθοδος στην αρχική της μορφή παράγει χαμηλής πυκνότητας νέφη σημείων (sparse point clouds), γνώρισε αποδοχή μόνο όταν συνδυάστηκε με αλγόριθμους δημιουργίας πυκνών νεφών σημείων που προκύπτουν από την εφαρμογή της πολυεικονικής στερεοφωτογράφισης (Multiple View Stereo – MVS). Έτσι δημιουργήθηκε η πολύ επιτυχημένη μέθοδος SfM-MVS που ουσιαστικά αποτελεί σήμερα τη μέθοδο δομή από κίνηση [2].

Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό από πολύπλοκους και απαιτητικούς σε υπολογιστική ισχύ και μνήμη αλγόριθμους που συμβάλλουν στη δημιουργία του 3D μοντέλου μέσα από μια σειρά μη-ταξινομημένων φωτογραφιών που προβάλλουν το μνημείο από διαφορετικές οπτικές γωνίες [2]. Για να μπορέσει να

αναγνωρίσει χαρακτηριστικά κοινά σημεία στο σύνολο των εικόνων, αυτές θα πρέπει να παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά επικάλυψης. Παρόλα αυτά δεν απαιτείται η χρήση φωτογραμμετρικών σταθερών/στόχων και αυτό την κάνει ακόμα πιο φιλική για αποτυπώσεις σε εξωτερικούς χώρους.

Τα βασικά βήματα κατά την επεξεργασία των φωτογραφιών για τη δημιουργία του 3D μοντέλου με τη μέθοδο SfM-MVS είναι τα παρακάτω:

- 1) Ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων στις φωτογραφίες με την εφαρμογή αλγορίθμων όπως Scale Invariant Feature Transform (SIFT) και Speeded Up Robust Features (SURF). Στη συνέχεια οι μεταβολές των θέσεων των σημείων αυτών θα αναζητηθούν και στις υπόλοιπες φωτογραφίες.
- 2) Σύγκριση και αναγνώριση των αντίστοιχων σημείων που έχουν εξάγει οι αλγόριθμοι SIFT και SURF μέσω της ανάλυσης όλων των δυνατών συνδυασμών εικόνων χρησιμοποιώντας αυστηρές διαδικασίες όπως η τετραγωνική ταύτιση (quadratic matching) ή γρήγορη προσέγγιση όπως η αναζήτηση κατά k-d tree.
- 3) Εφαρμογή του αλγόριθμου Bundle Adjustment ο οποίος βασιζόμενος σε δεδομένο σύνολο ομόλογων σημείων, υπολογίζει τις 3D συντεταγμένες που καθορίζουν τη γεωμετρία στη σκηνή, τις παραμέτρους της σχετικής κίνησης και τα οπτικά χαρακτηριστικά των καμερών. Ο αλγόριθμος λειτουργεί πρακτικά ως μέθοδος 3D ανακατασκευής που οδηγεί στη βέλτιστη 3D δομή κατά την έννοια ενός τετραγωνικού σφάλματος.
- 4) Εφαρμογή της πυκνής πολυεικονικής στερεοφωτογράφισης (MVS) χρησιμοποιώντας γειτονικές (χωρικά) εικόνες, ώστε να προκύψει το πυκνό νέφος σημείων που θα αποτελέσει και την αρχική 3D δομή από την οποία θα δημιουργηθεί το τριγωνικό πλέγμα.

Κάθε βήμα στη διαδικασία περιλαμβάνει μια πληθώρα μαθηματικών υπολογισμών και κατά συνέπεια απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς και μνήμη. Καθώς η μέθοδος βασίζεται στην αναγνώριση σημείων σε επιφάνειες αντικειμένων, η ποιότητα της 3D ανακατασκευής σχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη έντονων γεωμετρικών-μορφολογικών χαρακτηριστικών, διαφορετικά μπορεί να προκύψουν λανθασμένες αντιστοιχίες σημείων και τελικά έντονος θόρυβος μέτρησης και χαμηλής ποιότητας 3D ανακατασκευής. Σε περιπτώσεις απουσίας γεωμετρικής πολυπλοκότητας (π.χ. ομοιόμορφος επίπεδος τοίχος) υπάρχει περίπτωση απόλυτης αποτυχίας εφαρμογής της μεθόδου.

Τα 3D δεδομένα που προκύπτουν από την ορθή υλοποίηση της μεθόδου SfM-MVS μπορεί να είναι υψηλής ποιότητας, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλή σε απαιτητικές εφαρμογές ψηφιοποίησης. Η

σχεδόν αυτοματοποιημένη διαδικασία της, την καθιστά επίσης μία αποτελεσματική και χαμηλού κόστους λύση καθώς βασίζεται περισσότερο σε λογισμικό παρά σε υλικοτεχνικό εξοπλισμό [2].

IV. ΤΟ ΖΙΝΖΙΡΛΙ ΤΖΑΜΙ

Το Ζινζιρλί Τζαμί (Εικόνα 1) είναι ένα από τα παλιότερα οθωμανικά τεμένη της Ευρώπης (τέλος του 16ου αιώνα). Αποτελεί αρχιτεκτόνημα ιδιαίτερης αισθητικής, της περίφημης σχολής του αρχιτέκτονα Sinan. Είναι γνωστό μόνο με το προσηγορικό του όνομα, «Ζινζιρλί» δηλαδή «Τζαμί των Αλυσίδων», κατά μία εκδοχή από τις αλυσίδες που πιθανόν κρεμόταν ο πολυελαίος του από την οροφή. Μια άλλη εκδοχή της ονομασίας του υποστηρίζει ότι βαφτίστηκε έτσι από την ποσότητα των χρυσών νομισμάτων («ζιντζίρλια») που απαιτήθηκαν για την αποπληρωμή της επικάλυψης της στέγης με μόλυβδο κατά την εκτεταμένη επισκευή του την «περίοδο της Τουλίπας» (α' μισό του 18ου αι.). Πρόκειται για ένα τζαμί μεσαίου μεγέθους ορθογώνιου σχήματος, διαστάσεων 22,65 μ. x 19,30 μ. με προσανατολισμό ΝΑ-ΒΔ [44].

Από τα τέλη του 16ου αιώνα ως το 1922 (έτος αποχώρησης των Τούρκων) το κτίσμα λειτουργούσε κανονικά ως τζαμί. Μεταξύ 1922 και 1940 χρησιμοποιήθηκε ως αποθήκη ξυλείας. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου ως αποθήκη του στρατού. Κατά τη διάρκεια της βουλγαρικής κατοχής αφαιρέθηκαν τα φύλλα μόλυβδου της επιστέγασης για την κατασκευή βλημάτων. Μεταπολεμικά ως και το 1981-1982 ήταν αποθήκη του Δήμου Σερρών. Το 1961 ανακηρύχθηκε διατηρητέο μνημείο, ενώ αργότερα το εξαγόρασε η αρχαιολογική υπηρεσία [45].

Κατά την περίοδο 1995-2000 πραγματοποιήθηκαν από την 12η Εφορεία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων εκτεταμένες εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης του τεμένους που διήρκεσαν 10 χρόνια, οδηγώντας σε μεγάλο βαθμό, στη διατήρηση της μορφολογικής αυθεντικότητας του μνημείου, του οποίου η επαναλειτουργία για πολιτιστικές εκδηλώσεις εγκαινιάστηκε το 2013.



Εικόνα 1 – Αεροφωτογραφίες του Ζινζιρλί Τζαμί.

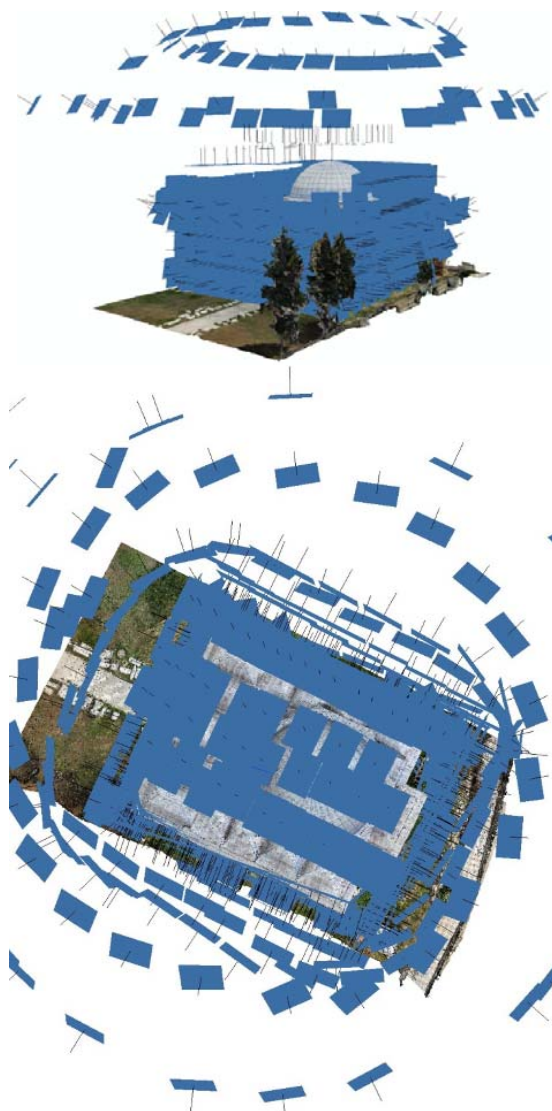


Εικόνα 2 – Δείγμα των φωτογραφιών που ελήφθησαν.

V. Η ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΖΙΝΖΙΡΑΙ ΤΖΑΜΙ

Αφού μελετήθηκε η ιστορία και τα αρχιτεκτονικά στοιχεία του μνημείου, καθώς και το ίδιο το φυσικό μνημείο και ο γύρω χώρος με επιτόπιες επισκέψεις, ελήφθη η απαιτούμενη άδεια φωτογράφισης από την Εφορεία Αρχαιοτήτων Σερρών και πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική λήψη δεδομένων με μη-επανδρωμένο ιπτάμενο μέσο, οπότε και καθορίστηκε η στρατηγική προσέγγισης του μνημείου και πλήρους κάλυψης της επιφάνειάς του. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε, σε δύο φάσεις, η συλλογή των δεδομένων, από τα οποία ένα μικρό δείγμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Συνολικά ελήφθησαν πάνω από 1000 φωτογραφίες από

τις οποίες τελικά χρησιμοποιήθηκαν 942. Οι φωτογραφίες αποτέλεσαν την είσοδο στη μέθοδο δομή από κίνηση όπως υλοποιείται από το λογισμικό Agisoft MetaShape. Στην Εικόνα 3 φαίνονται οι θέσεις της φωτογραφικής μηχανής όπως αναγνωρίστηκαν από την εφαρμογή της μεθόδου δομή από κίνηση στο εν λόγω λογισμικό. Στην απεικόνιση αυτή είναι εμφανείς οι θέσεις που είχε το μη-επανδρωμένο ιπτάμενο μέσο κατά τη διαδικασία λήψης των δεδομένων. Από τη διαδικασία προέκυψε αραιό νέφος σημείων με περί τα 3,5 εκατομμύρια σημεία αναφοράς, ενώ το τελικό πυκνό νέφος σημείων αποτελείται από περίπου 126 εκατομμύρια σημεία, ένα ιδιαίτερα μεγάλο σύνολο σημείων που προδίδει και μια επιτυχημένη διαδικασία ψηφιοποίησης. Μετά την πολυγωνοποίηση του νέφους σημείων, το τελικό πλέγμα αποτελείται από περίπου 26,5 εκατομμύρια πολύγωνα. Η ανάλυση που επετεύχθη κυμαίνεται περί τα 2,48 cm/pix, ενώ η πυκνότητα του νέφους σημείων είναι 0,163 points/cm². Στις Εικόνες 4-7 απεικονίζονται τα στάδια της ανακατασκευής του 3D υποκατάστατου του μνημείου από το αραιό νέφος, στο πυκνό νέφος, στο πολυγωνικό πλέγμα και στο τελικό φωτορεαλιστικό μοντέλο.



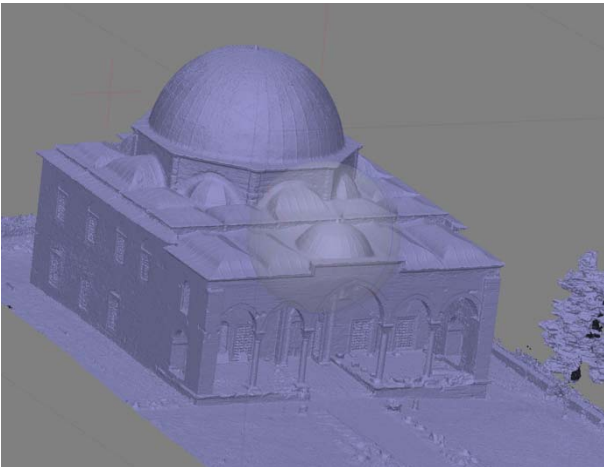
Εικόνα 3 – Οι θέσεις της φωτογραφικής μηχανής όπως αναγνωρίστηκαν από τη μέθοδο δομή από κίνηση.



Εικόνα 4 – Το αραιό νέφος σημείων του μνημείου.



Εικόνα 5 – Το πυκνό νέφος σημείων του μνημείου.



Εικόνα 6 – Το πολυγωνικό πλέγμα (χωρίς χρώμα) του μνημείου.

Η τελική 3D ανακατασκευή περιλάμβανε μόνο την εξωτερική όψη του μνημείου. Για λόγους επίδειξης του αποτελέσματος στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης της εν λόγω εργασίας, το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης μεταφορτώθηκε σε δικτυακή πλατφόρμα δημοσίευσης 3D δεδομένων και είναι διαθέσιμο στη διεύθυνση <https://skfb.ly/6RYTp>.

V. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η 3D αποτύπωση είναι ένα σημαντικό νέο εργαλείο για την τεκμηρίωση αντικειμένων και την αντίστροφη μηχανική αλλά αποτελεί και ένα πολύτιμο εργαλείο για την αρχειοθέτηση και μελέτη του πολιτιστικού

αποθέματος. Η 2D φωτογραφία δεν μπορεί να δώσει απαντήσεις στις σύγχρονες ανάγκες καταγραφής του πολιτιστικού αποθέματος, καθώς δεν μπορεί να παρέχει ρεαλιστική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων. Εδώ έγκειται η μεγάλη αξία της 3D ψηφιοποίησης.



Εικόνα 7 – Το τελικό 3D μοντέλο του μνημείου.

Η 3D αποτύπωση συμβάλλει στην επίλυση δύο σημαντικών προκλήσεων στην αρχειοθέτηση: στην αντικειμενικότητα περιγραφής (πιστότητα) και στην ταχύτητα και προσαρμοστικότητα της πραγματοποίησης της καταγραφής. Αποτελεί πλέον μια κοινή πρακτική στο χώρο του πολιτισμού με στόχο την καταγραφή, τη μελέτη και τη διάσωση των μνημείων με δυνατότητες έως και την κατασκευή φυσικών υπό κλίμακα αντιγράφων (3D printing) και τη δημιουργία εικονικών μουσείων και περιηγήσεων.

Στο χώρο της καταγραφής της πολιτιστικής κληρονομιάς κινήθηκε και η παρούσα εργασία, στο πλαίσιο μελέτης σύγχρονων τεχνολογιών 3D ψηφιοποίησης. Μετά την εξέταση των σύγχρονων μεθόδων 3D ψηφιοποίησης, εξετάστηκε η εφαρμογή της μεθόδου δομής από κίνηση (SfM) στην υλοποίηση ενός πραγματικού έργου ψηφιοποίησης στο σημαντικό μνημείο του τεμένους του Ζινζιολί στις Σέρρες, με απώτερο σκοπό τη διάχυση στον Παγκόσμιο Ιστό. Η υλοποίηση του έργου με μη-επανδρωμένο ιπτάμενο μέσο παρέχει ένα μεγάλο βαθμό αυτοματοποίησης της διαδικασίας συλλογής των πρωτογενών δεδομένων. Η χρήση ενός από τα πλέον διαδεδομένα λογισμικά εφαρμογής της μεθόδου SfM οδήγησε τελικά σε ένα ιδιαίτερα υψηλής ποιότητας αποτέλεσμα το οποίο μεταφορτώθηκε για λόγους επίδειξης σε ειδική δικτυακή πλατφόρμα παρουσίασης 3D δεδομένων.

Η επιτυχημένη εφαρμογή της μεθόδου δομής από κίνηση οδηγεί τους συγγραφείς της παρούσας εργασίας στο να προτείνουν ανεπιφύλακτα την εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου για αντίστοιχες εφαρμογές με μια ροή εργασιών που περιλαμβάνει τόσο επίγεια όσο και ιπτάμενα μέσα συλλογής δεδομένων. Φυσικά όπως και σε κάθε εφαρμογή μεθόδου, πρέπει να είναι γνωστές οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί, όπως επιγραμματικά αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία. Για περισσότερες λεπτομέρειες για την εν λόγω μέθοδο οι συγγραφείς προτείνουν τον ενδιαφερόμενο να ανατρέξει στην πραγματικά μεγάλη και ιδιαίτερα αναλυτική σχετική βιβλιογραφία, ενώ η περαιτέρω ανάλυση εδώ είναι εκτός του σκοπού της εργασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την Εφορεία Αρχαιοτήτων Σερρών για την ευγενική χορήγηση άδειας φωτογράφισης του μνημείου για τους σκοπούς της μεταπτυχιακής εργασίας του Γεωργίου Σεραφείμ. Επίσης θα θέλαμε με ευχαριστήσουμε το MSc Εφαρμοσμένης Πληροφορικής του Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδας για τη δυνατότητα και υποστήριξη για την υλοποίηση της εν λόγω διατριβής.

VI. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] "Methods for 3D digitization of cultural heritage", G. Pavlidis, A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, V. Tsioukas, C. Chamzas, Journal of cultural heritage, Vol 8, Nr. 1, 2007, pp. 93-98.

[2] "3D Ψηφιοποίηση. Δεύτερη Έκδοση", Α. Κουτσούδης, Γ. Παυλίδης, Εκδόσεις Τσότρας, Αθήνα 2019, ISBN 978-618-5309-51-0.

[3] Curless, B., Levoy, M., "Better optical triangulation through spacetime analysis" In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 1995, pp. 987-994.

[4] "Digital 3D imaging: Theory and applications", M. Rioux, Videometrics III, International Society for Optics and Photonics, Vol. 2350, 1994, pp. 2-15.

[5] "Active 3D sensing", J.A. Beraldin, F. Blais, L. Cournoyer, G. Godin, M. Rioux. National Research Council of Canada, 2003.

[6] Boehler, W., Marbs, A., "3D scanning instruments" Proceedings of the CIPA WG 6, 2002, No. 9.

[7] Wulf, O., Wagner, B., "Fast 3D scanning methods for laser measurement systems", In International conference on control systems and computer science (CSCS14), 2003, pp. 2-5.

[8] Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, K., Ginzton, M., "The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues", In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2000, pp. 131-144.

[9] "Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning", F. Remondino, Remote sensing, Vol. 3, Nr. 6, 2011, pp. 1104-1138.

[10] Arnaoutoglou, F., Koutsoudis, A., Pavlidis, G., Tsioukas, V., Chamzas, C., "Towards a Versatile Handheld 3D Laser Scanner", In Proceedings of the 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, Dresden, Germany, 2006, Vol. 2527.

[11] Livieratos, E. "Empiric, topographic or photogrammetric recording? Answers to properly phrased questions", In Proceedings of the congress, "Terrestrial Photogrammetry and Geographic Information Systems for the documentation of the National Cultural Heritage. 1992.

[12] Hanke, K., Grussenmeyer, P., "Architectural photogrammetry: Basic theory, procedures, tools", In ISPRS Commission, Vol. 5, 2002, pp. 1-2.

[13] Tsioukas, V., Patias, P., "Low cost 3D visualization and measuring 'tool' in the service of archaeological excavations", In Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conference, "The Digital Heritage of Archaeology", 2002.

[14] "Multiple view geometry in computer vision", R. Hartley, A. Zisserman, Cambridge university press, 2003.

[15] "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms", D. Scharstein, R. Szeliski, International journal of computer vision, Vol. 47, Nr. 1-3, 2002, pp. 7-42.

[16] "Stereo-vision system performance analysis", M. Bertozzi, A. Broggi, G. Conte, A. Fascioli, Enabling Technologies for the PRASSI Autonomous Robot, 2002, pp. 68-73.

[17] "Generating octree models of 3D objects from their silhouettes in a sequence of images", M. Potmesil, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 40, Nr. 1, 1987, pp. 1-29.

[18] "The visual hull concept for silhouette-based image understanding", A. Laurentini, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 16, Nr. 2, 1994, pp. 150-162.

[19] "3D SOM—A commercial software solution to 3D scanning", A. Baumberg, A. Lyons, R. Taylor, Graphical Models, Vol. 67, Nr. 6, 2005, pp. 476-495.

[20] "Shape-from-shading: a survey", R. Zhang, P.-S. Tsai, J. Edwin Cryer, M. Shah, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 21, Nr. 8, 1999, pp. 690-706.

[21] "Perception of shape from shading", V.S. Ramachandran, Nature, Vol. 331, Nr. 6152, 1988, pp. 163-166.

[22] Bouguet, J.-Y., Perona, P., "3D photography on your desk", In Sixth International Conference on Computer Vision, 1998, pp. 43-50.

[23] Abrams, A., Miskell, K., Pless, R., "The episolar constraint: Monocular shape from shadow correspondence", In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2013, pp. 1407-1414.

[24] Xiong, Y., Shafer, S.A., "Depth from focusing and defocusing", In Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1993, pp. 68-73.

[25] "Depth from defocus: A spatial domain approach", S. Murali, G. Surya, International Journal of Computer Vision, Vol. 13, Nr. 3, 1994, pp. 271-294.

- [26] "Depth from defocus vs. stereo: How different really are they?", Y.Y. Schechner, N. Kiryati, International Journal of Computer Vision, Vol. 39, Nr. 2, 2000, pp. 141-162.
- [27] "Shape from focus/defocus", P. Favaro, Washington University, 2000.
- [28] Favaro, P., "Shape from focus and defocus: Convexity, quasiconvexity and defocus-invariant textures", In 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, 2007, pp. 1-7.
- [29] "Pattern codification strategies in structured light systems", J. Salvi, J. Pages, J. Batlle, Pattern recognition, Vol. 37, Nr. 4, 2004, pp. 827-849.
- [30] Zhang, L., Curless, B., Seitz, S.M., "Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming", In Proceedings. First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, 2002, pp. 24-36.
- [31] "Range imaging with adaptive color structured light", D. Caspi, N. Kiryati, J. Shamir, IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence, Vol 20, Nr. 5, 1998, pp. 470-480.
- [32] "A low cost 3D scanner based on structured light", C.M.P.P.C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, R. Scopigno, In Computer Graphics Forum, Vol. 20, Nr. 3, 2001, pp. 299-308.
- [33] Chia-Yen, C., Klette, R., Chen, C.F., "3D reconstruction using shape from photometric stereo and contours", In Proc. Image and Vision Computing New Zealand, 2003, pp. 251-255.
- [34] "Photometric stereo with general, unknown lighting", R. Basri, D. Jacobs, I. Kemelmacher, International Journal of computer vision, Vol. 72, Nr. 3, 2007, pp. 239-257.
- [35] Hertzmann, A., Seitz, S.M., "Shape and materials by example: A photometric stereo approach", In 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 1, 2003 pp. I-I.
- [36] "The interpretation of structure from motion", S. Ullman, Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences, Vol. 203, Nr. 1153, 1979, pp. 405-426.
- [37] Chiuso, A., Favaro, P., Jin, H., Soatto, S., "3-D motion and structure from 2-D motion causally integrated over time: Implementation", In European Conference on Computer Vision, 2000, pp. 734-750.
- [38] Van Gool, L., Defoort, F., Pollefeys, M., Koch, R., Proesmans, M., Vergauwen, M., "Special Lecture: 3D Modeling for Communications", In Computer Graphics International Conference, 1998, pp. 482-482.
- [39] Schonberger, J.L., Frahm, J.M., "Structure-from-motion revisited", In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016, pp. 4104-4113.
- [40] "Computer vision: algorithms and applications", R. Szeliski, Springer Science & Business Media, 2010.
- [41] "Shape from texture", J. Aloimonos, Biological cybernetics, Vol. 58, Nr. 5, 1988, pp. 345-360.
- [42] "Shape from texture using local spectral moments", Super, B.J., A.C. Bovik, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 17, Nr. 4, 1995, pp. 333-343.
- [43] Forsyth, D.A., "Shape from texture without boundaries", In European Conference on Computer Vision, 2002, pp. 225-239.
- [44] "Το ισλαμικό τέμενος Ζιντζιρλή πόλεως Σερρών και οι επεμβάσεις συντήρησής του (1995-2000)", Α. Μπακιρτζής, Α. Σαμπανοπούλου, στο Α. Στεφανίδου, Α.Ε. "Η συντήρηση και η αποκατάσταση των οθωμανικών μνημείων στην Ελλάδα", University Studio Press, Θεσσαλονίκη 2009, ISBN: 9789601218274, σ. 107-117.
- [45] Γαβρά, Ε., Βιτούλα, Δ., "Ξεσκεπάζοντας' το Οθωμανικό 'Πρόσωπο' της Πόλης των Σερρών μέσα από τα Μνημεία", Πρακτικά Γ' Επιστημονικού Συνεδρίου "Οι Σέρρες και η Περιοχή τους, 100 Χρόνια από την Απελευθέρωση (1913-2013)", Σέρρες 2016, σ. 615-619.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ

Γεώργιος Θ. Σεραφείμ

MSc Εφαρμοσμένης Πληροφορικής, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του ΔΙΠΑΕ

Τέγμα Μαγνησίας, 62124 Σέρρες - ΕΛΛΑΣ

Τη/ Fax: -

e-mail: serafeimgeorge@gmail.com

Γεώργιος Παυλίδης

Διευθυντής Ερευνών στο Ερευνητικό Κέντρο «Αθηνά»

Πανεπιστημιούπολη Κιμμεριών

67100 Ξάνθη - ΕΛΛΑΣ

Τη/ Fax: +30 25410 78787 x 225 / +30 25410 63656

e-mail: gpavlid@athenarc.gr

Δημήτριος Βαρσάμης

Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών

Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του ΔΙΠΑΕ

Τέγμα Μαγνησίας, 62124 Σέρρες- ΕΛΛΑΣ

Τη/ Fax: +30 23210 49381 / +30 23210 49128

e-mail: dvarsam@ihu.gr