



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Παρακολούθηση Παραμορφώσεων και Δομικής κατάστασης έργων υποδομών: Γεωδαιτικές Μέθοδοι, Νέες Τεχνολογίες και Διαχειριστικές Πτυχές

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: *Αγγελική Λακριντή*

Επιβλέπων Καθηγητής: *Γεώργιος Πανταζής, Καθηγητής, ΕΜΠ*

Ημερομηνία: *Οκτώβριος 2025*

Περίληψη

Η Ευρωπαϊκή Ένωση καλείται να διαχειριστεί ένα γερασμένο απόθεμα υποδομών μέσω πεπερασμένων διαθέσιμων πόρων. Εκτός από την αναμενομένη υποβάθμιση των κατασκευών κατά την πάροδο των ετών λόγω ηλικίας, κόπωσης και φθοράς των υλικών, η κατάσταση των κατασκευών τίθεται επιπλέον σε κίνδυνο και από ακραία καιρικά φαινόμενα, απότοκα της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, πρόσθετοι παράγοντες πρόκλησης βλαβών είναι και άλλα έκτακτα γεγονότα, τα οποία συντείνουν στη φθορά των κατασκευών. Γενικά φαινόμενα που οδηγούν σε φθορά και δρουν αρνητικά στις κατασκευές, είναι:

- Γήρανση και κόπωση (Giordano, et al., 2023),
- Φορτία μεγαλύτερα από τα φορτία σχεδιασμού
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες και μεταβολές (Giordano, et al., 2022)
- Επείγουσες και ακραίες καταστάσεις (Giordano, et al., 2020)
- Μη αποτελεσματική διαχείριση

Από τα παραπάνω φαινόμενα γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχουν τόσο ενδογενείς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν εν μέρει να ελεγχθούν μέσω κατάλληλης και αποτελεσματικής διαχείρισης όσο και εξωγενείς παράγοντες, οι οποίοι δεν βρίσκονται στη σφαίρα ελέγχου του διαχειριστή του έργου και της διοίκησης. Ένας εκ των ενδογενών παραγόντων είναι και η μη αποτελεσματική συντήρηση των έργων.

Η Ελλάδα καλείται να αντιμετωπίσει όλες τις παραπάνω προκλήσεις, ενώ η θέση της σε μία ευρύτερη σεισμικά ενεργή περιοχή, αποτελεί μία επιπλέον πρόκληση στο ζήτημα αυτό. Είναι σαφές ότι η ανάγκη για χρήση συστημάτων που είναι σε θέση να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την πραγματική κατάσταση των κατασκευών είναι πιο επιτακτική από ποτέ, ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα τεθεί σε κίνδυνο η ασφάλεια και επιτελεσματικότητα των κατασκευών. Τα συστήματα παρακολούθησης αποτελούν εξαιρετικά εργαλεία για βελτιωμένη διαχείριση έργων κατά τη φάση της λειτουργίας. Η ενόργανη παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των κατασκευών (SHM) καθώς και η παρακολούθηση παραμορφώσεων αποτελούν τέτοια εργαλεία. Το SHM είναι η διαδικασία εφαρμογής μιας στρατηγικής ανίχνευσης βλάβης (Farrar & Worden, 2007), ενώ η παρακολούθηση παραμορφώσεων είναι μια μέθοδος ανίχνευσης μετατοπίσεων (Alevizakou, 2017).



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματεύεται τα ενόργανα συστήματα παρακολούθησης, δίνοντας έμφαση στα γεωδαιτικά δίκτυα ελέγχου, τις νέες τεχνολογίες και τη διαχειριστική πτυχή των συστημάτων αυτών. Άλλες γνωστές και ευρέως εφαρμοζόμενες τεχνικές που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό παρέμβασης ή ποιοτικό χαρακτήρα βρίσκονται εκτός του πεδίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Με την εφαρμογή ενός ποσοτικού συστήματος παρακολούθησης, οι ιδιοκτήτες μπορούν να αποκομίσουν σημαντικά οφέλη. Πέραν από τη βελτιωμένη διαχείριση ασφάλειας, που αποτελεί την πρώτη προτεραιότητα, άλλα πλεονεκτήματα είναι (Inaudi, 2009; Abdelrazaq, 2011; Cawley, 2018; Giordano & Limongelli, 2020):

- Επαλήθευση των παραμέτρων σχεδιασμού
- Βελτιωμένη διαχείριση κόστους, καθώς παρέχουν δεδομένα για τεκμηριωμένες αποφάσεις, οι οποίες οδηγούν σε μειωμένα κόστη
- Βελτιωμένη διαχείριση έκτακτων καταστάσεων, όπως είναι σεισμικά γεγονότα, φαινόμενα πλημμύρας κα., καθώς προσφέρουν τις απαραίτητες πληροφορίες για έγκαιρη προειδοποίηση
- Βελτιωμένη διαχείριση κινδύνου, καθώς προσφέρουν δεδομένα για ποσοτική αξιολόγηση και μειώνουν την αβεβαιότητα
- Εκτίμηση του εναπομένοντα ωφέλιμου χρόνου ζωής της κατασκευής και πιθανή επέκταση της διάρκειας ζωής της εκάστοτε κατασκευής
- Ανάπτυξη βάσης δεδομένων, τα δεδομένα της οποίας μπορούν να αξιοποιηθούν (i) για πιο αποδοτικούς μελλοντικούς σχεδιασμούς και (ii) από ήδη υπάρχουσες παρόμοιες κατασκευές

Σκοπός της εργασίας ήταν (i) η μελέτη των υπαρχουσών αρχών, μεθόδων και πλαισίων ενόργανης παρακολούθησης, τα οποία χρησιμοποιούνται για ποσοτική παρακολούθηση, (ii) η εξέταση της ενσωμάτωσης νέων, καινοτόμων τεχνολογιών στη διαδικασία της παρακολούθησης, (iii) η μελέτη της υφιστάμενης κατάστασης της ενόργανης παρακολούθησης στην Ελλάδα και (iv) η ανάδειξη των συστημάτων αυτών ως εργαλεία διαχείρισης έργων, τα οποία αξιοποιώντας ένα ισχυρό πλαίσιο λήψης απόφασης, οδηγούν σε πιο ορθολογικές/ αντικειμενικές αποφάσεις που βασίζονται σε δεδομένα, ήτοι στα δεδομένα που παράγονται από τα συστήματα παρακολούθησης. Σημειώνεται ότι, το επιστημονικό πεδίο της παρακολούθησης αποτελεί πεδίο ευρείας έρευνας. Παρόλα αυτά, η πλειονότητα των σχετικών δημοσιεύσεων εντοπίζεται σε υπολογιστικές και τεχνικές πτυχές παρά σε διαχειριστικές. Με την εξερεύνηση των διαχειριστικών πτυχών της παρακολούθησης, αναδεικνύεται η αξία της ως εργαλείο αρωγής της διοίκησης του έργου. Έτσι, η μελέτη αυτή στοχεύει στη γεφύρωση αυτού του χάσματος καλύπτοντας τεχνικά και διαχειριστικά ζητήματα και θεωρώντας την παρακολούθηση ως μια ολιστική διαδικασία.

Για την επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση και έρευνα. Κύριες πηγές, των αναφορών που μελετήθηκαν, αποτέλεσαν η βάση δεδομένων Scopus και ο διαδικτυακός τόπος Google Scholar. Για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων των νέων τεχνολογιών μελετήθηκαν δημοσιεύσεις του 5ου Συνεδρίου Παρακολούθησης Παραμορφώσεων (JISDM) που έλαβε χώρα το 2022 στη Βαλένθια της Ισπανίας. Για την ανάδειξη των συστημάτων αυτών ως εργαλεία λήψης απόφασης, μελετήθηκαν δημοσιεύσεις της ερευνητικής ομάδας συνεργασίας του ΕΤΗ και του Πολυτεχνείου του Μονάχου, που ασχολούνται με συστήματα λήψης αποφάσεων για τις κατασκευές και τις υποδομές καθώς και δημοσιεύσεις της σχετικής δράσης COST TU1402. Επιπλέον αξιοποιήθηκαν πηγές όπως βιβλία και σημειώσεις διαλέξεων.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Συνοπτικά η δομή της διπλωματικής, δεδομένου ότι το κεφάλαιο 1 αποτελεί την εισαγωγή, είναι η εξής:

- Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται ορισμένοι βασικοί ορισμοί και γίνεται διάκριση μεταξύ διάφορων τεχνικών παρακολούθησης
- Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι παραδοσιακές μέθοδοι παρακολούθησης τεχνητών κατασκευών, μέσω οργάνων και γεωδαιτικών δικτύων παρακολούθησης δίνοντας έμφαση στα τελευταία
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται θεμελιώδεις πτυχές του SHM. Δίνεται έμφαση στην τρέχουσα θεώρηση του SHM ως στατιστικό πρόβλημα αναγνώρισης προτύπων, ενώ αναλύονται οι παράμετροι που καθορίζουν ένα σύστημα SHM. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται επίσης οι κύριες προκλήσεις που εμποδίζουν την ευρύτερη αξιοποίηση του SHM σε πρακτικές εφαρμογές.
- Στο κεφάλαιο 5 διερευνάται η δυνατότητα ενσωμάτωσης νέων τεχνολογιών στη διαδικασία της παρακολούθησης. Περιγράφονται οι κύριες τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0 και εξετάζονται δημοσιεύσεις που χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνολογίες.
- Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται ένα λεπτομερές πλαίσιο λήψης αποφάσεων, το πλαίσιο της αξίας της πληροφορίας (VoI), το οποίο αναδεικνύει την αξία της αξιοποίησης των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης για διαχείριση που βασίζεται σε δεδομένα.
- Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται μελέτες περίπτωσης προκειμένου να αξιολογηθεί η τρέχουσα κατάσταση του SHM στην Ελλάδα. Εξετάζονται 5 κύριοι τύποι έργων υποδομής (φράγματα, γέφυρες, σήραγγες, αθλητικές εγκαταστάσεις, ψηλά κτήρια). Όταν δεν ήταν δυνατό να βρεθούν επαρκείς και αξιόπιστες πληροφορίες, όπως στην περίπτωση των ψηλών κτηρίων, αναλύθηκαν μελέτες περίπτωσης από το εξωτερικό.
- Τέλος, στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν μετά την ανωτέρω μελέτη.

Πιο συγκεκριμένα, από την ανωτέρω ανάλυση προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα: κύριοι λόγοι παρακώλυσης της ευρείας αξιοποίησης των συστημάτων σε πρακτικές εφαρμογές είναι το κόστος των συστημάτων και η απροθυμία των κυρίων των έργων να επενδύσουν σε ενόργανα συστήματα. Το άμεσο κόστος των συστημάτων σχετίζεται με το κόστος προμήθειας, εγκατάστασης, λειτουργίας και αποκατάστασης των αισθητήρων των συστημάτων και του σχετικού δικτύου, ενώ υφίσταται και έμμεσο κόστος που αφορά στην εκπαίδευση του προσωπικού διαχείρισης των συστημάτων καθώς και στη χρήση κατάλληλου λειτουργικού συστήματος. Όσον αφορά την απροθυμία των ενδιαφερόμενων μερών αυτή σχετίζεται με την έλλειψη γνώσης της λειτουργίας και των αποτελεσμάτων των συστημάτων, καθώς και με την ετερογένεια των ενδιαφερόμενων μερών. Λύση σε αυτό το πρόβλημα αποτελεί το πλαίσιο της αξίας της πληροφορίας (VoI), μέσω του οποίου ποσοτικοποιούνται και μεταφράζονται σε χρηματικές μονάδες τα οφέλη των ενόργανων συστημάτων. Το πλαίσιο αυτό αξιοποιεί την θεωρία του Bayes καθώς και το θεώρημα μέγιστης χρησιμότητας ώστε να βρεθεί η δράση εκείνη που οδηγεί στη μέγιστη χρησιμότητα, ή ισοδύναμα στο ελάχιστο κόστος. Εκτός από τους παραπάνω λόγους υπάρχουν ακόμα τεχνικά και υπολογιστικά εμπόδια. Μεταξύ αυτών των προκλήσεων βρίσκεται ο μεγάλος όγκος δεδομένων, που σχετίζεται με αυξημένες απαιτήσεις υπολογισμού και επεξεργασίας καθώς και χώρου αποθήκευσης και δυνατοτήτων δικτύου. Λύση σε ορισμένα από τα τεχνικά και υπολογιστικά ζητήματα δίνουν οι νέες τεχνολογίες, μέσω των οποίων καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση σε απρόσιτα και επικινδυνά σημεία, η αυτόματη



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

παραγωγή αποτελεσμάτων μέσω προηγμένων αλγορίθμων, η αποδοτικότερη διαχείριση δεδομένων και η ενίσχυση της επικοινωνίας των ενδιαφερόμενων μερών. Όσον αφορά την Ελλάδα, παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν σαφή, δεσμευτικά πρότυπα με τα συστήματα παρακολούθησης μεγάλων τεχνικών έργων να παρουσιάζουν ανομοιογένεια, η οποία εν μέρει θεωρείται λογική λόγω των ιδιαιτεροτήτων των έργων. Παρόλα αυτά, μέσω των παραδειγμάτων μελέτης επιβεβαιώνονται τα θεωρητικά διατυπωμένα πλεονεκτήματα της παρακολούθησης, όπως είναι: (i) η σύγκριση των πραγματικών δεδομένων με τις παραμέτρους σχεδιασμού, ώστε να βρεθούν τυχόν αποκλίσεις και να βελτιωθεί ο σχεδιασμός μελλοντικών έργων, (ii) η αξιοποίηση των μετρούμενων ποσοτήτων για τη διερεύνηση των αιτιών που οδηγούν στην παραμόρφωση, (iii) τα δεδομένα του συστήματος επιτρέπουν την έγκαιρη δράση και προειδοποίηση, γεγονός εξαιρετικά σημαντικό ιδίως όταν εξελίσσονται έκτακτα γεγονότα, (iv) η χρήση των αποτελεσμάτων του συστήματος παρακολούθησης για την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής παρέμβασης. Τέλος μέλλον των συστημάτων αυτών αποτελούν τα «πληθυσμιακά συστήματα παρακολούθησης» που εκμεταλλεύονται τις ιδιότητες της μηχανικής μάθησης και συγκεκριμένα την ιδιότητα “Transfer Learning” ώστε να χρειάζονται μικρότερο αριθμό δεδομένων εκπαίδευσης. Ωστόσο για την εφαρμογή των συστημάτων αυτών απαιτείται ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών στη διαδικασία της παρακολούθησης και καθορισμός σαφών και αναλυτικών προτύπων, ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα των απαιτούμενων δεδομένων. Η εργασία επομένως παρουσιάζει την ενόργανη παρακολούθηση ως μία ολιστική μέθοδο και όχι απλά ως μία τεχνολογία, προσπαθώντας να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της τεχνικής και διαχειριστικής πτυχής των συστημάτων αυτών, συμβάλλοντας έτσι στην ανάδειξη της παρακολούθησης ως ένα πολύτιμο εργαλείο αποδοτικότερης διαχείρισης έργων.