

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και
Διοίκησης

Εφαρμογή μοντέλων πρόβλεψης μειωμένης τάξης
και ψηφιακών διδύμων για την πρόβλεψη
μηχανικής απόκρισης κατασκευών

Λιάσκος Νικόλαος

17 Ιουλίου 2025

Επιβλέπων Καθηγητής:
Σταυρουλάκης Γεώργιος

Εξεταστική Επιτροπή:
Αλευράς Παναγιώτης
Χαραλαμπίδη Βαρβάρα

Contents

1	Εισαγωγή	3
1.1	Ιστορικό και Πλαίσιο	3
1.2	Διατύπωση Προβλήματος	9
1.3	Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα	12
2	Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	14
2.1	Θεωρητικές Βάσεις των Ψηφιακών Διδύμων	14
2.2	Τρέχουσα Κατάσταση	15
2.3	Προκλήσεις και Ελλείψεις	17
2.4	Πρόσφατες Εξελίξεις στα Ψηφιακά Δίδυμα	18
3	Μεθοδολογία	21
3.1	Εννοιολογικό Πλαίσιο	21
3.2	Συλλογή Δεδομένων και Απαιτήσεις	22
3.3	Ανάπτυξη Μοντέλου και Εργαλεία	22
3.3.1	Βασικό Γεωμετρικό Μοντέλο και Μη Γραμμικότητα	22
3.3.2	Μοντέλα Μειωμένης Τάξης (ROM)	23
3.3.3	Ενοποίηση και Αυτοματοποίηση	24
3.4	Στρατηγική Επικύρωσης	24
4	Υπολογισμοί	27
4.1	Ανάλυση του Κώδικα Εκπαίδευσης (Training Script)	27
4.2	Ανάλυση του Κώδικα Δοκιμής (Testing Script)	30
5	Αποτελέσματα και Συζήτηση	32
5.1	Αποτελέσματα από το Στάδιο Εκπαίδευσης	32
5.1.1	Ανάλυση Μηνυμάτων και Διαθεσιμότητας “Παραθύρων”	32
5.1.2	Μετρικές Αξιολόγησης Μοντέλων ARMAX (Validation Set)	33
5.2	Αποτελέσματα από το Στάδιο Δοκιμής	33
5.2.1	Συγκεντρωτικές Μετρικές Σφάλματος (Testing)	34
5.2.2	Συμπεράσματα για την Απόδοση του ARMAX Μοντέλου στα δεδομένα του σεισμού στο Αρχαλοχώρι	34
5.2.3	Συμπεράσματα για τα δεδομένα του σεισμού στο Αρχαλοχώρι	36
5.2.4	Συμπεράσματα για τα δεδομένα του σεισμού δυτικά των Χανίων	37
5.2.5	Συμπεράσματα για τα δεδομένα του σεισμού στην Σάμο	39
5.2.6	Υπολείμματα (Residuals) και Στατιστική Συνοψή	40
5.2.7	Συνολική Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων	45
5.2.8	Συμπερασματική Επισκόπηση	45
6	Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	46

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στη διερεύνηση προηγμένων υπολογιστικών μεθόδων για την πρόγνωση της μηχανικής απόκρισης σύνθετων ή ιστορικών κατασκευών, μέσα από τη συνεργασία μειωμένων μοντέλων πρόβλεψης (Reduced-Order Models, ROM) και της φιλοσοφίας των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins). Αρχικά, αναπτύσσεται μία μεθοδολογία προεπεξεργασίας δεδομένων και εξαγωγής χαρακτηριστικών, η οποία αξιοποιεί τόσο στατιστικές όσο και συχνотικές τεχνικές, με απώτερο στόχο την ταχεία αναγνώριση της δυναμικής συμπεριφοράς της δομής υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης (π.χ. σεισμική διέγερση, περιβαλλοντικοί κραδασμοί). Στη συνέχεια, εφαρμόζονται μοντέλα μειωμένης τάξης, τα οποία αποσκοπούν στη δραστηκή μείωση του υπολογιστικού φόρτου σε σχέση με τα κλασικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (FEM), διατηρώντας ταυτόχρονα ικανοποιητική ακρίβεια στην πρόβλεψη των κρίσιμων παραμέτρων (π.χ. μετακινήσεις, τάσεις). Η ενσωμάτωση της ιδέας των Ψηφιακών Διδύμων επιτρέπει, επιπλέον, την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ της πραγματικής κατασκευής και του αριθμητικού μοντέλου σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται βελτίωση της ακρίβειας και της ευελιξίας του μοντέλου, αξιοποιώντας δεδομένα από αισθητήρες επιταχυνσιομέτρων, μετρήσεις παραμορφώσεων και άλλες πηγές πεδίου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη συστηματική μελέτη του προτεινόμενου πλαισίου καταδεικνύουν ότι η προσεκτική οργάνωση των δεδομένων, η στοχοθετημένη επιλογή χαρακτηριστικών, καθώς και η χρήση κατάλληλων μεθόδων βελτιστοποίησης, μπορούν να ενισχύσουν καθοριστικά την αξιοπιστία των ROM, ακόμη και σε έντονα μη γραμμικές περιοχές. Τέλος, παρουσιάζονται εφαρμογές σε σεισμικά σενάρια και περιπτώσεις λιθόκτιστων ή βιομηχανικών δομών, επιβεβαιώνοντας ότι η εξελιγμένη αυτή προσέγγιση δύναται να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο για τη διαχείριση, τη συντήρηση και την ασφάλεια των κατασκευών στο σύγχρονο μηχανικό περιβάλλον.

Λέξεις-Κλειδιά: μοντέλα μειωμένης τάξης, ψηφιακά δίδυμα, προγνωστική ανάλυση, μη γραμμική μηχανική, σεισμική απόκριση, βελτιστοποίηση, παρακολούθηση υγείας κατασκευών, επεξεργασία δεδομένων

Chapter 1

Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό και Πλαίσιο

Η συστηματική μελέτη της μηχανικής απόκρισης σύνθετων κατασκευών, ιδιαίτερα όταν αυτές χαρακτηρίζονται από ιστορική, πολιτιστική ή τεχνολογική αξία, παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις και απαιτεί την αξιοποίηση προηγμένων υπολογιστικών εργαλείων [11, 14]. Στη σύγχρονη εποχή, η ανάγκη για βέλτιστη διαχείριση και συντήρηση τέτοιων κατασκευών είναι πιο επιτακτική από ποτέ, ειδικά αν λάβει κανείς υπόψη τη γήρανση των υλικών, τις επιδράσεις ακραίων φυσικών φαινομένων και τις οικονομικές ή κοινωνικές παραμέτρους που συνδέονται με την αποκατάσταση ή την εκτεταμένη επέμβαση σε κρίσιμες υποδομές [19, 21, 22]. Η ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών δυνατοτήτων και η ανάπτυξη νέων μεθόδων προσομοίωσης έχουν δημιουργήσει το έδαφος για την εμφάνιση και διάδοση της ιδέας των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins, DT) [6, 66, 67]. Τα Ψηφιακά Δίδυμα δεν περιορίζονται σε μια απλή ψηφιακή αποτύπωση ενός φυσικού αντικειμένου, αλλά στοχεύουν σε μια ενεργή σύνδεση μεταξύ του ψηφιακού μοντέλου και της πραγματικής κατασκευής, η οποία πραγματοποιείται μέσω συνεχούς ροής δεδομένων από αισθητήρες και υποσυστημάτων παρακολούθησης [66, 81, 82].

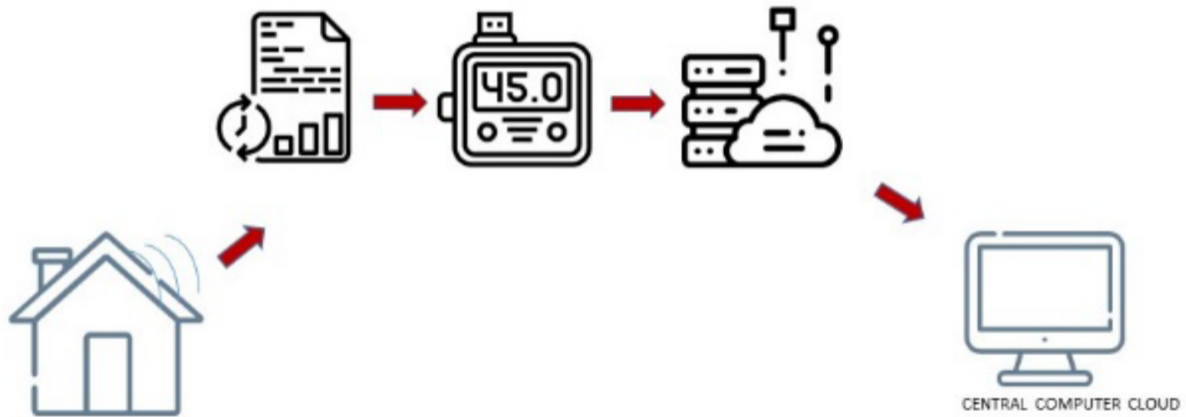


Figure 1.1: Σχηματική αναπαράσταση του Ψηφιακού Διδύμου για υποδομές [6, 81]. Οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα, η πιθανή επεξεργασία EDGE επί τόπου μειώνει τα δεδομένα που μεταδίδονται σε μια κεντρική βάση δεδομένων, και τέλος οι χρήστες αξιολογούν τα δεδομένα και εξάγουν πληροφορίες από αυτά.

Παράλληλα, η έννοια των μοντέλων πρόβλεψης μειωμένης τάξης (Reduced-Order Models, ROM) έχει αναπτυχθεί με γνώμονα την ανάγκη για ταχύτερες και πιο αποδοτικές προσομοιώσεις πολυπλόκων φαινομένων [73, 74], ειδικά όταν το ζητούμενο είναι η εκτέλεση πολλαπλών επαναλήψεων, η διεξαγωγή βελτιστοποιήσεων ή η αντιμετώπιση αντιστρεπτών προβλημάτων (inverse problems) [75, 79, 90]. Στα ROM βασίζεται η προσπάθεια απλοποίησης των αρχικών μαθηματικών εξισώσεων ή του πεπερασμένου πλήθους των μεταβλητών, ώστε να διατηρούνται τα ουσιώδη φυσικά χαρακτηριστικά της απόκρισης, περιορίζοντας όμως σε μεγάλο βαθμό το υπολογιστικό κόστος [73, 74]. Όταν η εφαρμογή των ROM συνδυάζεται με την ιδέα του Ψηφιακού Διδύμου,

το αποτέλεσμα είναι ένα ευέλικτο πλαίσιο ανάλυσης και παρακολούθησης: η φυσική δομή “τροφοδοτεί” το μοντέλο με μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, και το μοντέλο “προβλέπει” ή “ερμηνεύει” με αποτελεσματικό τρόπο την απόκριση σε διαφορετικά σενάρια φόρτισης ή αστοχίας [81, 90, 103].

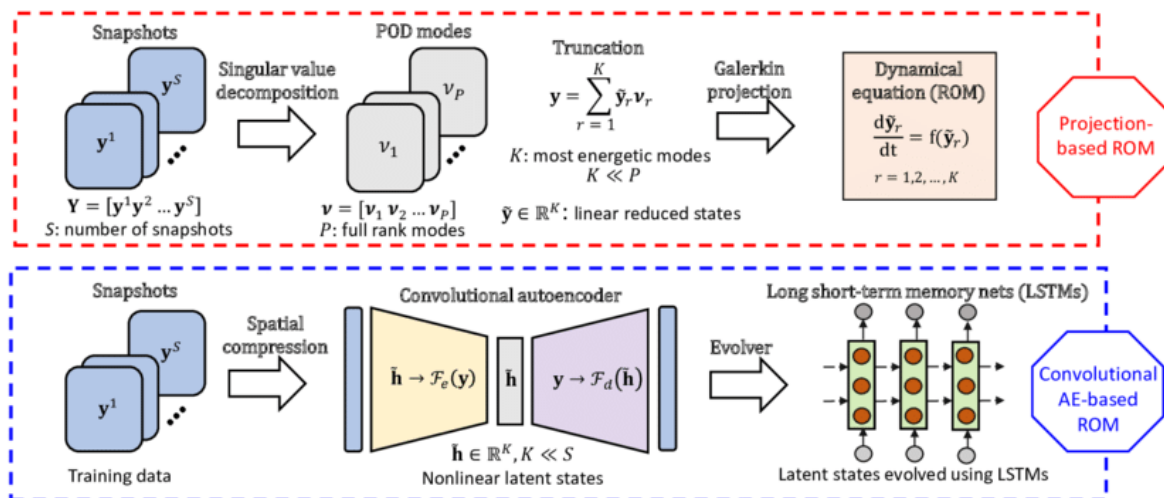


Figure 1.2: Σχηματική απεικόνιση ενός μοντέλου πρόβλεψης μειωμένης τάξης Reduced-Order Models, ROM [74, 99]: (i) Μοντέλο μείωσης βάσει προβολής για τη δημιουργία ορθοκανονικών συναρτήσεων βάσης (τροπών) για τη μειωμένη αναπαράσταση και (ii) το πλαίσιο ROM με συνελικτικό αυτόματο κωδικοποιητή.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η εφαρμογή αυτών των νέων μεθόδων σε ιστορικές ή παραδοσιακές λιθόκτιστες κατασκευές, όπως τα τοξωτά μνημεία ή οι θολοσκεπείς ναοί [11, 18], όπου οι ιδιότητες των υλικών είναι συχνά ασαφείς, οι γεωμετρίες άκρως περίπλοκες και οι υπάρχουσες βλάβες δύσκολες να κατηγοριοποιηθούν [14]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι βενετσιάνικες εγκαταστάσεις Νεωρίων, όπου η ιστορική τους αξία συνδυάζεται με σύνθετη γεωμετρία και με την ανάγκη αποκατάστασης ή συντήρησης [1, 2, 60, 63, 51]. Η διεθνής πρακτική οδηγεί σε προσομοιώσεις όπου η μη γραμμική ανάλυση, η διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης, καθώς και η χαρτογράφηση ρωγμών ή αστοχιών γίνονται βασικές προτεραιότητες [14, 19, 44, 10].

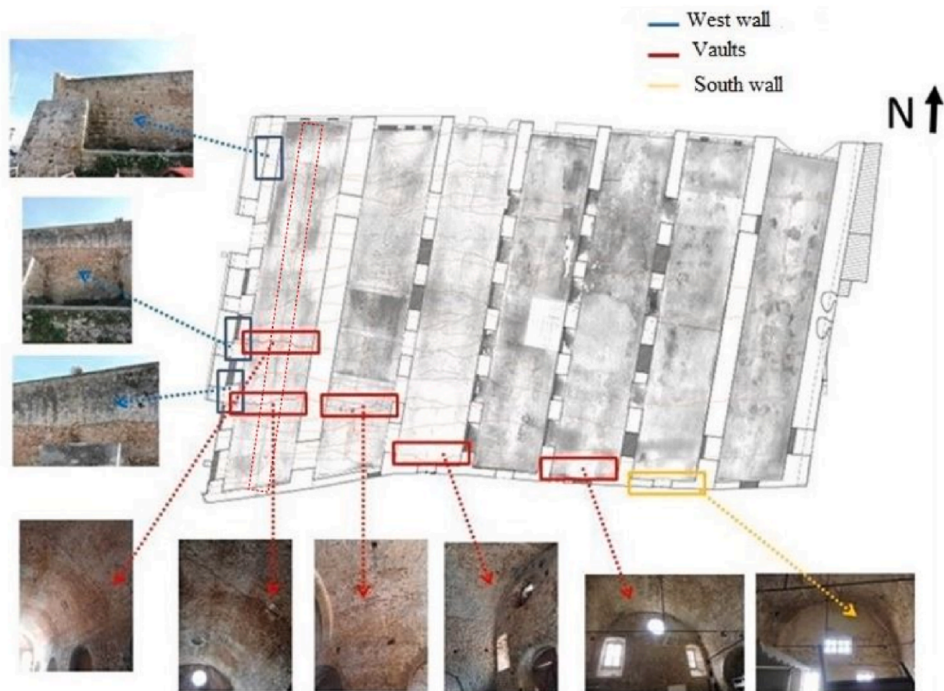


Figure 1.3: Περιοχές μειωμένης πλαστιμότητας στους θόλους και στους τοίχους της κατασκευής (Νεώρια) [2, 10].



(a)



(b)

Figure 1.4: Θόλος (Νεώρια): (a) εσωτερική όψη, (b) εξωτερική όψη [1, 60].



(a)



(b)



(c)

Figure 1.5: Σχηματική αναπαράσταση του Ψηφιακού Διδύμου για υποδομές [6, 81]. Οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα, η πιθανή επεξεργασία ΕΔΓΕ επί τόπου μειώνει τα δεδομένα που μεταδίδονται σε μια κεντρική βάση δεδομένων, και τέλος οι χρήστες αξιολογούν τα δεδομένα και εξάγουν πληροφορίες από αυτά.

Στο πλαίσιο της μελέτης της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς λιθόκτιστων κατασκευών, ιδιαίτερα των τοξωτών μορφών, έχει δοθεί έμφαση σε πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες για την κατανόηση, τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση των μηχανισμών αστοχίας [11, 14]. Σχετικές μελέτες επικεντρώνονται τόσο σε προσεγγίσεις πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) με μη γραμμικές επαφές (unilateral contact-friction) [4, 58], όσο και σε μεθόδους οριακής ανάλυσης (limit analysis) [8, 53] ή εκτεταμένων πεπερασμένων στοιχείων (XFEM) [3, 48]. Η έρευνα για τα Νεώρια στο λιμάνι των Χανίων αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα, με εκτενείς μετρήσεις, ακριβή αποτύπωση της γεωμετρίας και στοχευμένες αριθμητικές αναλύσεις [1, 2, 60].



Figure 1.6: Μνημείο λιθοδομής Νεώρια [1, 60].

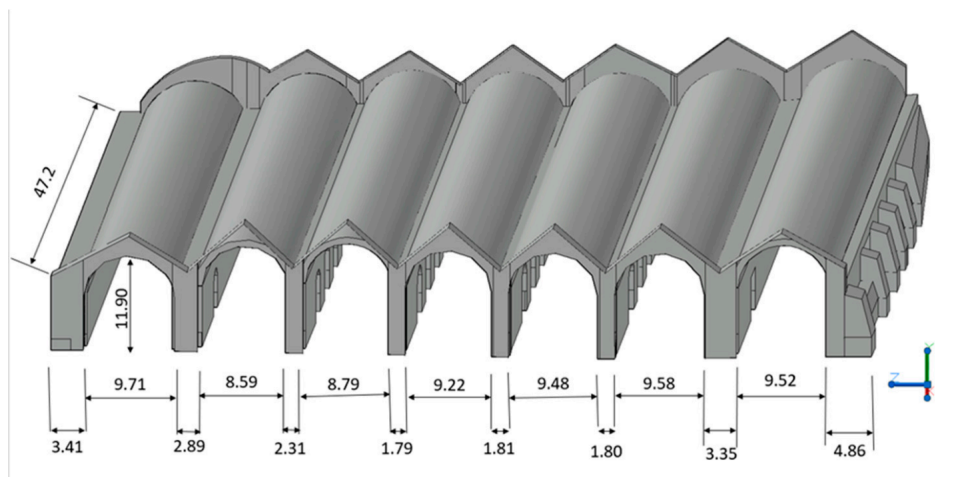


Figure 1.7: Διαστάσεις του κτηρίου (Νεώρια) [1, 51].

Επιπλέον, όπως έχει αναδειχθεί σε διεθνή βιβλιογραφία, τα λιθόκτιστα τόξα (masonry arches) ανήκουν σε ένα από τα αρχαιότερα συστήματα φέροντος οργανισμού, με τις πρώτες εφαρμογές τους να εντοπίζονται ήδη από τη 2η χιλιετία π.Χ. σε μεσοποταμιακά τούβλινα αρχιτεκτονήματα [42]. Η δύναμη του τόξου συνίσταται στο ότι το φορτίο κατανέμεται σε θλιπτικές δυνάμεις κατά μήκος μιας “thrust line” [46], η οποία, όταν εξέρχεται της διατομής, πυροδοτεί τη δημιουργία αρθρώσεων αστοχίας [54]. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η θλιπτική αστοχία δεν είναι συνηθισμένη στα λιθόκτιστα τόξα, καθώς το υλικό χαρακτηρίζεται από αδυναμία σε εφελκυσμό (no-tension material) [11, 54]. Ωστόσο, παράγοντες όπως η καθίζηση ή τα σεισμικά φορτία μπορούν να ενεργοποιήσουν τις ασυνέχειες (interfaces), επιφέροντας βλάβες και πιθανή μερική ή ολική κατάρρευση [49, 19, 47]. Πιο αναλυτικές και λεπτομερείς προσομοιώσεις επιτρέπονται, κατ’

αρχάς, μέσα από τη χρήση εξελιγμένων μοντέλων που ενσωματώνουν μονομερείς επαφές και ρωγμές [18].

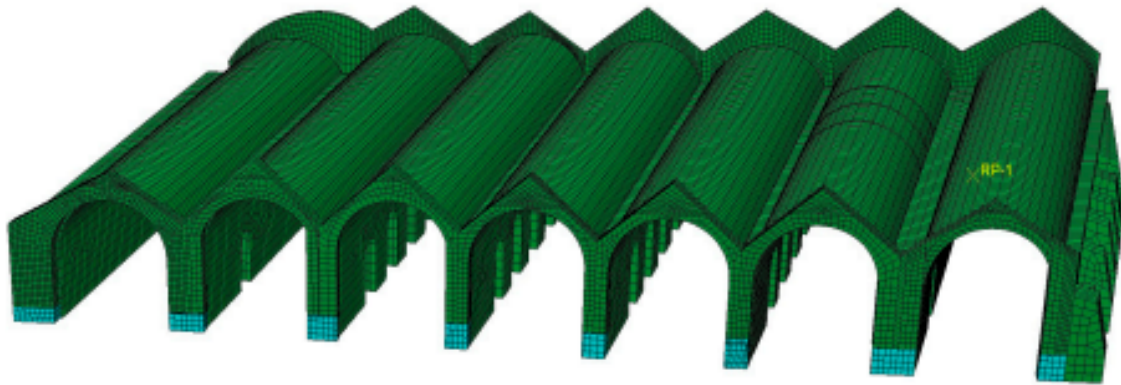
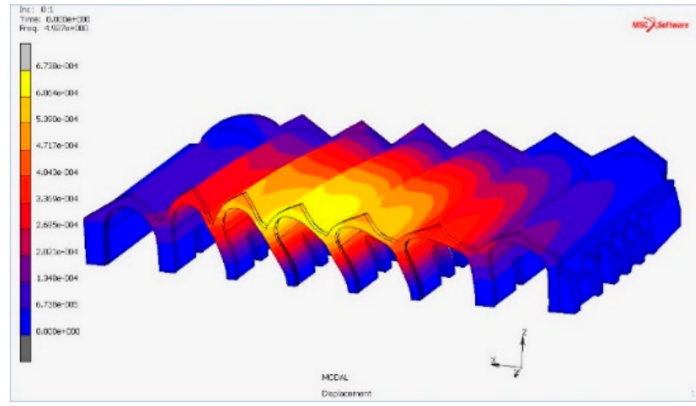


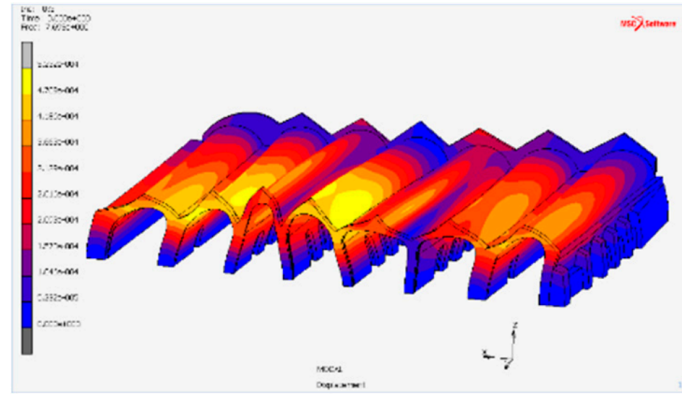
Figure 1.8: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων των Νεωρίων, λαμβάνοντας υπόψη τις προγραμματισμένες επεμβάσεις [2, 1].

Σε πολλές πρόσφατες προσπάθειες, εξετάστηκαν διαφορετικές τεχνικές ανάλυσης. Παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη πεπερασμένων στοιχείων με μονομερείς επαφές για την προσομοίωση αστοχίας στο Μνημείο Mnajdra [58, 57] ή η χρήση νόμων contact-friction για την ανάλυση πιθανής κατάρρευσης λίθινων γεφυρών υπό συγκεντρωμένα φορτία και μετακινήσεις εδράνων [49]. Επίσης, έχει προταθεί πολυκλιμακωτό μοντέλο (multi-scale) που αξιοποιεί την επέκταση των πεπερασμένων στοιχείων (extended finite element method) για την ανίχνευση ρωγμών με τυχαίο προσανατολισμό και φαινόμενα τοπικής αστοχίας [48, 3]. Επιπρόσθετα, υπάρχουν πολυάριθμες μελέτες στη διεθνή βιβλιογραφία [44, 47, 65, 14] που αφορούν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων εστιασμένα σε μοντελοποίηση σύνθετων λιθόκτιστων μορφών.

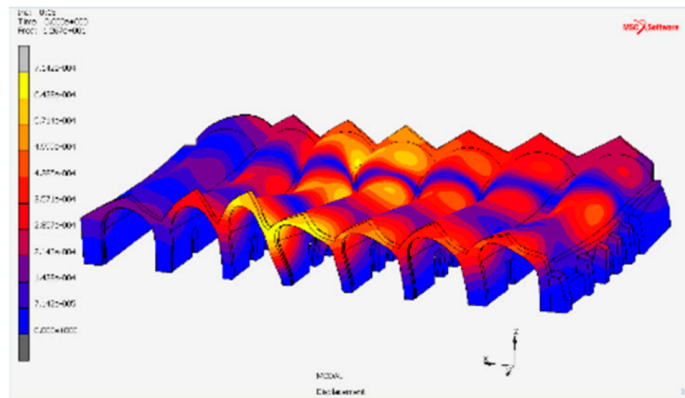
Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερης σημασίας είναι η διερεύνηση του μνημείου των Νεωρίων στο ενετικό λιμάνι των Χανίων (Fig. 1.6). Πρόκειται για ένα λιθόκτιστο στεγασμένο συγκρότημα με πολλαπλές καμάρες και θόλους. Κατά τη διάρκεια πρόσφατου ερευνητικού προγράμματος [60, 63] συλλέχθηκαν δεδομένα για τη γεωμετρία, τις φθορές, τις ρωγμές και τις ιδιότητες του εδάφους. Για την ακριβή αποτύπωση και μοντελοποίηση, χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατη απεικόνιση των θόλων, των υποστηρικτικών τοίχων (spandrels) και των υφιστάμενων παραμορφώσεων [1, 33]. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν διαφορετικές υπολογιστικές προσεγγίσεις, όπως κλασική ανάλυση ιδιομορφών (modal analysis) για τον εντοπισμό περιοχών μεγάλης μετακίνησης, ενώ ακολούθησε διδιάστατη και τρισδιάστατη μη γραμμική προσέγγιση τύπου push-over με μονομερείς επαφές, επιδιώκοντας την ανάλυση των μηχανισμών κατάρρευσης και την αντιστοίχιση των προβλεπόμενων βλαβών με τα πραγματικά ευρήματα [1, 2].



(a)



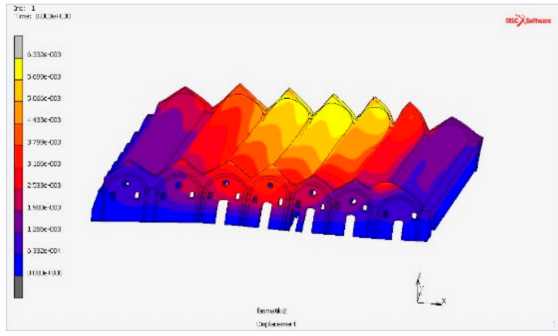
(b)



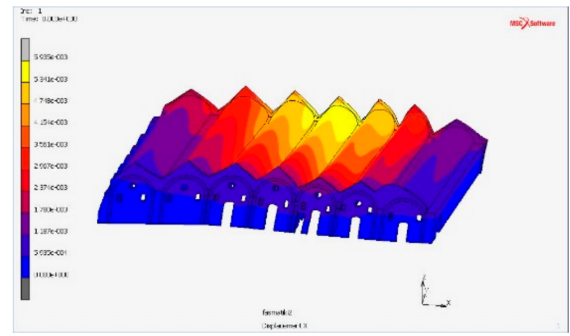
(c)

Figure 1.9: Επιλεγμένες ιδιομορφές (Νεώρια): (a) 1η ιδιομορφή @ 4.927 Hz (βόρεια όψη). (b) 3η ιδιομορφή @ 7.693 Hz (c) 15η ιδιομορφή @ 12.67 Hz (βόρεια όψη) [1, 60].

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν επίσης με πειραματικά δεδομένα (Eigenmodal αποτελέσματα [60]) [1], υποστηριζόμενα από εργαλεία απομακρυσμένης μοντελοποίησης (Python-driven modelling) και τεχνικές βελτιστοποίησης [52]. Τέλος, έγινε μια προκαταρκτική προσέγγιση στην ενσωμάτωση της μεθόδου XFEM [3, 50], με στόχο την τρισδιάστατη μη γραμμική μοντελοποίηση των ρωγμών στο μνημείο των Νεωρίων [1], επιβεβαιώνοντας ότι πρόκειται για μια σύνθετη διαδικασία (inverse analysis) με πλήθος αβεβαιοτήτων [75, 79, 47].

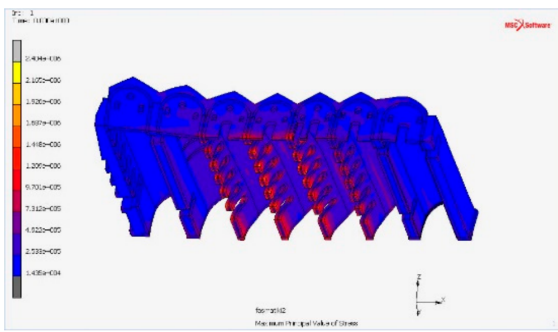


(a)

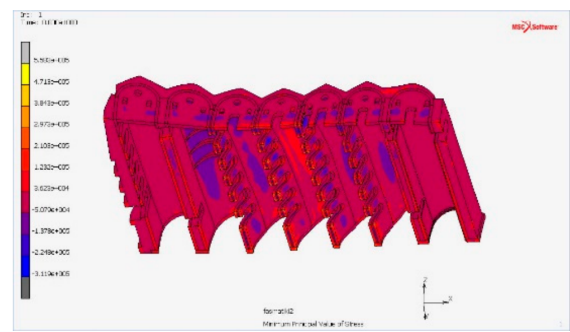


(b)

Figure 1.10: (a) Συνολική μετατόπιση. (b) μετατόπιση κατά τη διεύθυνση x, από τη δυναμική φασματική ανάλυση (σε m) (Νεώρια) [2, 1].



(a)



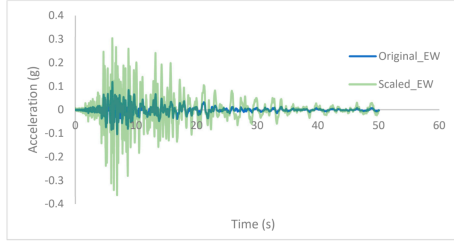
(b)

Figure 1.11: (a)Μέγιστη κύρια τάση. (b) ελάχιστη κύρια τάση από τη δυναμική φασματική ανάλυση (σε Pa) (Νεώρια) [2, 1].

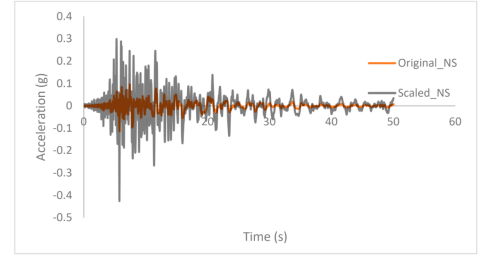
Συνοψίζοντας, η εφαρμογή προσομοιωτικών τεχνικών που περιλαμβάνουν μοντέλα επαφής (contact-friction) με μονομερή συμπεριφορά (no-tension behavior) [4, 58, 49] ή η μεθοδολογία των εκτεταμένων πεπερασμένων στοιχείων (XFEM) [3, 48] δύναται να αποκαλύψει τις πραγματικές ζώνες επικινδυνότητας στα λιθόκτιστα τόξα. Παράλληλα, οι κλασικές μέθοδοι οριακής ανάλυσης [8, 53] και η ελαστική ανάλυση ιδιομορφών (modal analysis) [1] συμβάλλουν σημαντικά στην αναγνώριση επικίνδυνων μηχανισμών ή βλαβών. Οι προσεγγίσεις αυτές, σε συνδυασμό με σύγχρονες στρατηγικές όπως τα Ψηφιακά Δίδυμα [81, 6] και τα μοντέλα μειωμένης τάξης [74, 90], αναδεικνύουν τον ολιστικό χαρακτήρα που απαιτείται για την αποτελεσματική προσομοίωση, διάγνωση βλαβών και απόκριση σε μνημεία υψηλής αξίας.

1.2 Διατύπωση Προβλήματος

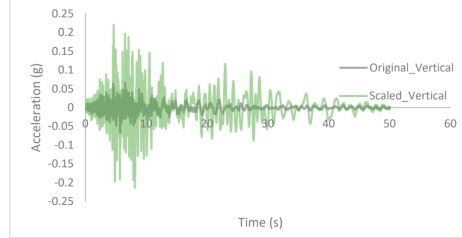
Η κεντρική πρόκληση συνίσταται στη δυνατότητα διαχείρισης και ενοποίησης σύνθετων ή/και ασυνεχών πληροφοριών που αφορούν μια κατασκευή [81, 101]. Τέτοιες πληροφορίες μπορεί να προέρχονται από μετρήσεις αισθητήρων (π.χ. επιταχυνσιόμετρα, μετατοπισιομετρητές, θερμοχημικά μέσα) [72], από ιστορικά αρχεία (π.χ. στάδια επέμβασης, φωτογραφίες φθοράς και ρωγμών) ή από πολυφασματικές μεθόδους απεικόνισης (π.χ. φωτογραμμετρία, σαρώσεις LiDAR) [7, 33]. Η πολυπλοκότητα της πληροφορίας, σε συνδυασμό με την ανάγκη χρονικής επικαιροποίησης, δημιουργεί ένα περιβάλλον υψηλής υπολογιστικής και διαχειριστικής απαίτησης [89].



(a)



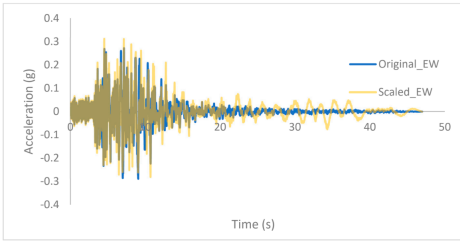
(b)



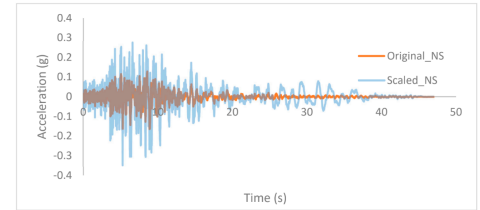
(c)

Figure 1.12: Διαγράμματα αρχικής και κλιμακωμένης εδαφικής επιτάχυνσης για τον σεισμό της Θεσσαλίας (πιθανώς από [2]): (α) κατεύθυνση οριζόντια ανατολή-δύση· (β) κατεύθυνση οριζόντια βορράς-νότος· (γ) κατακόρυφη κατεύθυνση. Βλ. επίσης [38, 39] για κλιμάκωση φάσματος.

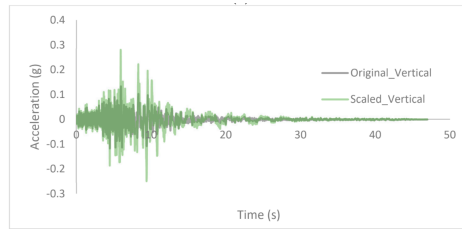
Μία ακόμα διάσταση του προβλήματος εντοπίζεται στο γεγονός ότι οι λιθόκτιστες ή μνημειακές κατασκευές δεν υπακούουν σε ένα απλό, γνωστό ενιαίο υλικό μοντέλο [11]. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το υλικό είναι ετερογενές (πέτρες, κονίαμα, παλαιές προσθήκες σκυροδέματος, συνδετικά υφάσματα) και εμφανίζει ιδιότητες που μεταβάλλονται ανάλογα με την ηλικία του, την έκθεση σε κλιματικές συνθήκες ή και τις κατά καιρούς τοπικές επεμβάσεις [14]. Έτσι, η κλασική παραδοχή της ομοιογένειας ή η υπόθεση γραμμικής ελαστικότητας χάνει μεγάλο μέρος της αξιοπιστίας της όταν εφαρμόζεται ανέλεγκτα.



(a)



(b)



(c)

Figure 1.13: Διαγράμματα αρχικής και κλιμακωμένης εδαφικής επιτάχυνσης για τον σεισμό Northridge (πιθανώς από [2]): (α) κατεύθυνση οριζόντια ανατολή-δύση· (β) κατεύθυνση οριζόντια βορράς-νότος· (γ) κατακόρυφη κατεύθυνση. Βλ. επίσης [38, 39] για κλιμάκωση φάσματος.

Επιπλέον, η ανάγκη έγκαιρης και ακριβούς πρόβλεψης βλαβών ή αστοχιών καθιστά επιτακτική τη χρήση μεθόδων που μπορούν να αποδώσουν καλά όχι μόνο σε γραμμικές καταστάσεις αλλά και στην περιοχή της μη γραμμικής συμπεριφοράς, όπως είναι η εμφάνιση ρωγμών [3], ο διαχωρισμός επαφών ανάμεσα σε δομικά μέλη [4] ή η εμφάνιση πλαστικότητας σε σημεία συγκέντρωσης τάσεων [10, 55]. Σε αυτό το σημείο, η συνεισφορά των μοντέλων μειωμένης τάξης αποδεικνύεται κρίσιμη, καθώς επιτρέπει την πολλαπλή εκτέλεση

υπολογισμών με εφικτό κόστος [74]. Ωστόσο, τίθεται το ερώτημα πόσο ακριβή μπορούν να είναι αυτά τα μοντέλα, ειδικά όταν ενσωματώνουν μη γραμμικούς όρους ή φαινόμενα επαφής (contact-friction) [14, 25].

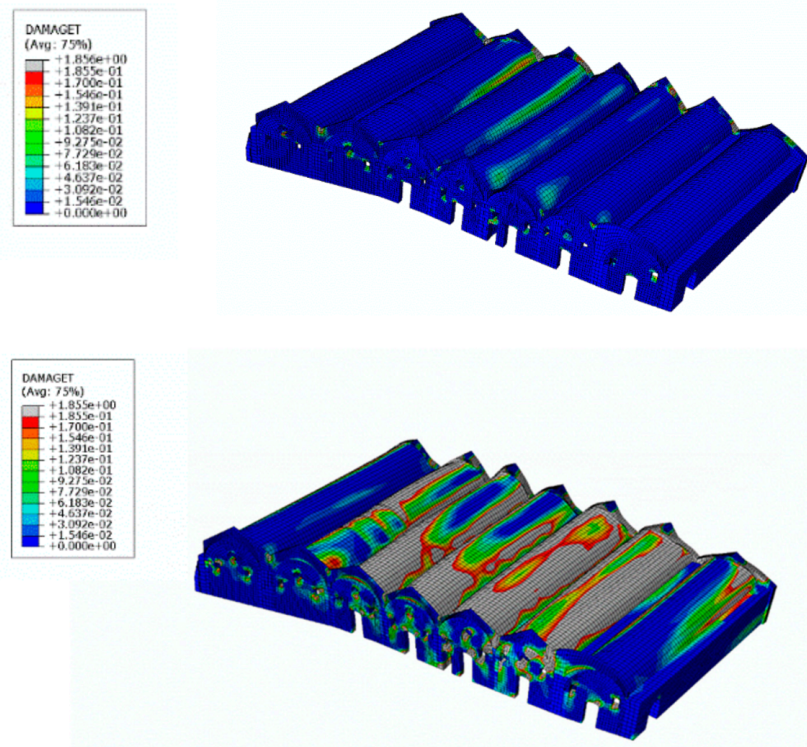


Figure 1.14: Εξέλιξη της κατανομής της εφελκυστικής βλάβης κατά τη διάρκεια του πέμπτου δευτερολέπτου του σεισμού της Θεσσαλίας (πιθανώς από [2]). Η έναρξη και η εξέλιξη της βλάβης παρουσιάζονται σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές.

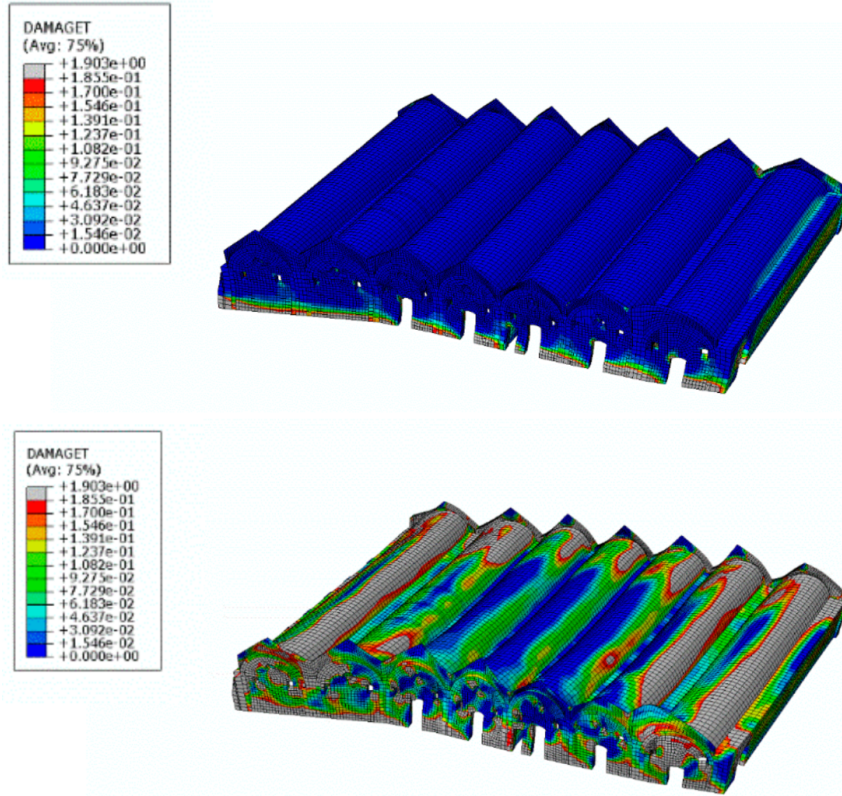


Figure 1.15: Εξέλιξη της κατανομής της εφελκυστικής βλάβης κατά τη διάρκεια του έκτου δευτερολέπτου του σεισμού Northridge (πιθανώς από [2]). Η έναρξη και η εξέλιξη της βλάβης παρουσιάζονται σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Τέλος, η ανάλυση της σεισμικής απόκρισης (στατικός ή δυναμικός υπολογισμός, φασματικές αναλύσεις, χρονοϊστορία) περιπλέκει περαιτέρω την κατάσταση [44, 9], διότι η υφιστάμενη φθορά ή οι υπάρχουσες ρωγμές ενδέχεται να επιδράσουν δραματικά στον μηχανισμό αστοχίας [2]. Από τη μια, τα εργαλεία φασματικής ανάλυσης απαιτούν τη λήψη αρκετών ιδιομορφών για την κάλυψη μεγάλου μέρους της μάζας· από την άλλη, η ανάλυση χρονοϊστορίας (time-history analysis) σε ένα 3Δ πλήρως μη γραμμικό μοντέλο είναι συχνά απαγορευτική από άποψη πόρων [25]. Έτσι, αναδεικνύεται η χρησιμότητα των ROM [74], αλλά και των Ψηφιακών Διδύμων [81, 90], που θα μπορούσαν να εντοπίζουν τα κρίσιμα σημεία (hotspots) των κατασκευών και να προβαίνουν σε έγκαιρη προειδοποίηση κινδύνου.

1.3 Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα

Από τις ανωτέρω παρατηρήσεις προκύπτουν συγκεκριμένοι στόχοι. Πρωταρχικά, επιδιώκεται η ανάπτυξη μεθόδων που θα συνδυάζουν τη γενική φιλοσοφία των Ψηφιακών Διδύμων με τις τεχνικές μειωμένης τάξης [81, 90, 74], ώστε να επιτευχθεί ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προσομοίωσης, πρόγνωσης και ελέγχου σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας, είναι σημαντικό να διερευνηθεί η ακρίβεια και η ευρωστία (robustness) των ROM υπό συνθήκες έντονης μη γραμμικότητας, όπως αυτές που αναπτύσσονται σε ρηγματωμένα λιθόκτιστα δομήματα ή σε σύνθετες υβριδικές κατασκευές.

Παράλληλα, η παρούσα μελέτη στοχεύει στο να εντοπίσει τις κατάλληλες ψηφιακές υποδομές για τη συνεχή επικαιροποίηση των μοντέλων [89, 81, 101]. Αυτή η επικαιροποίηση οφείλει να λαμβάνει υπόψη ποικιλία δεδομένων (π.χ. θερμοκρασιακές μεταβολές, δυναμικές μετρήσεις επιταχύνσεων, παραμορφώσεις κ.ά.) [82], καθώς και την αβεβαιότητα που εγγενώς υπάρχει σε τέτοιες μετρήσεις [78]. Με άλλα λόγια, απαιτείται μια συνδυαστική μεθοδολογία που θα επιτρέπει τον φιλτράρισμα των μετρήσεων, την αξιοποίηση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης ή στατιστικής παλινδρόμησης [90, 96, 97, 94], και την ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων στη μηχανική ανάλυση [80].

Περαιτέρω, ένα κρίσιμο ερώτημα είναι κατά πόσο τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά τα ψηφιακά περιβάλλοντα μπορούν να οδηγήσουν σε αξιόπιστες προτάσεις για την ενίσχυση ή τη συντήρηση ιστορικών μνημείων [22, 21, 23]. Σε τέτοιες εφαρμογές, δεν είναι πάντοτε επιθυμητή μια επεμβατική παρέμβαση: η διατήρηση της αυθεντικότητας και η προστασία του μνημειακού χαρακτήρα μπορεί να υπερισχύει της εκτεταμένης δομικής ενίσχυσης. Επομένως, τίθεται το θέμα της βελτιστοποίησης, όπου στόχος γίνεται η ελαχιστοποίηση του βαθμού επέμβασης, διασφαλίζοντας όμως παράλληλα τη δομική ασφάλεια. Αυτή η βελτιστοποίηση, μέσα από τα εργαλεία του Ψηφιακού Διδύμου, θα μπορούσε να γίνει με συστηματικό τρόπο, συγκρίνοντας σενάρια “ήπιας” ενίσχυσης ή επανόρθωσης βλαβών, και εκτιμώντας την πιθανή διάρκεια ζωής της κατασκευής [22, 84].

Τέλος, η παρούσα ερευνητική προσπάθεια εγείρει ερωτήματα που αφορούν την ίδια την αξιοπιστία των ευρημάτων. Μέθοδοι όπως το Modal Assurance Criterion (MAC) [41, 59] ή οι διαφορές ως προς τα παρατηρούμενα πλάτη μετακινήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βαθμονοούν τα ψηφιακά μοντέλα [52, 43, 55]. Ωστόσο, η τελική απόφαση για την καταλληλότητα μιας επέμβασης σε ένα μνημείο ή μιας ρύθμισης σε μια βιομηχανική εγκατάσταση πρέπει να λαμβάνεται με προσοχή, συνεκτιμώντας και την εμπειρική γνώση των μηχανικών και συντηρητών.

Chapter 2

Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

2.1 Θεωρητικές Βάσεις των Ψηφιακών Διδύμων

Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών δυνατοτήτων και των ασύρματων δικτύων δημιούργησε το έδαφος για την ανάδυση της έννοιας του Ψηφιακού Διδύμου [6, 66, 67]. Σε πρώτο επίπεδο, τα Ψηφιακά Δίδυμα αποσκοπούν στην αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου ή διαδικασίας σε ψηφιακή μορφή, ενσωματώνοντας ωστόσο δυνατότητες συνεχούς επικαιροποίησης από πραγματικά δεδομένα [66, 69]. Δεν πρόκειται απλώς για ένα παθητικό ψηφιακό μοντέλο· αντίθετα, η δυναμική ενημέρωση ενισχύει την ακρίβεια της προσομοίωσης και δίνει τη δυνατότητα προληπτικής διάγνωσης βλαβών [71, 87]. Στον χώρο των κατασκευών, ειδικότερα στις λιθόκτιστες ή ιστορικές κατασκευές, η εφαρμογή των Ψηφιακών Διδύμων συναντά πρακτικές δυσκολίες αλλά και μεγάλα οφέλη [81, 101].

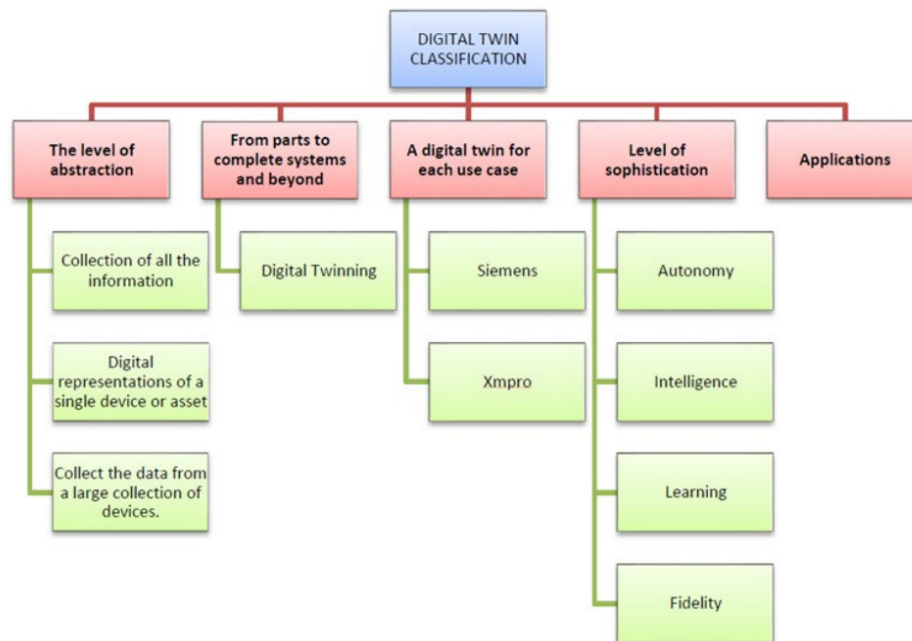


Figure 2.1: Ταξινόμηση Ψηφιακών Διδύμων [68, 71].

Στις λιθόκτιστες δομές, η ιδιαιτερότητα της μη ομοιογενούς τοιχοποιίας, η συχνότητα εμφάνισης ρωγμών, αλλά και η ιστορική σημασία των μνημείων θέτουν περιορισμούς στη χρήση επεμβατικών μεθόδων παρατήρησης [14]. Επομένως, η δικτύωση αισθητήρων και η απομακρυσμένη παρακολούθηση διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο [81, 82]. Ένα Ψηφιακό Δίδυμο για τέτοιου είδους δομή απαιτεί αφενός λεπτομερή τρισδιάστατη γεωμετρία που να περιλαμβάνει ενδεχομένως και τις αστοχίες ή κακοτεχνίες του παρελθόντος [7, 33], αφετέρου μία ακριβή φυσική περιγραφή των φαινομένων επαφής, τριβής και εφελκυστικής αδυναμίας που χαρακτηρίζουν τη λιθοδομή [4, 10, 54].

Παράλληλα, η δυναμική ανατροφοδότηση από αισθητήρες επιτρέπει την εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης ή παραμετρικής βελτιστοποίησης [96, 90], ώστε να προκύπτει μια πιθανοτική εκτίμηση της κατάστασης του κτιρίου. Αυτό έχει άμεση επίδραση στις αποφάσεις συντήρησης [87, 84], καθώς ένα υποβαθμισμένο τμήμα της τοιχοποιίας μπορεί να εντοπιστεί νωρίτερα ή να παρακολουθείται στενότερα, μειώνοντας τον κίνδυνο μιας αιφνίδιας αστοχίας [91].

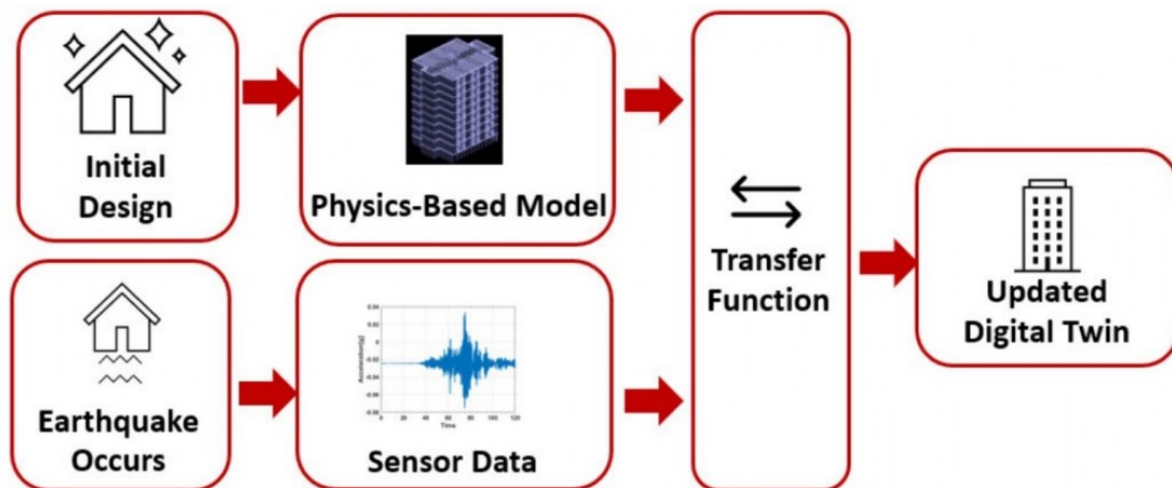


Figure 2.2: Πλαίσιο του προσαρμοστικού ψηφιακού δίδυμου (Adaptive Digital Twin Framework) [93, 81].

Η σημαντικότερη ίσως θεωρητική συνεισφορά των Ψηφιακών Διδύμων έγκειται στην υβριδική σύνδεση μεταξύ “data-driven” και “physics-based” προσεγγίσεων [99, 100]. Από τη μία, οι μετρήσεις πεδίου, προερχόμενες από αισθητήρες, αποτελούν την αφετηρία για την επανεκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου [82, 90]· από την άλλη, η φυσική και μηχανική περιγραφή του φαινομένου (π.χ. εξισώσεις ισορροπίας, σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων) θέτουν τα βασικά όρια μέσα στα οποία κινούνται οι όποιες στατιστικές μέθοδοι [98]. Με αυτό τον τρόπο, τα Ψηφιακά Δίδυμα αποκτούν τόσο την ευελιξία των υπολογιστικών μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης όσο και τη θεωρητική εγκυρότητα των καθιερωμένων προτύπων στη μηχανική των κατασκευών [79].

2.2 Τρέχουσα Κατάσταση

Η διεθνής ερευνητική δραστηριότητα έχει στραφεί κατά ένα μεγάλο μέρος στην ανάλυση, την παρακολούθηση και την αποτίμηση φέρουσας ικανότητας ιστορικών κατασκευών, μεταξύ των οποίων ξεχωρίζουν τα μνημεία με λιθοκτιστες καμάρες, τα παλαιά γεφύρια και οι θολοσκεπείς ναοί [11, 14, 19]. Ένας κοινός παρονομαστής στις περισσότερες μελέτες είναι η προσπάθεια κατανόησης της μηχανικής συμπεριφοράς της δομής μέσα από σύνθετες προσομοιώσεις. Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζεται μία φασματική ανάλυση (modal analysis) για την αναγνώριση των ιδιομορφών [1, 43], ακολουθούμενη από δυναμικές αναλύσεις (time-history) που λαμβάνουν υπόψη σεισμικά γεγονότα πραγματικών ή συνθετικών καταγραφών [2, 9, 25, 24]. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει μια πιο ρεαλιστική εικόνα της αναπτυσσόμενης μετακίνησης και των τάσεων, ιδιαίτερα όταν η δομή παρουσιάζει ευαισθησία σε εφελκυστικά φορτία ή στοχαστικές καταπονήσεις.

Σημαντικές έρευνες έχουν διεξαχθεί σε διάφορα ιστορικά γεφύρια και κτίρια της μεσογειακής λεκάνης, όπου η επιρροή σεισμικών φαινομένων είναι υψηλή [44, 34, 37, 27, 13, 58]. Στην Ελλάδα, η μελέτη των βενετσιάνικων Νεωρίων στα Χανιά αποτελεί ένα ενδεικτικό παράδειγμα της πολυπλοκότητας που αντιμετωπίζουμε, όταν οφείλουμε να ενσωματώσουμε στη μοντελοποίηση τόσο τις διαχρονικές επεμβάσεις (π.χ. μπάλωμα με σκυρόδεμα, κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σημεία ρωγμών) όσο και την αλλοίωση των αρχικών υλικών (π.χ. αποσάθρωση λιθοδομής) [1, 2, 60, 63]. Παράλληλα, η εφαρμογή μεθόδων damage plasticity για τη λιθοδομή κερδίζει έδαφος [10, 2, 55], καθώς δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης της βαθμιαίας αστοχίας λόγω εφελκυσμού ή θλίψης. Ωστόσο, η βαθμονόμηση των σχετικών παραμέτρων παραμένει δύσκολη, επειδή η λιθοδομή δεν είναι τυποποιημένο υλικό [14, 72].

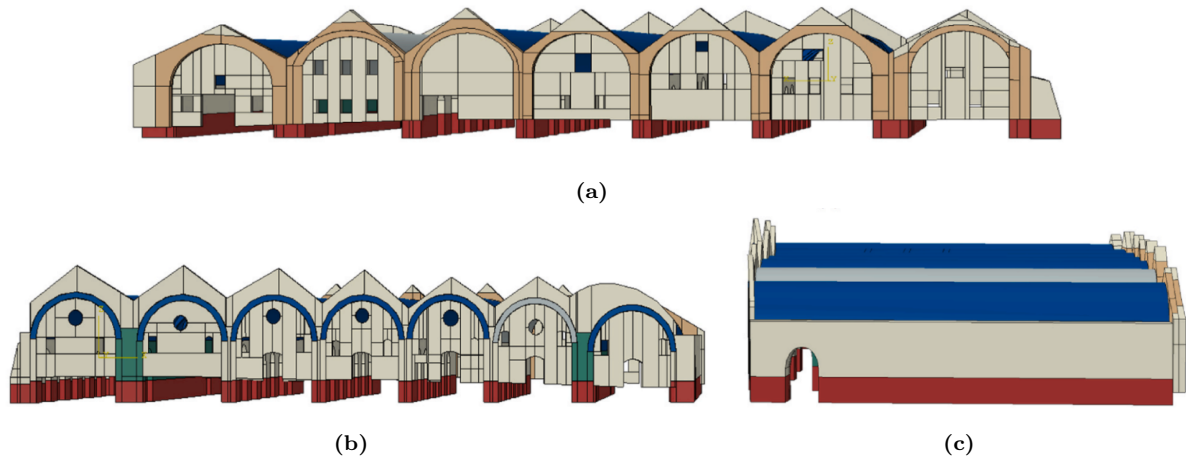


Figure 2.3: Όψεις μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (Νεώρια): (a) Βόρεια, (b) νότια, (c) ανατολική [1].

Επιπλέον, πολλές από τις πρόσφατες μελέτες εστιάζουν στη σύγκριση διαφορετικών υπολογιστικών προσεγγίσεων: αφενός, τα συνεχή μοντέλα (continuum models) όπου η λιθοδομή αντιμετωπίζεται ως ομοιογενές, ισοτροπικό ή ανισοτροπικό υλικό· αφετέρου, τα διακριτά μοντέλα (discrete element models) στα οποία κάθε λίθος μπορεί να θεωρηθεί ως διακριτό σώμα με επαφές τριβής [14, 25, 20, 26]. Κάθε μεθοδολογία έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα: οι συνεχείς μέθοδοι είναι πιο εύκολο να ενσωματώσουν κλασικές εξισώσεις μηχανικής, ενώ οι διακριτές απαιτούν μεγαλύτερο υπολογιστικό φόρτο, αλλά μπορούν να αναπαραστήσουν καλύτερα τη συμπεριφορά της ασυνέχειας ανάμεσα στους λίθους. Αυτή η διαπραγμάτευση μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικής πολυπλοκότητας είναι ακριβώς εκεί όπου τα μοντέλα μειωμένης τάξης αποσκοπούν να δώσουν πιο συμφέρουσες λύσεις [74, 103].

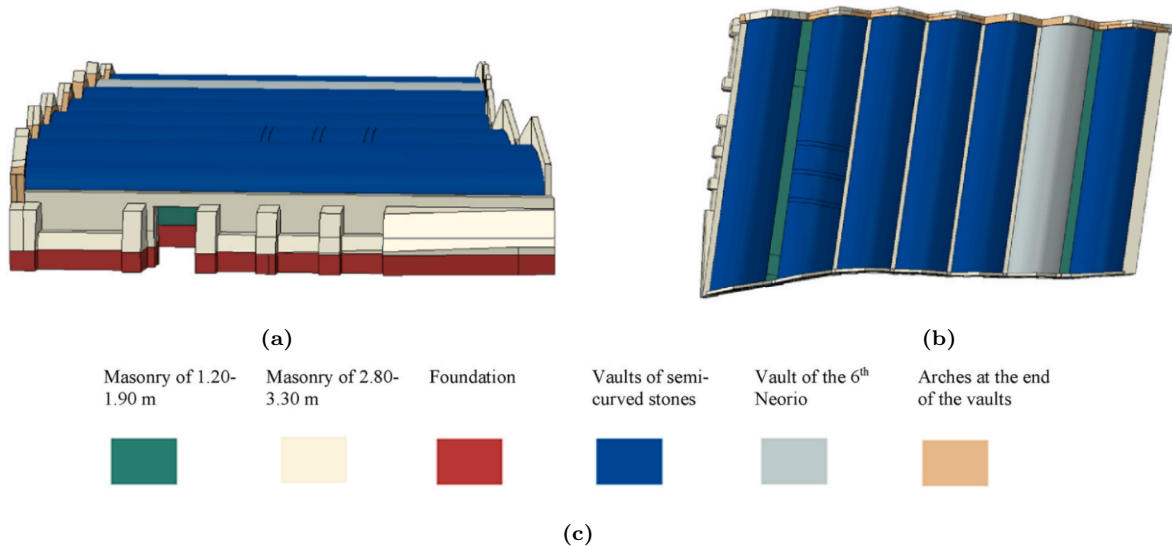


Figure 2.4: Περαιτέρω όψεις μοντέλου ΠΕ (Νεώρια): (d) Δυτική και (e) άνω όψη, με τα χρώματα να υποδεικνύουν περιοχές με διαφορετικές ιδιότητες υλικού. (f) Χρώματα που αποδίδονται σε διάφορα δομικά μέρη [1].

Σε παράλληλο επίπεδο, τα Ψηφιακά Δίδυμα καθοδηγούν την ερευνητική ατζέντα, καθώς επιδιώκεται πλέον μια αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ της πραγματικής κατασκευής και του μοντέλου [66]. Η διεθνής βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπως πετρελαϊκές πλατφόρμες ή αεροδιαστημικές εφαρμογές, η έννοια της παρακολούθησης “on-line” είναι ήδη σε πλήρη εφαρμογή [92, 95, 91]. Στα ιστορικά μνημεία, που δεν επιτρέπουν πολύπλοκες επεμβάσεις, η διαδικασία αυτή είναι πιο αργή [101], αλλά οι τελευταίες δημοσιεύσεις δείχνουν έναν σαφή προσανατολισμό προς την εγκατάσταση ελαφρών αισθητήρων και συστημάτων ασύρματης δικτύωσης (π.χ. 5G), ώστε να διευκολύνεται η συλλογή και η επεξεργασία δεδομένων [81].

2.3 Προκλήσεις και Ελλείψεις

Παρότι η έρευνα στον χώρο των μη γραμμικών προσομοιώσεων και των Ψηφιακών Διδύμων έχει κάνει σημαντικά βήματα προόδου, υπάρχουν ακόμα αρκετές προκλήσεις [14, 101]. Μια πρώτη δυσκολία είναι η ενσωμάτωση των ρωγμών ή των μονοδιάστατων-δισδιάστατων ασυνεχειών στο μοντέλο. Αν και μέθοδοι όπως η Extended Finite Element Method (XFEM) [3, 48, 50] ή τα μοντέλα επαφής (contact-friction) [4, 58] έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά σε κάποιες περιπτώσεις, η υπολογιστική επιβάρυνση είναι υψηλή, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλης κλίμακας μνημεία [25].

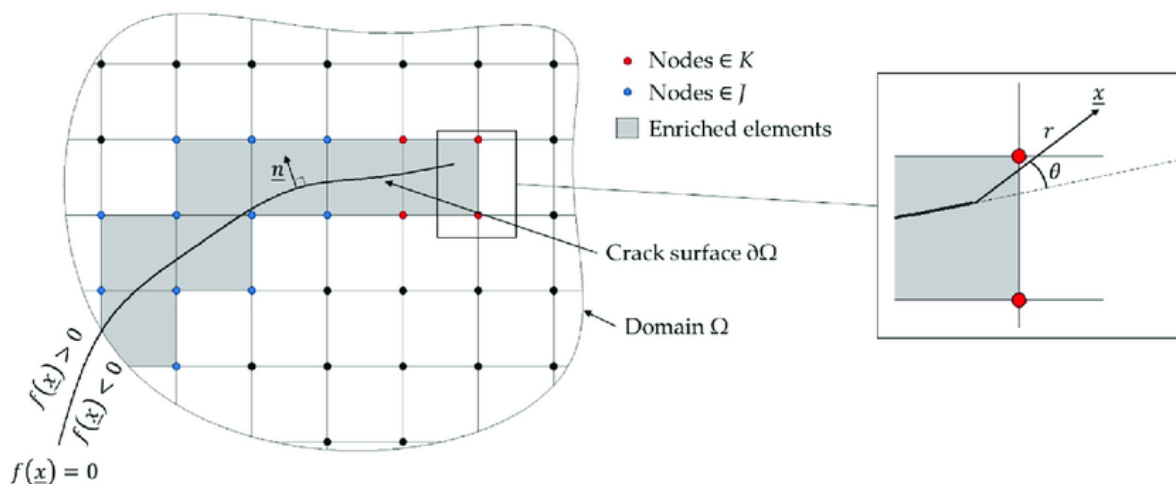


Figure 2.5: Απεικόνιση της προσέγγισης της διευρυμένης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Extended Finite Element Method - XFEM) [3, 50].

Μια δεύτερη πρόκληση εντοπίζεται στο πεδίο της βαθμονόμησης των υλικών παραμέτρων [77, 78]. Πολλές λιθόκτιστες δομές δεν επιτρέπουν καταστροφικές δοκιμές (π.χ. λήψη δοκιμών από ευαίσθητα μνημεία), με αποτέλεσμα οι μηχανικοί να βασίζονται σε μικρο-επεμβατικές ή μη-καταστροφικές μεθόδους, όπως υπερήχους, ανταπόκριση κρούσης ή αξιολόγηση παραμορφώσεων [72]. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών συχνά παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση ή ασάφεια, καθιστώντας δύσκολη τη συσχέτιση μεταξύ μοντελοποιημένων παραμέτρων (π.χ. μέτρο ελαστικότητας, όριο εφελκυσμού) και πραγματικής συμπεριφοράς [14]. Η αβεβαιότητα επιτείνεται κι από το γεγονός ότι μια λιθόκτιστη κατασκευή μπορεί να περιέχει διαφορετικές ποιότητες λίθων ή κονιάματος σε διαφορετικές ζώνες, ειδικά αν έχουν γίνει προσθήκες σε μεταγενέστερες εποχές.

Τρίτον, η χρήση μοντέλων μειωμένης τάξης στη μη γραμμική περιοχή δεν έχει ακόμη ωριμάσει στον βαθμό που συναντάμε σε άλλα πεδία (π.χ. αεροδιαστημικές κατασκευές, όπου η γραμμικότητα είναι ενίοτε κυρίαρχη) [74]. Οι διερευνητικές προσπάθειες που υπάρχουν καταδεικνύουν ότι η κατασκευή ROM για έντονα μη γραμμικά προβλήματα (όπως ρήξη ή επαφή) απαιτεί ιδιαίτερες τεχνικές, πολλές φορές εξειδικευμένες για το εκάστοτε πρόβλημα.

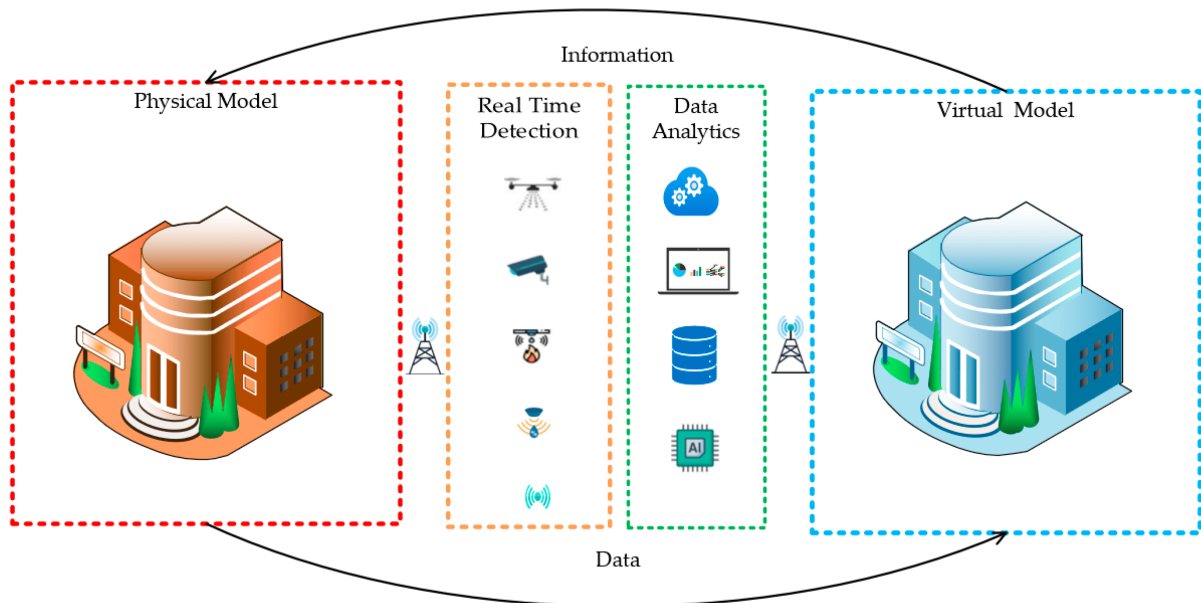


Figure 2.6: Αρχιτεκτονική συστήματος Ψηφιακού Διδύμου [89, 81].

Τέλος, η φιλοσοφία των Ψηφιακών Διδύμων προϋποθέτει μια συνεχή ή τακτική ροή δεδομένων [66]. Εάν η υποδομή αισθητήρων είναι ελλιπής ή η συντήρησή της είναι προβληματική, τότε το Ψηφιακό Δίδυμο θα πάψει να είναι επικαιροποιημένο, ακυρώνοντας την ίδια τη βασική του ιδέα [101]. Ιδιαίτερα σε ιστορικά κτίρια, όπου οι αισθητήρες πρέπει να τοποθετηθούν διακριτικά, η επίτευξη επαρκούς πυκνότητας μετρήσεων ενδέχεται να είναι δύσκολη ή δαπανηρή [81]. Έτσι, ακόμα κι αν οι αλγόριθμοι ROM ή οι μέθοδοι AI είναι έτοιμες, η πραγματική αξιοποίησή τους εξαρτάται καθοριστικά από την ποιότητα και την ποσότητα των δεδομένων παρακολούθησης [89].

2.4 Πρόσφατες Εξελίξεις στα Ψηφιακά Δίδυμα

Η πιο σύγχρονη προσέγγιση των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twin, DT) τα περιγράφει ως πιστά ψηφιακά αντίγραφα ενός φυσικού αντικειμένου, συστήματος ή διαδικασίας, με σκοπό την προσομοίωση, πρόβλεψη και βελτιστοποίηση της απόδοσής τους [66, 69, 70]. Κομβικό στοιχείο του DT είναι η διασύνδεσή του με δίκτυα αισθητήρων, τα οποία συλλέγουν ψηφιακά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (IoT), τα οποία στη συνέχεια μεταδίδονται μέσω προηγμένων ασύρματων δικτύων (π.χ. 5G) [81]. Παράλληλα, εξελεγχόμενες μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης (AI) και βαθιάς μάθησης (DL) συνεισφέρουν στην επεξεργασία των μεγάλων δεδομένων (big data) [102, 96], ενώ προηγμένες πολυφυσικές προσομοιώσεις (multi-physics computational mechanics) επιδιώκουν να αναπαραγάγουν με μεγάλη πιστότητα την πραγματικότητα [98]. Μέσα από αυτό τον συνδυασμό υλισμικού (αισθητήρες, συστήματα ασύρματης μετάδοσης) και λογισμικού (υπολογιστικά μοντέλα, AI, DL), προκύπτει μια κυβερνο-φυσική οντότητα (cyber-physical system), που εναρμονίζεται με τις επιταγές της λεγόμενης «Βιομηχανίας 4.0» (Industry 4.0) [6, 93].

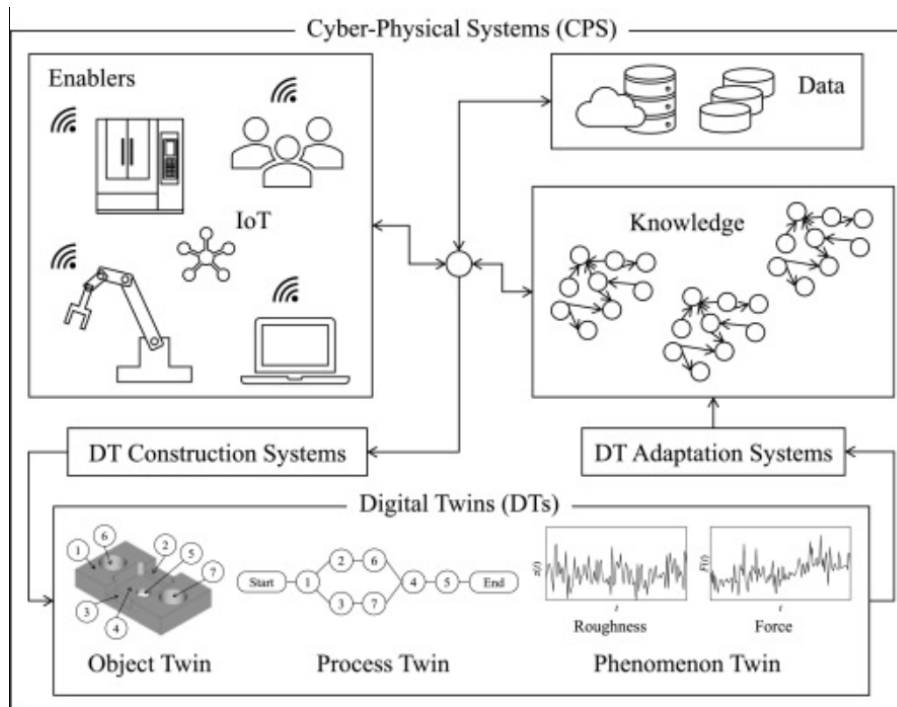


Figure 2.7: Ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων με βάση το σήμα αισθητήρα [81, 82].

Στον τομέα των υποδομών, όπως για παράδειγμα οι τουρμπίνες ανέμου [91, 85] ή οι πλωτές κατασκευές ανοικτής θαλάσσης [103], οι αστάθμητες και ακραίες φορτίσεις καθιστούν το ζήτημα της πρόγνωσης της κόπωσης και της υπολειπόμενης ζωής των συστημάτων ιδιαίτερα απαιτητικό [84]. Αντίστοιχα, σε κλασικές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, που λειτουργούν συνδυαστικά με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, οι φορτίσεις μπορεί να παρουσιάσουν έντονες διακυμάνσεις, δημιουργώντας την ανάγκη για πιο σύνθετες προσομοιώσεις και πιο ακριβή πρόβλεψη τυχόν αστοχιών [95]. Η πρόσφατη ερευνητική δραστηριότητα εστιάζει στη συνεχή επικαιροποίηση των μοντέλων μέσω αισθητήρων και στη χρήση παραμετρικών μοντέλων ή μοντέλων μειωμένης τάξης (parametric/reduced-order models) [90, 74], ώστε να εξασφαλίζεται ταχεία προσομοίωση και λήψη αποφάσεων σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο.

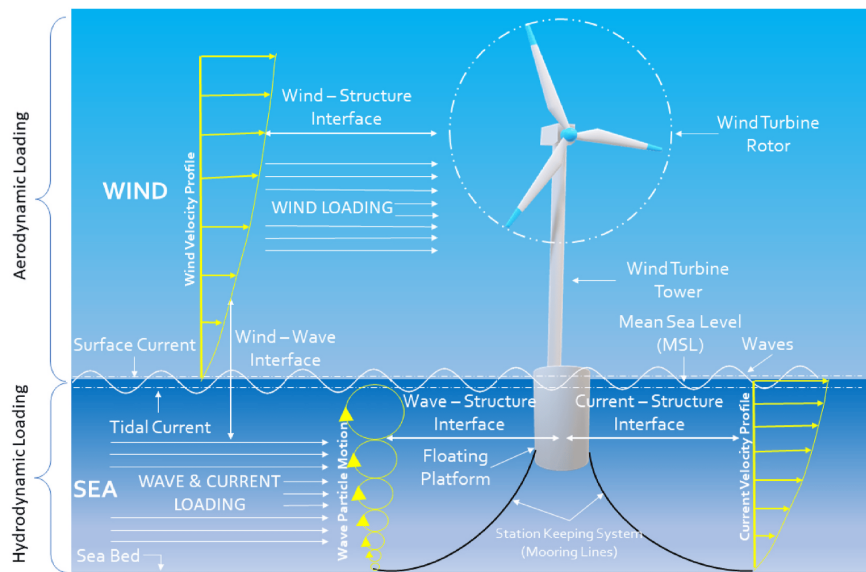


Figure 2.8: Σχηματική απεικόνιση των διεπαφών ρευστού-κατασκευής και των δυναμικών φορτίων που υφίστανται οι πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες [85].

Στο πλαίσιο της εφαρμογής των DT σε κατασκευές και ειδικότερα σε έργα πολιτικού μηχανικού, βασικό ζητούμενο είναι η συσχέτιση των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), των τεχνικών αναγνώρισης παραμέτρων (parameter identification) [78, 77] και των μεθόδων παρακολούθησης της κατασκευής (SHM) [82, 86]. Όπως τονίζεται στη σχετική βιβλιογραφία [81, 90], ένα ψηφιακό μοντέλο δεν αρκεί να είναι λεπτομερές· οφείλει να επικαιροποιείται διαρκώς μέσα από μετρήσεις πεδίου (π.χ. καταγραφές επιταχύνσεων, μετρήσεις τάσεων/παραμορφώσεων) [89], ενώ οι τεχνικές βελτιστοποίησης και τεχνητής νοημοσύνης αξιοποιούνται για την ταχύτερη ανάκτηση ή προσαρμογή κρίσιμων παραμέτρων του μοντέλου [52, 96].

Παράλληλα, η δημιουργία και η χρήση ενός Ψηφιακού Διδύμου μπορεί να αφορά πολλά επίπεδα ή διαστάσεις: από την απλή τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση (π.χ. BIM) μέχρι την πλήρη ενσωμάτωση δεδομένων από τη λειτουργία και τη συντήρηση ενός εξοπλισμού (PLM, Product Lifecycle Management) [87]. Σύμφωνα με τη σύγχρονη προσέγγιση, ένα DT μπορεί να διαβαθμιστεί ως προς την πολυπλοκότητα και την αυτονομία του [68, 71], φτάνοντας σε στάδια όπου μπορεί, με χρήση έξυπνων αλγόριθμων, να υποκαθιστά έως έναν βαθμό τις αποφάσεις του ανθρώπου-χειριστή [93].

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύνδεση των DT με τεχνολογίες επαυξημένης ή εικονικής πραγματικότητας (AR/VR), που επιτρέπουν την αλληλεπίδραση των χρηστών με τον ψηφιακό κόσμο [105, 106]. Σε βιομηχανικές εφαρμογές, αυτό μεταφράζεται σε συστήματα τηλε-ελέγχου ή προσομοίωσης διαφόρων σεναρίων, ενώ στην πολιτιστική κληρονομιά ενδέχεται να ανοίγει τον δρόμο για ψηφιακές επισκέψεις ή εκπαιδευτικές εφαρμογές που αναδεικνύουν τον μνημειακό χαρακτήρα μιας κατασκευής.

Επισκόπηση Κεφαλαίου: Η ενσωμάτωση των νεότερων ερευνητικών δεδομένων για τα Ψηφιακά Δίδυμα [6, 81] φωτίζει περαιτέρω τα εμπόδια αλλά και τις ευκαιρίες που προσφέρονται στην παρακολούθηση και προγνωστική ανάλυση κατασκευών. Ιδίως στις λιθόκτιστες ή ιστορικές υποδομές [14], η δυναμική ενημέρωση της πληροφορίας, η παράλληλη εκτέλεση ταχύτατων προσομοιώσεων (μέσω μειωμένων μοντέλων [74, 90]) και η αξιοποίηση σύγχρονων μεθόδων AI/ML (τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση) [99, 102] μπορούν να συμβάλουν αποτελεσματικά στη συντήρηση και τη διαχείριση της κληρονομιάς [87]. Συναφώς, η εγκατάσταση κατ'άλληλων αισθητήρων [82], η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων [89] και η ευφυής τακτική ανανέωση των προσομοιωτικών μοντέλων [90] αποτελούν κομβικά σημεία για την επιτυχή εφαρμογή της τεχνολογίας των DT, τόσο σε πολιτιστικά μνημεία όσο και σε σύγχρονες βιομηχανικές εγκαταστάσεις [101, 103].

Chapter 3

Μεθοδολογία

3.1 Εννοιολογικό Πλαίσιο

Το εννοιολογικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγκειται στον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ενιαίου μηχανισμού που θα επιτρέπει τη δημιουργία και τη συνεχή βελτίωση ενός ψηφιακού ομοιώματος μιας σύνθετης κατασκευής [66, 81], με έμφαση σε λιθόκτιστα ή μνημειακά σύνολα [11, 18]. Στην περίπτωση ιστορικών μνημείων, όπως τα βενετσιάνικα Νεώρια που αποτελούν το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας, το ζητούμενο είναι να ληφθεί υπόψη η σύνθετη γεωμετρία, οι διάφορες ποιότητες υλικού και οι επεμβάσεις που έχουν γίνει διαχρονικά [1, 2, 14]. Η Εικόνα 3.1 απεικονίζει το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) της κατασκευής των Νεωρίων και τα σημεία στα οποία έχουν συλλεχθεί χρονοϊστορίες μετατόπισης για την ανάλυση.

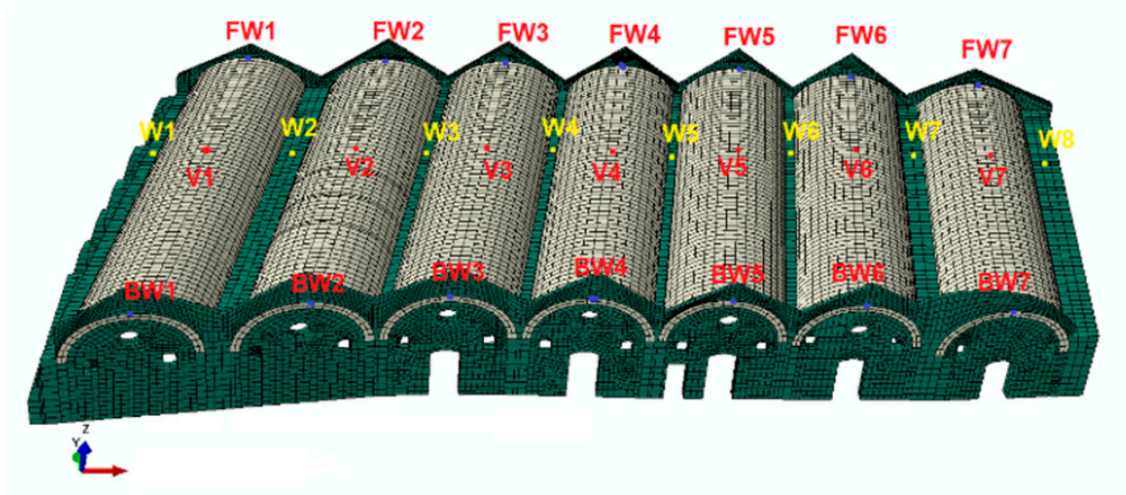


Figure 3.1: Το μοντέλο FEM της κατασκευής (Νεώρια) και τα σημεία της, στα οποία έχουν συλλεχθεί χρονοϊστορίες μετατόπισης [2].

Μια βασική πρόκληση συνίσταται στην επιλογή του κατάλληλου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Ορισμένες μελέτες υποδεικνύουν ότι απλουστευμένες προσεγγίσεις, όπως η χρήση ισοδύναμων φορέων (equivalent frames), δεν αρκούν για να αποδώσουν την πλήρη τρισδιάστατη (3Δ) συμπεριφορά λιθόκτιστων δομών, ειδικά όταν αυτές χαρακτηρίζονται από θολωτές ή τοξωτές μορφές [16, 17, 15, 14]. Αντιθέτως, τα πιο περίπλοκα μοντέλα, που περιλαμβάνουν αλληλεπίδραση επαφής (contact) [4, 58] ή ακόμα και πολυκλιμακωτές (multi-scale) προσεγγίσεις [3, 48], μπορούν να είναι περισσότερο ακριβή, αλλά απαιτούν αξιόπιστα δεδομένα και είναι ιδιαίτερα απαιτητικά σε πόρους [14].

Στην εργασία αυτή ακολουθείται μια μέση οδός: δημιουργείται αρχικά ένα λεπτομερές αριθμητικό μοντέλο (3Δ FEM) [1], το οποίο εμπλουτίζεται με μη γραμμικά χαρακτηριστικά (π.χ. επαφές, πιθανή μικρο-

ρωγμάτωση) εκεί όπου κρίνεται απαραίτητο [2, 10]. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται τεχνικές απλοποίησης ώστε να προκύψει ένα μοντέλο μειωμένης τάξης (ROM) [73, 74], επαρκώς ικανό για συχνή και ταχεία επαναλαμβανόμενη ανάλυση. Παράλληλα, εφαρμόζονται μέθοδοι παραμετρικής ή στοχαστικής βελτιστοποίησης που επικαιροποιούν τα κρίσιμα μεγέθη του μοντέλου βάσει πραγματικών μετρήσεων (π.χ. αποτίμηση δυναμικών ιδιοτήτων, παρατήρηση ρωγμών) [52, 47, 78, 90], διασφαλίζοντας ότι το τελικό ψηφιακό ομοίωμα ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση του μνημείου.

3.2 Συλλογή Δεδομένων και Απαιτήσεις

Η συλλογή δεδομένων για την ανάπτυξη ενός Ψηφιακού Διδύμου σε ιστορικά ή μεγάλου μεγέθους βιομηχανικά περιβάλλοντα αντιμετωπίζει αρκετές πρακτικές δυσκολίες [101, 81]. Για την περίπτωση των Νεωρίων, πέρα από τη χρήση συμβατικών μετρήσεων (φωτογραφική τεκμηρίωση, βιντεοσκόπηση, τρισδιάστατη αποτύπωση με σαρωτές LiDAR [7, 33]), αξιοποιήθηκαν επιταχυνσιόμετρα για την αποτίμηση της δυναμικής απόκρισης κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων (οι οποίες αναλύονται στην παρούσα εργασία και παρατίθενται στον Πίνακα 3.1) ή άλλων φαινομένων (όπως η ανεμοπύση) [43, 60]. Επίσης, όπου ήταν εφικτό, χρησιμοποιήθηκαν μετατοπισσιόμετρα ή συστήματα GNSS για την παρακολούθηση στατικής ή αργής δυναμικής μετακίνησης [82]. Η ασύρματη επικοινωνία τείνει να αντικαθιστά την ενσύρματη, ιδίως όταν οι αισθητήρες τοποθετούνται σε δυσπρόσιτα σημεία, ενώ τεχνολογίες τύπου 5G ή LoRaWAN θεωρούνται ιδιαίτερα υποσχόμενες [81]. Σε κάθε περίπτωση, οι αισθητήρες οφείλουν να πληρούν αυστηρές προδιαγραφές, ιδίως σε περιβάλλοντα με αυξημένη υγρασία ή παρουσία θαλασσινού νερού, όπως αυτό των Νεωρίων. Παράλληλα, η προσεκτική καταγραφή ρωγμών και βλαβών μέσω επιτόπιων επιθεωρήσεων διατηρεί κεντρικό ρόλο [72], ενώ νεότερες τεχνολογίες, όπως η χρήση drones και ρομποτικών συστημάτων, μπορούν να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στη χαρτογράφηση επιφανειών και στην αποτύπωση βλαβών σε μεγάλα ύψη ή δυσπρόσιτες περιοχές [7, 103]. Όλα τα παραπάνω δεδομένα συνενώνονται σε κοινή βάση [81, 89], συμπληρώνοντας ιστορικές πηγές και υφιστάμενες μελέτες για την πληρέστερη δυνατή αποτύπωση της πραγματικής κατάστασης της δομής των Νεωρίων.

No.	Mw	Event Name	Name of Station	Date of Event
EQ.1	6.3	Thessaly Earthquake	Station S5	3 March 2021
EQ.2	6.3	Thessaly Earthquake	Station S4	3 March 2021
EQ.3	6.0	Arkalochori Earthquake (Main shock)	Station ABEA	27 September 2021
EQ.4	5.3	Arkalochori Earthquake (Secondary shock)	Station ABEA	28 September 2021
EQ.5	6.1	Earthquake West of Chania	Station ABEA	27 November 2021
EQ.6	6.7	Samos Earthquake	Station ABEA	30 October 2020
EQ.7	6.69	Northridge, California	Griffith Observatory	17 January 1994
EQ.8	6.7	Northridge, California	MT Wilson-Cit Seis Station (CDMG Station 24399)	17 January 1994
EQ.9	6.9	Irpinia, Italy	Sturno	23 November 1980

Table 3.1: Επιλεγμένοι Σεισμοί ανάλυσης (πιθανώς βάσει [2]).

3.3 Ανάπτυξη Μοντέλου και Εργαλεία

3.3.1 Βασικό Γεωμετρικό Μοντέλο και Μη Γραμμικότητα

Για να αποτυπωθεί η πολυπλοκότητα λιθόκτιστων μνημείων όπως τα Νεώρια, χρησιμοποιείται ένα αναλυτικό τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο που περιγράφει διαφορετικές ποιότητες ή ζώνες τοιχοποιίας, ιδιαίτερα προσεκτική αποτύπωση των θολωτών ή τοξωτών επιφανειών [1, 64], καθώς και όλων των επεμβάσεων που έχουν πραγματοποιηθεί σε προγενέστερους χρόνους [2]. Η μελέτη της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς της δομής πραγματοποιείται τόσο με γραμμικές (φασματικές, χρονοϊστορικές) όσο και με μη γραμμικές αναλύσεις, όπως damage plasticity [10, 2] ή μοντέλα επαφής (contact) για την προσομοίωση των αρμών σε

λιθοδομές [4, 58]. Ενδεικτικές ιδιομορφές που προκύπτουν από την ανάλυση του μοντέλου των Νεωρίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.2. Σε μεγάλα και σύνθετα μνημεία κρίνεται συχνά επιβεβλημένη η χρήση εμπορικού λογισμικού (Abaqus, ANSYS, Marc) [50], λόγω της δυνατότητάς του να χειρίζεται εκτεταμένα προβλήματα με πολλές ιδιομορφές και πιθανή διάδοση ρωγμών.

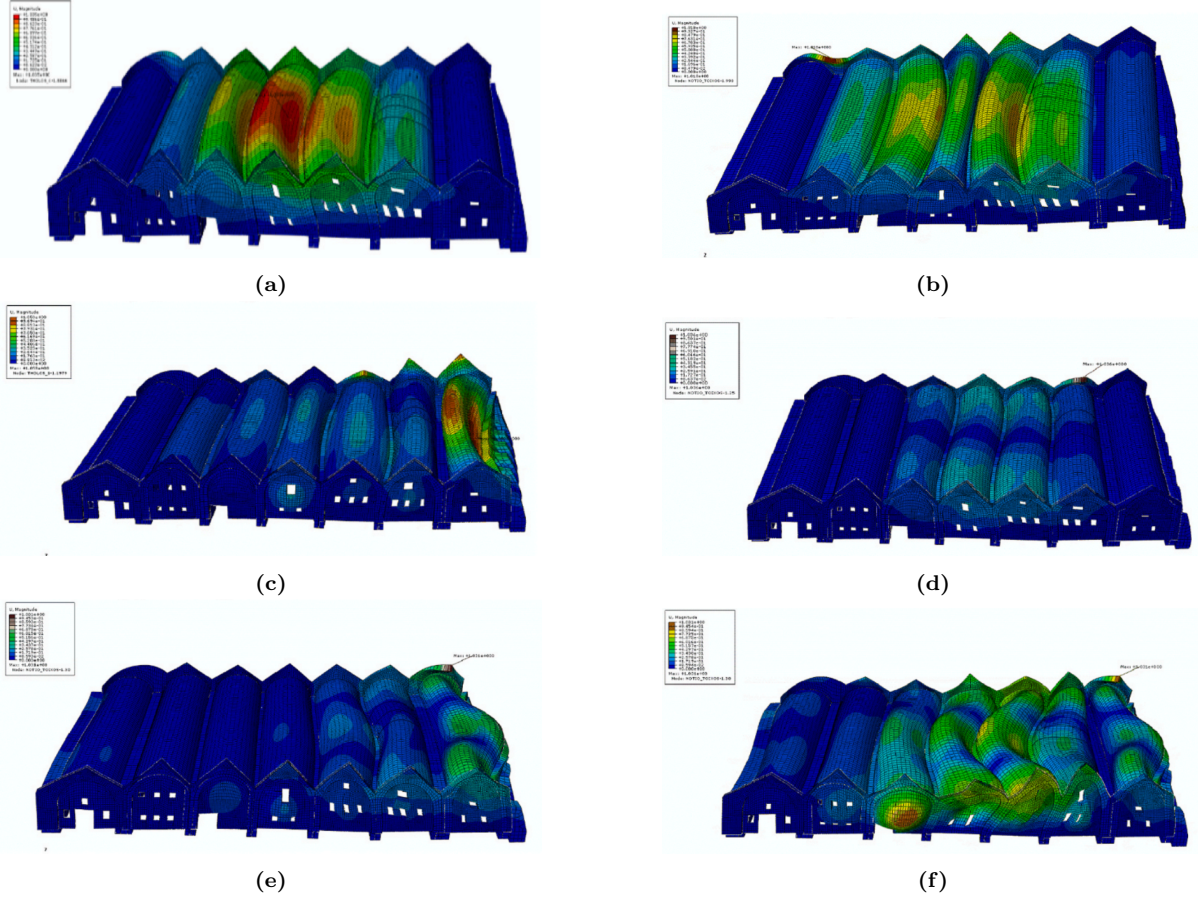


Figure 3.2: Επιλεγμένες ιδιομορφές (Νεώρια, βλ. και Fig. 1.9): (a). 1η ιδιομορφή @ 3.35 Hz. (b). 2η ιδιομορφή @ 4.19Hz. (c). 6η ιδιομορφή @ 5.22Hz. (d). 8η ιδιομορφή @ 5.41Hz. (e). 24η ιδιομορφή @ 7.53Hz. (f). 25η ιδιομορφή @ 7.81Hz [1, 60].

3.3.2 Μοντέλα Μειωμένης Τάξης (ROM)

Μετά την κατασκευή του αναλυτικού αριθμητικού μοντέλου, όπως αυτό των Νεωρίων, ακολουθεί η μείωση της διαστατικότητας, ώστε να προκύψει ένα υπολογιστικά ελαφρύτερο, αλλά αξιόπιστο μοντέλο μειωμένης τάξης (ROM) [74]. Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει στατική ή δυναμική συμπύκνωση (Guyan, Craig-Bampton) [73, 74], χρήση μεθόδων SVD (snapshot-based) για λιγότερο έντονα μη γραμμικά προβλήματα, ή ακόμα και τεχνικές hyper-reduction που εστιάζουν σε κρίσιμες περιοχές της δομής, όπου εμφανίζονται μεγάλες παραμορφώσεις ή ρωγμές. Στην παρούσα μελέτη που αφορά τα Νεώρια, η ανάπτυξη ROM (όπως απεικονίζεται σχηματικά στη ροή εργασιών της Εικόνας 3.3) αποσκοπεί στη διευκόλυνση των επαναλαμβανόμενων αναλύσεων για διάφορα σεισμικά σενάρια που περιγράφονται στον Πίνακα 3.1. Στόχος είναι να διατηρηθεί επαρκής ακρίβεια στα κρίσιμα μέρη της κατασκευής, επιτρέποντας παράλληλα τον ταχύτερο υπολογισμό διαφόρων σεναρίων φόρτισης.

ROM Workflow



Figure 3.3: Ροή εργασιών ανάπτυξης Μοντέλου Μειωμένης Τάξης (Reduced Order Modeler - ROM) [74, 90].

3.3.3 Ενοποίηση και Αυτοματοποίηση

Η ροή εργασιών για την ανάλυση των Νεωρίων ενοποιείται μέσω προγραμματιστικών περιβαλλόντων που υποστηρίζουν αυτοματοποίηση (π.χ. βιβλιοθήκες Python) [1], επιτρέποντας την ταχεία αλλαγή παραμέτρων ή υλικών ιδιοτήτων, τη συλλογή και διαχείριση δεδομένων από εγκατεστημένους αισθητήρες (αν και στην παρούσα φάση της μελέτης των Νεωρίων δεν υπάρχει μόνιμο σύστημα αισθητήρων) [81], καθώς και τη δημιουργία περιβάλλοντος διεπαφής (dashboard) για την ανάλυση και την οπτικοποίηση κρίσιμων μεγεθών. Μέσα από τέτοιες πλατφόρμες, καθίσταται δυνατή η εκτέλεση προσομοιώσεων σχεδόν σε πραγματικό χρόνο (near real-time) [82, 90], ενσωματώνοντας διαφορετικά σενάρια σεισμικών διεγέρσεων (όπως αυτά του Πίνακα 3.1) ή άλλων φορτίων, όπως παρατηρούνται στο πεδίο.

3.4 Στρατηγική Επικύρωσης

Η επικύρωση του μοντέλου (validation) αποτελεί βασικό στάδιο [14], δεδομένης της πολυπλοκότητας των λιθοκτιστων μνημείων όπως τα Νεώρια και των αβεβαιοτήτων στα υλικά. Αρχικά, πραγματοποιείται γραμμική ανάλυση ιδιομορφών (modal analysis, βλ. Εικόνα 3.2) και σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις (Operational Modal Analysis) [43, 55]. Για την επικύρωση του μοντέλου των Νεωρίων, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο MAC (Modal Assurance Criterion) [41, 59], όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4 για τον προσδιορισμό επικρατούντων συνδυασμών και στην Εικόνα 3.5 για τη συσχέτιση με τις διαφορές ιδιοσυχνοτήτων, ενώ ενίοτε γίνεται παράλληλη ανάπτυξη του ίδιου μοντέλου σε πολλαπλά λογισμικά για τον εντοπισμό τυχόν αποκλίσεων στους αλγόριθμους σύγκλισης. Στη συνέχεια, εξετάζεται η δυνατότητα πρόβλεψης ρωγμών μέσω προσομοιώσεων μη γραμμικής φύσεως (time-history, pushover) με τη χρήση κατάλληλων νόμων αστοχίας (damage plasticity) [2, 10, 25], δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην ακρίβεια των ιδιοτήτων αντοχής και δυσκαμψίας της λιθοδομής των Νεωρίων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εμπλουτιστεί με πραγματικές ή κλιμακωμένες (scaled) σεισμικές καταγραφές από διάφορες βάσεις δεδομένων (όπως οι σεισμοί του Πίνακα 3.1) [2, 38, 39], ελέγχοντας πώς συμπεριφέρεται το μοντέλο υπό διαφορετικά προφίλ διεγέρσεων.

Combinations with MAC>0.3

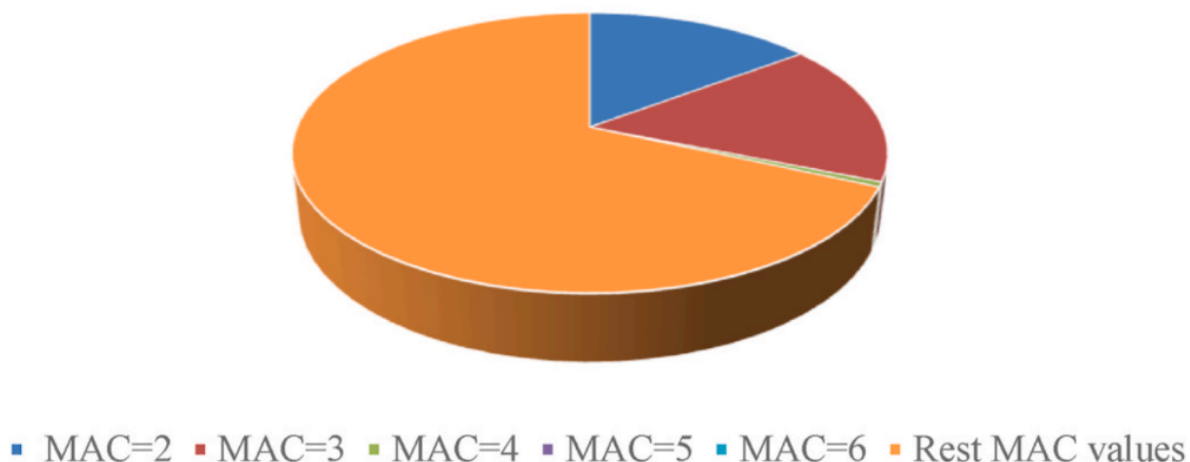


Figure 3.4: Προσδιορισμός επικρατούντων συνδυασμών με MAC (Modal Assurance Criterion). Ποσοστό περιπτώσεων με 2, 3 κ.λπ. τιμές MAC μεγαλύτερες από το κατώτατο όριο (πιθανώς από [1]).

Εφόσον η μοντελοποίηση αποδεικνύεται εύρωστη ως προς την πρόβλεψη τόσο των δυναμικών χαρακτηριστικών όσο και των πιθανολογούμενων ρωγμών, το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την ενσωμάτωσή της σε μια υποδομή Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin) [81, 82]. Εκεί, τα δεδομένα από τους αισθητήρες ενημερώνουν σε πραγματικό ή ταχτά χρονικά διαστήματα το υπολογιστικό μοντέλο [66], το οποίο στη συνέχεια ανατροφοδοτεί τον χρήστη με εκτιμήσεις για τα επίπεδα τάσεων και παραμορφώσεων, επισημαίνοντας πιθανές αποκλίσεις ή επερχόμενους κινδύνους [90]. Εάν οι διαφορές με τις μετρήσεις είναι σημαντικές, ακολουθείται επαναβαθμονόμηση των υλικών παραμέτρων ή των συνοριακών συνθηκών [52, 47, 78]. Με τον τρόπο αυτό, διαμορφώνεται μια δυναμική διαδικασία πρόγνωσης και διάγνωσης βλαβών [87], η οποία επιδιώκεται να λειτουργεί συνεχώς και αυτοματοποιημένα σε πραγματικά περιβάλλοντα.

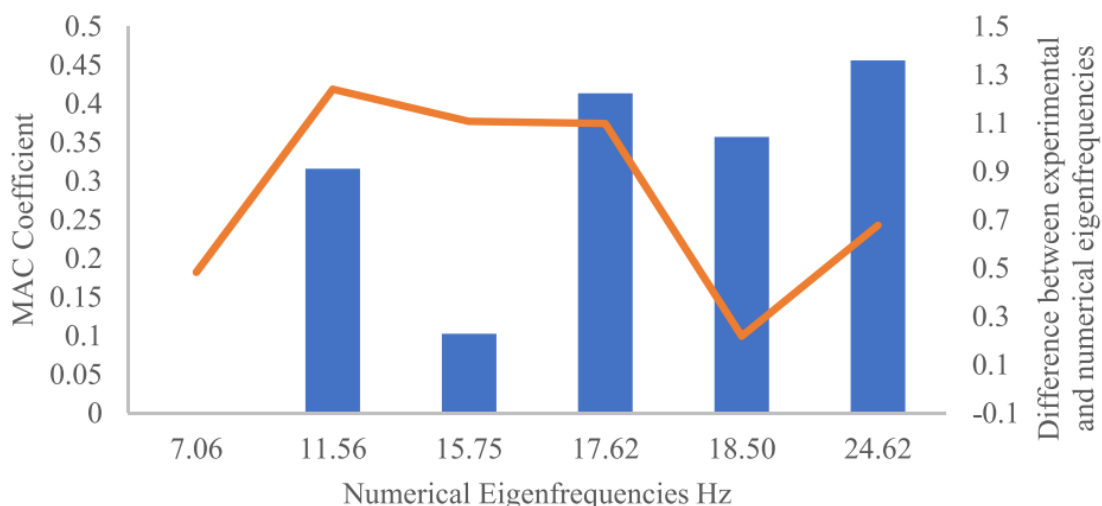


Figure 3.5: Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή MAC (μπλε μπάρα) και της διαφοράς μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών ιδιοσυχνοτήτων (πορτοκαλί γραμμή) με αριθμητικές ιδιοσυχνότητες (πιθανώς από [1]).

Συνοψίζοντας, η προτεινόμενη προσέγγιση περιλαμβάνει την πιστή αναπαράσταση της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων του μνημείου σε ένα αναλυτικό FEM μοντέλο [1], τη μετέπειτα παραγωγή μειωμένων εκδόσεων

που επιτρέπουν ταχεία εκτέλεση και αλληλεπίδραση με ζωντανά δεδομένα [74, 90], τη χρήση αισθητήρων και αυτόματων ροών επικαιροποίησης [81], καθώς και μια διαδικασία συνεχούς επικύρωσης μέσα από σειρές ελέγχων (ιδιομορφών, δυναμικής απόκρισης, μη γραμμικών σεναρίων) [2, 41] και σύγκριση με επιτόπιες μετρήσεις [52]. Αυτή η ολοκληρωμένη στρατηγική μπορεί να αποδειχθεί καθοριστική για τη συντήρηση και την αποκατάσταση λιθόκτιστων κατασκευών μεγάλης ιστορικής αξίας [22, 23], επιτρέποντας μια αρτιότερη λήψη αποφάσεων με βάση επικαιροποιημένες υπολογιστικές προβλέψεις [6].

Chapter 4

Υπολογισμοί

4.1 Ανάλυση του Κώδικα Εκπαίδευσης (Training Script)

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία του κώδικα εκπαίδευσης, με εστίαση στον τρόπο με τον οποίο ενσωματώνει δεδομένα χρονοσειρών από σεισμικές ή άλλες δυναμικές μετρήσεις, εξάγει εξελιγμένα χαρακτηριστικά, και καταλήγει στην εκπαίδευση μοντέλων ARMAX. Αρχικά, εισάγονται οι απαραίτητες βιβλιοθήκες, καταπνίγονται προειδοποιήσεις και δηλώνεται η χρήση της κλάσης SARIMAX για την υλοποίηση των ARMAX μοντέλων:

```
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 from scipy.stats import skew, kurtosis
4 from scipy.signal import welch
5 from sklearn.model_selection import TimeSeriesSplit, train_test_split
6 from sklearn.preprocessing import StandardScaler
7 from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
8 from joblib import dump
9 import warnings
10 import pickle
11 warnings.filterwarnings('ignore') # Suppress warnings for cleaner output
12
13 # Import SARIMAX for ARMAX modeling
14 from statsmodels.tsa.statespace.sarimax import SARIMAX
```

Η παραπάνω ενότητα δηλώνει την πρόθεση χρήσης εργαλείων στατιστικής μοντελοποίησης, με statsmodels.tsa.statespace.sarimax ως τον πυρήνα που επιτρέπει τη διαχείριση τόσο αυτοπαλινδρομικών όρων όσο και εξωγενών μεταβλητών. Επιπλέον, η επιλογή της κλάσης warnings.filterwarnings('ignore') εξυπηρετεί τη βελτίωση της αναγνωσιμότητας της εξόδου, καθώς αποτρέπει την εμφάνιση δευτερευουσών προειδοποιήσεων που δεν επηρεάζουν την ουσία της εκτέλεσης.

Στη συνέχεια, ο κώδικας περιλαμβάνει συναρτήσεις που χειρίζονται τη φόρτωση των δεδομένων και την αναμόρφωση της δομής των στηλών, δεδομένου ότι τα αρχεία Excel έχουν συχνά πολυεπίπεδες κεφαλίδες:

```
1 def load_data(file_path):
2     """
3     Load input and output data from Excel files with multi-level headers.
4     """
5     input_data = pd.read_excel(file_path, sheet_name='Input', header=[0, 1])
6     output_data = pd.read_excel(file_path, sheet_name='Output', header=[0, 1])
7
8     if input_data.index.name == 'Period' or input_data.index.name is not None:
9         input_data.reset_index(inplace=True)
10    if output_data.index.name == 'Period' or output_data.index.name is not None:
11        output_data.reset_index(inplace=True)
12
13    return input_data, output_data
14
15 def flatten_columns(df):
16     """
17     Flatten multi-level column headers into single-level by joining with '_'.
18     """
19    if isinstance(df.columns, pd.MultiIndex):
20        df.columns = ['_'.join(map(str, col)).strip() for col in df.columns.values]
21    else:
22        df.columns = df.columns.astype(str)
23    return df
```


Εδώ, η `load_data` αναλαμβάνει την ανάγνωση δύο Sheet (Input και Output), ενώ η `flatten_columns` μετατρέπει τις πολυεπίπεδες κεφαλίδες σε μονοεπίπεδες. Αυτό διευκολύνει σημαντικά τη διαχείριση των δεδομένων, επιτρέποντας την αναφορά στα πεδία μέσω ενός απλού string αντί για πολύπλοκες ιεραρχικές δομές.

Ένα κρίσιμο στάδιο είναι η εξαγωγή εξελιγμένων χαρακτηριστικών. Η συνάρτηση που ακολουθεί εξετάζει κάθε στήλη δεδομένων όπου η ονομασία περιλαμβάνει `Acc`, πράγμα που σηματοδοτεί δεδομένα επιτάχυνσης, και υπολογίζει τόσο στατιστικούς δείκτες όσο και φασματικές ιδιότητες μέσω της μεθόδου `Welch`:

```

1  def extract_features(input_data):
2      """
3      Extract enhanced statistical and frequency-domain features from the input data.
4      """
5      features = {}
6      for col in input_data.columns:
7          if 'Acc' in col:
8              data = input_data[col].dropna().values
9              if len(data) == 0:
10                 continue
11                 features[f'{col}_mean'] = np.mean(data)
12                 features[f'{col}_std'] = np.std(data)
13                 features[f'{col}_max'] = np.max(data)
14                 features[f'{col}_min'] = np.min(data)
15                 features[f'{col}_skew'] = skew(data)
16                 features[f'{col}_kurtosis'] = kurtosis(data)
17                 freqs, psd = welch(data, nperseg=min(256, len(data)))
18                 psd_sum = psd.sum()
19                 if psd_sum == 0:
20                     psd_sum = 1e-10
21                 psd /= psd_sum
22                 features[f'{col}_spectral_entropy'] = -np.sum(psd * np.log(psd + 1e-10))
23                 features[f'{col}_spectral_centroid'] = np.sum(freqs * psd)
24                 features[f'{col}_spectral_bandwidth'] = np.sqrt(np.sum(((freqs - features[f'{col}_spectral_centroid']) ** 2)
25                     ↪ * psd))
26                 for window in [5, 10, 15]:
27                     if len(data) >= window:
28                         features[f'{col}_rolling_mean_{window}'] = pd.Series(data).rolling(window=window).mean().iloc[-1]
29                         features[f'{col}_rolling_std_{window}'] = pd.Series(data).rolling(window=window).std().iloc[-1]
30
31     return pd.Series(features)

```

Ο συνδυασμός στατιστικών (mean, std, skew, kurtosis) και φασματικών (spectral entropy, centroid, bandwidth) χαρακτηριστικών επιτρέπει την πληρέστερη αποτύπωση της δυναμικής συμπεριφοράς των καταγραφών επιτάχυνσης. Οι κυλιόμενοι δείκτες (rolling mean, rolling std) υπολογίζονται για διαφορετικά μεγέθη παραθύρων, καλύπτοντας έτσι βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες τάσεις εντός του σήματος.

Η επιλογή των μεγεθών 5, 10 και 15 για τα κυλιόμενα παράθυρα αποτέλεσε μια στοχευμένη μεθοδολογική απόφαση. Αναγνωρίστηκε ότι η δυναμική του σεισμικού σήματος εκτυλίσσεται σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες, και κρίθηκε σκόπιμο να εφοδιαστεί το μοντέλο με την ικανότητα να 'βλέπει' αυτές τις διαφορετικές όψεις. Συγκεκριμένα, το μικρό παράθυρο των 5 σημείων είναι εξαιρετικά ευαίσθητο· συλλαμβάνει τις απότομες, βραχύβιες αλλαγές, αν και φέρει τον κίνδυνο να επηρεάζεται και από τον θόρυβο υψηλής συχνότητας. Ανεβαίνοντας στο παράθυρο των 10 σημείων, αποκτάται μια πιο σταθερή εικόνα των βραχυπρόθεσμων έως μεσοπρόθεσμων τάσεων, εξομαλύνοντας κάπως τις ακραίες στιγμιαίες τιμές. Τέλος, το παράθυρο των 15 σημείων προσφέρει μια ακόμη πιο 'φιλτραρισμένη' ματιά, εστιάζοντας σε ελαφρώς πιο μακροπρόθεσμες εξελίξεις του σήματος. Η στρατηγική, λοιπόν, ήταν να προσφερθεί στο μοντέλο ένα πλούσιο, πολυεπίπεδο σύνολο χαρακτηριστικών, συνδυάζοντας την αμεσότητα των γρήγορων αλλαγών με τη σταθερότητα των πιο αργών τάσεων.

Φυσικά, διερευνήθηκαν και οι συνέπειες εναλλακτικών επιλογών. Η υιοθέτηση ακόμη μικρότερων παραθύρων (π.χ., 2 ή 3) θα αύξανε μεν την ευαισθησία στα μεταβατικά φαινόμενα, αλλά με το πιθανό κόστος της εισαγωγής ασταθών χαρακτηριστικών, κάνοντας δύσκολο για το μοντέλο να διακρίνει το πραγματικό σήμα από τον τυχαίο θόρυβο. Από την άλλη, η στροφή προς σημαντικά μεγαλύτερα παράθυρα (π.χ., 20, 30 ή περισσότερα) θα παρείχε πιο στιβαρά, εξομαλυσμένα χαρακτηριστικά, ιδανικά για την απομόνωση μακροπρόθεσμων τάσεων. Ωστόσο, αυτό θα γινόταν εις βάρος της ταχύτητας ανίχνευσης: κρίσιμες, γρήγορες δυναμικές αλλαγές στο σήμα θα μπορούσαν να 'θαφτούν' μέσα στον μέσο όρο ή να εντοπιστούν με καθυστέρηση. Επιπλέον, μεγαλύτερα παράθυρα θέτουν και πρακτικούς περιορισμούς, απαιτώντας μεγαλύτερα διαθέσιμα τμήματα δεδομένων.

Επόμενο βήμα είναι η προετοιμασία των δεδομένων σε επίπεδο dataset, όπου εκτελείται η λογική της δημιουργίας «χρονοπαράθυρων» (sliding windows) και η προσθήκη υστερημένων (lagged) τιμών για τις μεταβλητές-στόχους:

```

1 def prepare_data(files, window_size=20):
2     """
3     Prepare the dataset by extracting features and targets at each time point.
4     """
5     feature_list = []
6     target_list = []
7
8     for key in files.keys():
9         input_data, output_data = load_data(files[key])
10        input_data = flatten_columns(input_data)
11        output_data = flatten_columns(output_data)
12        min_length = min(len(input_data), len(output_data))
13        input_data = input_data.iloc[:min_length]
14        output_data = output_data.iloc[:min_length]
15        data = pd.concat([input_data, output_data], axis=1)
16        window_count = 0
17        for i in range(window_size, len(data)):
18            window_data = data.iloc[i - window_size:i]
19            features = extract_features(window_data[input_data.columns])
20            for lag in range(1, 6):
21                for var in ['X', 'Y', 'Z']:
22                    value_col = f'{var}_Value'
23                    if value_col in output_data.columns:
24                        if i - lag >= 0:
25                            features[f'{value_col}_lag{lag}'] = data.iloc[i - lag][value_col]
26                        else:
27                            features[f'{value_col}_lag{lag}'] = np.nan
28            feature_list.append(features)
29            targets = {}
30            for var in ['X', 'Y', 'Z']:
31                value_col = f'{var}_Value'
32                if value_col in output_data.columns:
33                    target_value = data.iloc[i][value_col]
34                    targets[var] = target_value
35            else:
36                targets[var] = np.nan
37            target_list.append(targets)
38            window_count += 1
39        features_df = pd.DataFrame(feature_list)
40        targets_df = pd.DataFrame(target_list)
41        # ...

```

Στο απόσπασμα διακρίνεται ότι, για κάθε αρχείο που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σεισμικό ή δυναμικό γεγονός, ο κώδικας ορίζει ένα παράθυρο μεγέθους window_size, μέσα στο οποίο εξάγει χαρακτηριστικά και αποθηκεύει στη συνέχεια τις τιμές X, Y, Z για το τρέχον χρονικό σημείο. Επιπλέον, η εισαγωγή lagged όρων έως και 5 βήματα πίσω (lag1, lag2, ..., lag5) επιτρέπει στο ARMAX μοντέλο να συμπεριλάβει ιστορική πληροφορία των μεταβλητών-στόχων ως εξωγενείς μεταβλητές.

Αφού οι πίνακες features_df και targets_df συμπληρωθούν, ακολουθεί συμπλήρωση των κενών (NaN) τιμών με προωθητική (ffill) και οπισθοχωρητική (bfill) μέθοδο, ώστε να διατηρηθεί μια συνεκτική χρονοσειρά χωρίς κενά. Σε αυτό το σημείο, ολοκληρώνεται η διαδικασία κατασκευής του dataset.

Η εκπαίδευση ενός μοντέλου ARMAX για μία μεταβλητή-στόχο περιγράφεται στην ακόλουθη συνάρτηση:

```

1 def train_evaluate_armax_model(X_train, y_train, X_val, y_val, target_variable):
2     """
3     Train and evaluate an ARMAX model for a single target variable.
4     """
5     endog = y_train[target_variable]
6     exog = X_train
7     # ...
8     model = SARIMAX(endog, exog=exog, order=(1, 0, 1),
9                     enforce_stationarity=False, enforce_invertibility=False)
10    model_fit = model.fit(dispatch=False)
11    # ...

```

Η παράμετρος order=(1, 0, 1) δηλώνει ότι επιλέγουμε έναν αυτοπαλινδρομικό όρο πρώτης τάξης και έναν όρο κινούμενου μέσου, ενώ τα exog=exog υποδεικνύουν ότι η ARMA δομή συμπληρώνεται με εξωγενείς μεταβλητές (τους lagged όρους ή άλλα χαρακτηριστικά). Παράλληλα, η απενεργοποίηση της «στασιμότητας» και «αντιστρεψιμότητας» (enforce_stationarity=False, enforce_invertibility=False) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη

σε δομές που δεν εγγυώνται τυπικούς στατιστικούς περιορισμούς.

Τέλος, το `main()` ενορχηστρώνει τα βήματα φόρτωσης αρχείων, δημιουργίας χαρακτηριστικών, διαχωρισμού σε σετ εκπαίδευσης/ελέγχου και εκπαίδευσης μοντέλων, αποθηκεύοντας παράλληλα τις κλίμακες (`scaler`) και τα εκπαιδευμένα μοντέλα σε αρχεία `pkl` ή `joblib`:

```
1 def main():
2     files = {
3         '1TS.ThessalyEarthquake': '1TS.ThessalyEarthquake.xlsx',
4         # ...
5     }
6     features_df, targets_df = prepare_data(files, window_size=20)
7     # ...
8     X_train_sub_scaled = ...
9     X_val_scaled = ...
10    evaluate_armax_models(X_train_sub_scaled, y_train_sub, X_val_scaled, y_val)
11    dump(scaler, 'scaler.joblib')
12    dump(X_train_sub.columns.tolist(), 'feature_columns.joblib')
```

Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός κώδικα προσφέρει μια συνεκτική ροή που ξεκινά από πολυεπίπεδα δεδομένα, περνά από μια απαιτητική διαδικασία εξαγωγής στατιστικών και φασματικών χαρακτηριστικών, και καταλήγει σε ένα συνεκτικό σύνολο ARMAX μοντέλων που δύνανται να προβλέψουν μελλοντική συμπεριφορά των μεταβλητών-στόχων (X , Y , Z).

4.2 Ανάλυση του Κώδικα Δοκιμής (Testing Script)

Η επόμενη ενότητα περιγράφει τον κώδικα δοκιμής, ο οποίος αξιοποιεί τα ήδη εκπαιδευμένα μοντέλα ή δημιουργεί νέα με τις ίδιες προδιαγραφές, για να προβλέψει τις τιμές X , Y , Z σε αρχεία δεδομένων που δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπαίδευση. Στην αρχή, εισάγονται ξανά βιβλιοθήκες αντίστοιχες του κώδικα εκπαίδευσης, ενώ φορτώνεται ο `StandardScaler` και η λίστα χαρακτηριστικών από τα αποθηκευμένα αρχεία `scaler.joblib` και `feature_columns.joblib`:

```
1 def main():
2     scaler = load('scaler.joblib')
3     feature_columns = load('feature_columns.joblib')
4     earthquake_files = ['6TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx', ...]
5     for earthquake_file in earthquake_files:
6         print(f"\nProcessing earthquake data from {earthquake_file}...")
7         new_input_data = pd.read_excel(earthquake_file, sheet_name='Input', header=[0, 1])
8         new_output_data = pd.read_excel(earthquake_file, sheet_name='Output', header=[0, 1])
9         # ...
```

Η ίδια λογική πολυεπίπεδης κεφαλίδας αντιμετωπίζεται με την ίδια συνάρτηση `flatten_columns`, επιτυγχάνοντας ταύτιση δομής με τη φάση εκπαίδευσης. Κατόπιν, υλοποιείται η εξαγωγή χαρακτηριστικών στο παράθυρο που ορίστηκε νωρίτερα (`window_size=20`), ακολουθεί το ίδιο μοτίβο υπολογισμού στατιστικών, φασματικών και κυλιόμενων χαρακτηριστικών, όπως και προσθήκη `lagged` μεταβλητών. Η πρωταρχική διαφορά σε σχέση με το στάδιο εκπαίδευσης είναι ότι, αντί να εκπαιδευτεί εκ νέου ένα μοντέλο για κάθε μεταβλητή-στόχο, μπορεί είτε να δημιουργηθεί μοντέλο με ίδιες προδιαγραφές (ARMAX (1,0,1)) είτε να γίνει απευθείας φόρτωση ενός αποθηκευμένου μοντέλου. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση, το `model.fit` εκτελείται σε αυτή τη φάση, αξιοποιώντας τα νέα δεδομένα ως αρχικές συνθήκες, και κατόπιν παράγονται οι προβλέψεις για όλη τη χρονοσειρά:

```
1 model = SARIMAX(endog, exog=exog, order=(1, 0, 1),
2                 enforce_stationarity=False, enforce_invertibility=False)
3 model_fit = model.fit(disp=False)
4 y_pred = model_fit.predict(start=0, end=len(endog) - 1, exog=exog)
5 armax_predictions[target_variable] = y_pred.values
```

Ο λόγος για τον οποίο ο κώδικας δοκιμής επιλέγει εκ νέου την εφαρμογή του `SARIMAX(...).fit(...)` αντί να φορτώσει απευθείας το εκπαιδευμένο μοντέλο έγκειται στην πιθανή ανάγκη βραχυπρόθεσμης προσαρμογής των παραμέτρων στις νέες συνθήκες δεδομένων. Ωστόσο, ακόμα και αν υπήρχε φορτωμένο μοντέλο, θα ήταν απαραίτητος ο μετασχηματισμός (`transform`) των χαρακτηριστικών με τον ίδιο `scaler` και η αναπροσαρμογή ορισμένων εσωτερικών καταστάσεων (`states`) για την παραγωγή προβλέψεων σε μια νέα

χρονοσειρά.

Στη συνέχεια, ο κώδικας εκτυπώνει μετρικές σφάλματος (RMSE, MAE, R^2) σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές, και υπολογίζει τα υπολείμματα (residuals), προβάλλοντάς τα σε γραφήματα με την πάροδο του χρόνου:

```
1 rmse_armax = np.sqrt(mean_squared_error(y_true, y_pred_armax))
2 mae_armax = mean_absolute_error(y_true, y_pred_armax)
3 r2_armax = r2_score(y_true, y_pred_armax, multioutput='uniform_average')
4
5 residuals_armax = actual_targets_df - armax_predictions
```

Οι συγκεκριμένες μετρικές επιτρέπουν την αντικειμενική αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου, ενώ η απεικόνιση των υπολειμμάτων (μικρή ή μεγάλη διασπορά, τάσεις συστηματικού σφάλματος) δίνει επιπλέον πληροφόρηση για τυχόν όρους που δεν έχουν ληφθεί υπόψη στο μοντέλο. Έτσι, η ολοκληρωμένη ροή που καθορίζεται στον κώδικα δοκιμής επιβεβαιώνει την ικανότητα ή μη του συστήματος να «γενικεύσει» σε νέα σεισμικά γεγονότα.

Συνολικά, ο διαχωρισμός του κώδικα σε στάδιο εκπαίδευσης και στάδιο δοκιμής επιτρέπει μια στιβαρή μεθοδολογική προσέγγιση. Ο κώδικας εκπαίδευσης δημιουργεί και αποθηκεύει τις στατιστικές κλίμακες και τα μοντέλα, ενώ ο κώδικας δοκιμής εστιάζει στην αξιοποίηση αυτών των πόρων σε διαφορετικά, μη ορατά κατά την εκπαίδευση σεισμικά αρχεία, επαληθεύοντας την αξιοπιστία και τη γενίκευσή τους. Αυτή η πρακτική ευθυγραμμίζεται με τις σύγχρονες τεχνικές χρονοσειρών και ανάλυσης δεδομένων αισθητήρων, δίνοντας μια δυναμική βάση για περαιτέρω επέκταση σε πραγματικό χρόνο (real-time) ή σε πιο σύνθετα περιβάλλοντα βέλτιστης πρόβλεψης.

Chapter 5

Αποτελέσματα και Συζήτηση

5.1 Αποτελέσματα από το Στάδιο Εκπαίδευσης

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται λεπτομερώς οι αριθμητικές ενδείξεις που προέκυψαν από την εκτέλεση του κώδικα εκπαίδευσης (training script), καθώς και η ερμηνεία τους σε αυστηρά ακαδημαϊκό πλαίσιο. Η διεξοδική επισκόπηση των παραγόμενων στατιστικών στοιχείων καθίσταται απαραίτητη, προκειμένου να κατανοήσουμε τη δυναμική και την ποιότητα των μοντέλων ARMAX που εκτιμήθηκαν για την πρόβλεψη των τριών μεταβλητών-στόχων (X, Y, Z).

5.1.1 Ανάλυση Μηνυμάτων και Διαθεσιμότητας “Παραθύρων”

Κατά την εκτέλεση του κώδικα εκπαίδευσης, καταγράφηκαν αναλυτικές αναφορές σχετικά με τον αριθμό των επεξεργασμένων χρονικών “παραθύρων” (sliding windows) για κάθε ένα από τα αρχεία σεισμικών δεδομένων. Τα στοιχεία αυτά παρατίθενται ενδεικτικά στο ακόλουθο απόσπασμα:

Ο μηχανισμός “παραθύρων” αποτελεί κεντρικό τμήμα της μεθοδολογίας, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή των χρονοσειρών σε υποσύνολα δεδομένων, στα οποία εφαρμόζεται η εξαγωγή στατιστικών και φασματικών χαρακτηριστικών (feature extraction). Καθένα από τα παραπάνω αρχεία ανταποκρίνεται σε διαφορετική καταγραφή σεισμικού γεγονότος ή δυναμικού φορτίου (βλ. Πίνακα 3.1), και το πλήθος των διαθέσιμων παραθύρων εξαρτάται άμεσα από τη συνολική διάρκεια του σήματος και τη ρύθμιση του window size. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1, το εύρος της συνολικής διαθεσιμότητας δεδομένων ποικίλλει σημαντικά:

Αρχείο	Συνολικά Παράθυρα	Σημείωση
1TS.ThessalyEarthquake.xlsx	81	Limited data
2TS.ThessalyEarthquake.xlsx	101	-
3TS.Northridge_CaliforniaEarthquake.xlsx	75	Limited data
4TS.Northridge_CaliforniaEarthquake.xlsx	61	Limited data
5TS.Irpinia_ItalyEarthquake.xlsx	60	Limited data

Table 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον αριθμό επεξεργασμένων “παραθύρων” ανά αρχείο στο στάδιο εκπαίδευσης (Αρχεία σεισμών βάσει Πίνακα 3.1).

Αρχεία όπως το *1TS.ThessalyEarthquake.xlsx* ή το *4TS.Northridge_CaliforniaEarthquake.xlsx* παρουσιάζουν εμφανώς μικρότερο αριθμό χρονικών παραθύρων, γεγονός που αντανακλά την ενδεχόμενη συντομότερη διάρκεια των καταγραφών ή περιόδους του σήματος που δεν πληρούν τα κριτήρια δημιουργίας πλήρων παραθύρων. Από ακαδημαϊκή σκοπιά, η ύπαρξη περιορισμένου αριθμού δειγμάτων δύναται να επηρεάσει δυσμενώς τη διαδικασία εκπαίδευσης στατιστικών μοντέλων (όπως τα ARMAX) [78], καθώς οι διαδικασίες βελτιστοποίησης στηρίζονται στην επαρκή ποσότητα δεδομένων για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου.

5.1.2 Μετρικές Αξιολόγησης Μοντέλων ARMAX (Validation Set)

Η επόμενη κρίσιμη πληροφορία αφορά την ποιότητα των μοντέλων ARMAX που προκύπτουν κατά τη φάση εκπαίδευσης. Κάθε μοντέλο στοχεύει στην πρόβλεψη μιας από τις τρεις μεταβλητές-στόχους (X, Y, Z). Στο κάτωθι απόσπασμα, παρουσιάζονται οι RMSE (Root Mean Squared Error) και R^2 (coefficient of determination), όπως εκτιμήθηκαν στο validation set:

Τα αποτελέσματα αυτά συνδυάζονται με την εμφάνιση ConvergenceWarnings, τα οποία υποδηλώνουν ότι η βελτιστοποίηση της πιθανοφάνειας στο πλαίσιο του ARMAX ενδέχεται να μην έχει επιτύχει πλήρη σύγκλιση [78]. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές RMSE και R^2 :

Μοντέλο	Validation RMSE	Validation R^2 Score	Σημείωση
ARMAX (X)	0.6664	-0.1042	ConvergenceWarning
ARMAX (Y)	0.4178	-0.2932	ConvergenceWarning
ARMAX (Z)	0.1471	-3.2783	—

Table 5.2: Βασικές μετρικές αξιολόγησης των μοντέλων ARMAX (σετ επικύρωσης).

Η υπόθεση ενός negative R^2 σε δύο από τα τρία μοντέλα προκαλεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ο αρνητικός συντελεστής R^2 επισημαίνει ότι, κατά την εκτίμηση στο validation set, τα μοντέλα αποδίδουν δυσμενέστερα από μια απλή υπόθεση πρόβλεψης του μέσου όρου. Σε ακαδημαϊκό επίπεδο, η εμφάνιση αρνητικού R^2 δεν σημαίνει απαραίτητα λανθασμένη μεθοδολογία, αλλά ενδέχεται να οφείλεται σε [78]:

1. **Περιορισμένη ποσότητα δεδομένων:** τα αρχεία με λίγους “παρθύρους” δεν επαρκούν για να προκύψει ένα στατιστικά αξιόπιστο μοντέλο, ιδίως όταν η δυναμική συμπεριφορά είναι σύνθετη.
2. **Ακαταλληλότητα υπερ-παραμέτρων:** η τάξη (1, 0, 1) ενδέχεται να μην επαρκεί για το εύρος των παρόντων γεγονότων ή να απαιτούνται διαφορετικοί όροι καθυστέρησης (lags) για να περιγραφεί η δυναμική σχέση μεταξύ εισόδων και εξόδων.
3. **Υψηλός θόρυβος:** αν σε ορισμένα αρχεία η πραγματική μέτρηση εμφανίζει μεγάλο βαθμό στοχαστικότητας ή χαμηλή αναλογία σήματος-προς-θόρυβο, η προσαρμογή ενός ARMAX μοντέλου δύναται να καταλήξει σε υψηλά σφάλματα και συνεπώς χαμηλό R^2 .

Ωστόσο, η τιμή του RMSE για το μοντέλο Z είναι αρκετά μικρή (0.1471), γεγονός που εγείρει περαιτέρω διερωτήσεις για τη φύση των δεδομένων. Συχνά, ένας πολύ “καλός” RMSE μπορεί να συνοδεύεται από αρνητικό R^2 , αν η διασπορά του validation set είναι μικρή και υπάρχουν λίγα ακραία σημεία που επηρεάζουν την τιμή του R^2 . Αντιθέτως, σε πιο πλούσια σύνολα δεδομένων, το R^2 μπορεί να παρουσιάζει τιμές που αποκλίνουν αισθητά από τις αναμενόμενες, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο τείνει να “χάνει” ορισμένες κρίσιμες μεταβολές στα δεδομένα επικύρωσης.

Τέλος, η εμφάνιση των ConvergenceWarnings υπογραμμίζει μια ιδιαίτερα συχνή κατάσταση σε μοντέλα βασισμένα σε maximum likelihood βελτιστοποίηση [78]: όταν τα δεδομένα δεν επαρκούν για να συμπληρώσουν πλήρως τις απαιτήσεις του μοντέλου ή όταν απαιτείται καλύτερη αρχικοποίηση παραμέτρων, η διαδικασία εύρεσης του παγκόσμιου μέγιστου της πιθανοφάνειας (likelihood) ενδέχεται να “κολλήσει” ή να μη βρει το βέλτιστο σημείο μέσα στον προβλεπόμενο αριθμό επαναλήψεων.

5.2 Αποτελέσματα από το Στάδιο Δοκιμής

Η δεύτερη φάση αξιολόγησης (testing) επικεντρώνεται σε νέα σεισμικά ή δυναμικά αρχεία που δεν συμμετείχαν καθόλου στην εκπαίδευση (βλ. Πίνακα 3.1, σεισμοί EQ.3 έως EQ.6). Η επιλογή αυτής της διακριτής φάσης εξυπηρετεί τη διερεύνηση της γενίκευσης του μοντέλου. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται, τόσο ως Error Metrics (RMSE, MAE, R^2) όσο και ως Residuals Summary, επιβεβαιώνουν σε σημαντικό βαθμό την ικανότητα του μοντέλου να αναπαράγει τις πραγματικές μετρήσεις με μικρό σφάλμα και υψηλό R^2 .

5.2.1 Συγκεντρωτικές Μετρικές Σφάλματος (Testing)

Ένας αντιπροσωπευτικός πίνακας σφαλμάτων (βλ. Πίνακα 5.3) αναδεικνύει την ακρίβεια των ARMAX μοντέλων σε ό,τι αφορά την πρόβλεψη των τριών μεταβλητών X, Y, Z σε σεισμούς όπως το *ArkalochoriEarthquake*, *WestChaniaEarthquake* ή *SamosEarthquake*.

5.2.2 Συμπεράσματα για την Απόδοση του ARMAX Μοντέλου στα δεδομένα του σεισμού στο Αρκαλοχώρι.

Αρχείο	RMSE	MAE	R ² Score
6TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx	0.0845	0.0573	0.9813
7TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx	0.0483	0.0317	0.9903
8TS.WestChaniaEarthquake.xlsx	0.0528	0.0330	0.9880
9TS.SamosEarthquake.xlsx	0.1846	0.1232	0.8832

Table 5.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σφαλμάτων για τα νέα αρχεία (στάδιο δοκιμής).

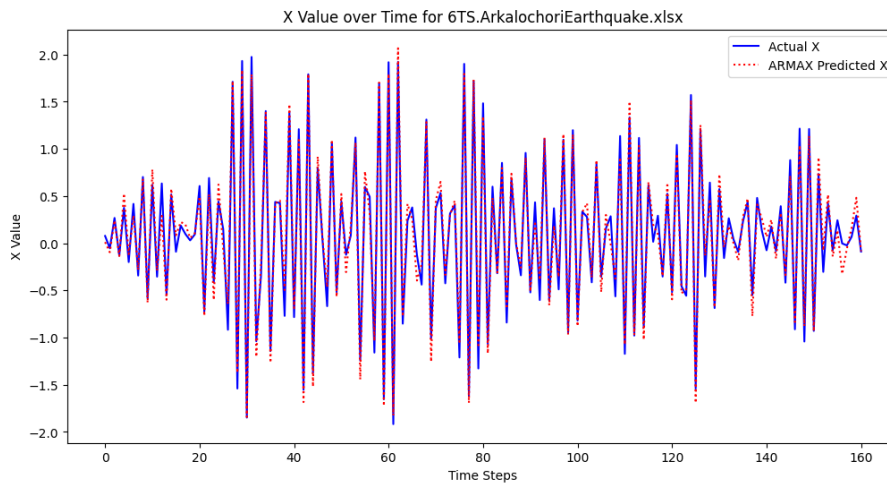


Figure 5.1: Χρονοσειρά τιμών για την τιμή X στο 6TS ArkalochoriEarthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) αποδίδει επιτυχώς τη γενική κυκλική φύση και τη συχνότητα της πραγματικής τιμής X (μπλε, συνεχή γραμμή), αλλά δυσκολεύεται στην ακριβή πρόβλεψη του πλάτους ορισμένων κορυφών και κοιλοτήτων, υποδεικνύοντας πιθανά σημεία για περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου.

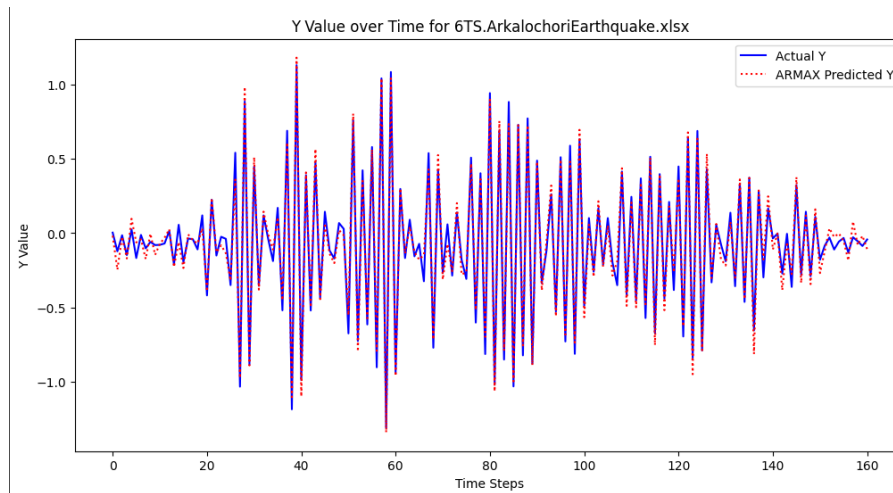


Figure 5.2: Χρονοσειρά τιμών για την τιμή Y στο 6TS ArkalochoriEarthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) αναπαράγει με επιτυχία τη συνολική τάση της πραγματικής τιμής Y (μπλε, συνεχή γραμμή) καθώς και τις μικρότερες, υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις, υποδεικνύοντας υψηλή ακρίβεια στην αναπαράσταση αυτής της διάστασης.

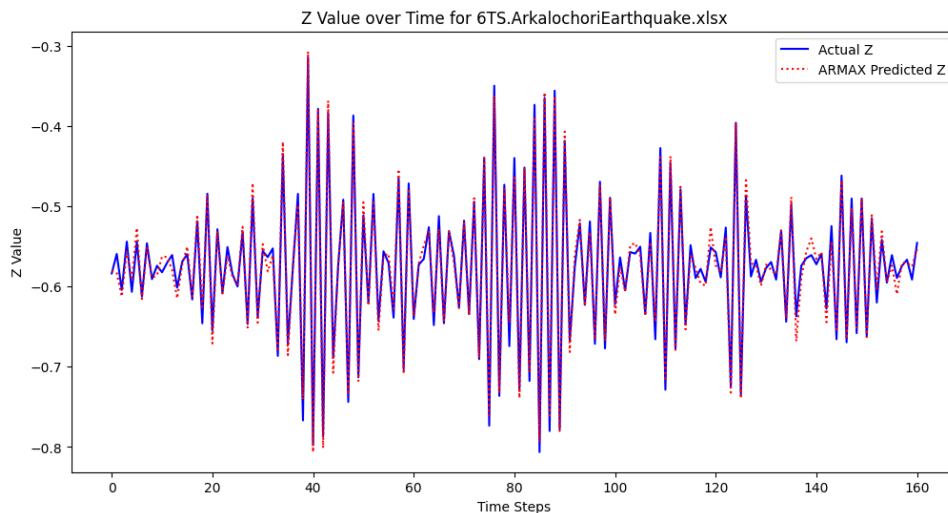


Figure 5.3: Χρονοσειρά τιμών για την τιμή Z στο 6TS ArkalochoriEarthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) καταγράφει με εξαιρετική ακρίβεια τόσο τη γενική τάση όσο και τις ταχείες, υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις της τιμής Z (μπλε, συνεχή γραμμή), αποδεικνύοντας την υψηλή προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου.

Η ανάλυση των χρονοσειρών των τιμών X , Y και Z από το σύνολο δεδομένων του 6TS.ArkalochoriEarthquake, σε σύγκριση με τις προβλέψεις του ARMAX μοντέλου, αποκάλυψε διαφοροποιημένα επίπεδα εφαρμογής ανά διάσταση. Συγκεκριμένα, για την τιμή X το μοντέλο παρουσιάζει μέτρια εφαρμογή, καθώς παρά το γεγονός ότι καταφέρνει να αποτυπώσει το περιοδικό μοτίβο, παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις με την υποεκτίμηση ορισμένων κορυφών και την υπερεκτίμηση κάποιων κοιλοτήτων, υποδεικνύοντας περιορισμένη ικανότητα να συλλαμβάνει πλήρως τις ακραίες δυναμικές και τα υψηλότερα συχνοτικά στοιχεία του σήματος. Από την άλλη πλευρά, για την τιμή Y το μοντέλο επιτυγχάνει εξαιρετική εφαρμογή, αφού οι προβλεπόμενες τιμές παρακολουθούν με μεγάλη ακρίβεια τις πραγματικές τιμές καθ' όλη τη διάρκεια της χρονοσειράς, αποτυπώνοντας τόσο τη γενική τάση όσο και τις μικρότερες, υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις. Ομοίως, για την τιμή Z το μοντέλο αναδεικνύει πολύ καλή εφαρμογή, καθώς καταφέρνει να αναπαράγει τόσο τη γενική τάση όσο και τις ταχείες διακυμάνσεις του σήματος, με μόνο ελάχιστες αποκλίσεις που μαρτυρούν την υψηλή ακρίβεια στις προβλέψεις για αυτή τη διάσταση. Συνολικά, το ARMAX μοντέλο παρουσιάζει σημαντικά καλύτερη απόδοση στην πρόβλεψη των τιμών Y και Z σε σχέση με την τιμή X , γεγονός που πιθανώς οφείλεται σε χαμηλότερα επίπεδα θορύβου ή σε πιο γραμμική σχέση των δεδομένων Y και Z με τις εισόδους του μοντέλου. Η συγκριτικά μειωμένη απόδοση για την τιμή X υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω

διερεύνηση και πιθανή υιοθέτηση εναλλακτικών προσεγγίσεων, όπως η ενσωμάτωση μη γραμμικών όρων ή η χρήση διαφορετικού μοντέλου, ώστε να συλληφθούν πλήρως οι δυναμικές ιδιότητες αυτής της μεταβλητής. Η διαφορά στην απόδοση μεταξύ των μεταβλητών υποδηλώνει ότι οι υποκείμενες φυσικές διεργασίες που διέπουν τις τιμές X , Y και Z παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, γεγονός που απαιτεί στοχευμένες προσεγγίσεις μοντελοποίησης για κάθε διάσταση.

5.2.3 Συμπεράσματα για τα δεδομένα του σεισμού στο Αρκαλοχώρι

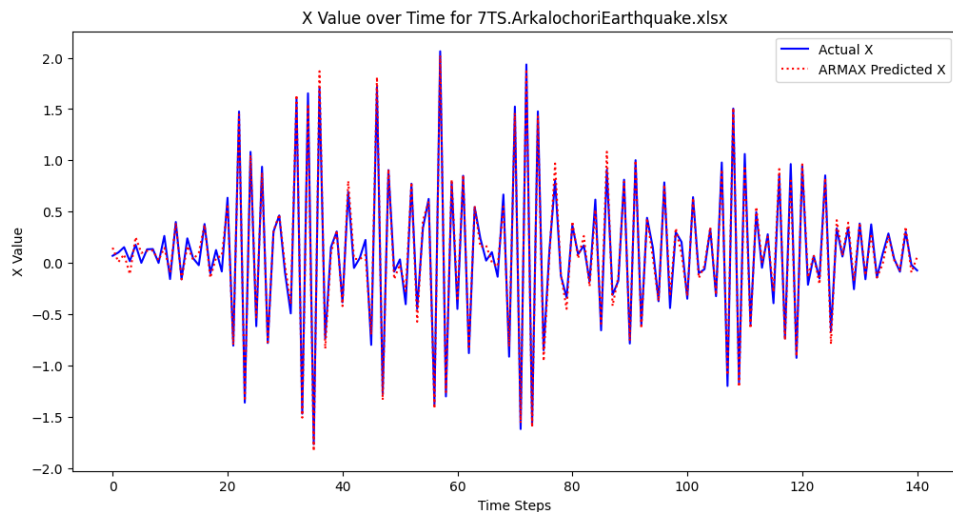


Figure 5.4: Χρονοσειρά για την τιμή X στο 7TS ArkalochoriEarthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) δυσκολεύεται να αναπαράγει με ακρίβεια τις διακυμάνσεις μεγάλου πλάτους που εμφανίζονται περίπου μεταξύ των βημάτων χρόνου 40 και 80, ενώ αποδίδει καλύτερα σε περιοχές με μικρότερες ταλαντώσεις.

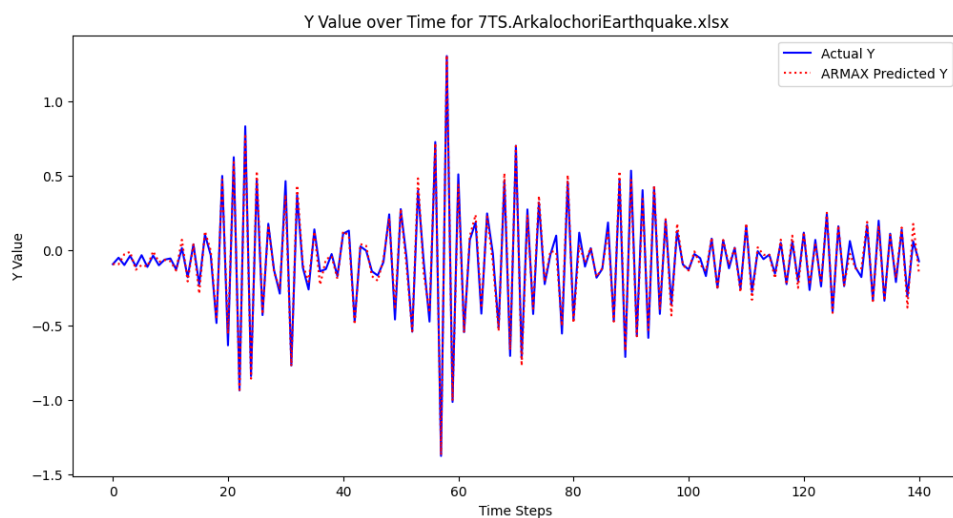


Figure 5.5: Χρονοσειρά για την τιμή Y στο 7TS ArkalochoriEarthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) καταγράφει επιτυχώς τις μεταβολές της τιμής Y σε όλες τις φάσεις του σεισμού, από την αρχική αύξηση μέχρι την περίοδο υψηλής δραστηριότητας (περίπου στα βήματα χρόνου 40–80) και την επακόλουθη υποχώρηση.

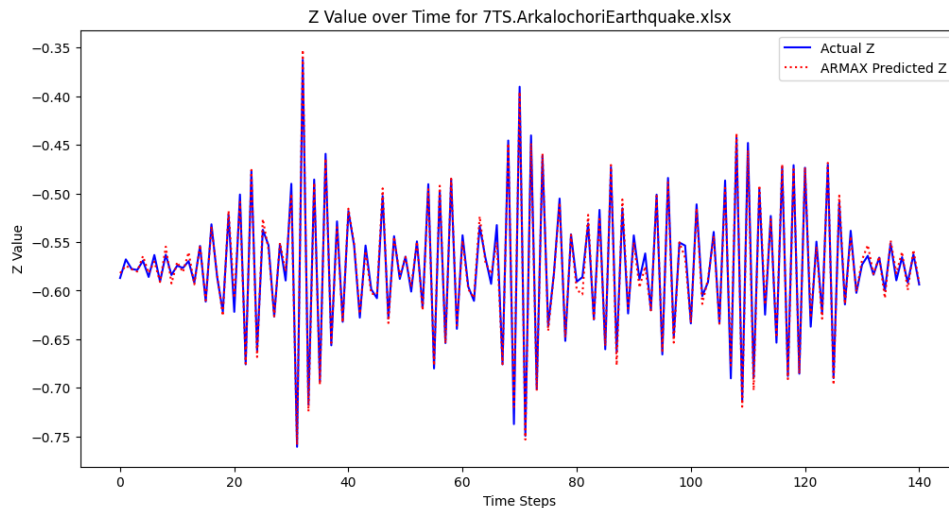


Figure 5.6: Χρονοσειρά για την τιμή Z στο 7TS ArkalochoriEarthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) καταγράφει με ακρίβεια τις υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις και τη γενική τάση των δεδομένων της τιμής Z (μπλε, συνεχή γραμμή), υποδεικνύοντας εξαιρετική εφαρμογή και προβλεπτική ικανότητα.

Στην ανάλυση της χρονοσειράς για το 7TS.ArkalochoriEarthquake, το ARMAX μοντέλο αποδεικνύει διαφοροποιημένη απόδοση ανάλογα με την διάσταση του σήματος. Συγκεκριμένα, για την τιμή X το μοντέλο δυσκολεύεται να αναπαραγάγει με ακρίβεια τις μεγάλες διακυμάνσεις που εμφανίζονται μεταξύ των βημάτων χρόνου 40 και 80, αν και καταφέρνει καλύτερα σε περιοχές με μικρότερες ταλαντώσεις. Αντιθέτως, για την τιμή Y το μοντέλο καταγράφει με εξαιρετική ακρίβεια τις μεταβολές, αποτυπώνοντας τόσο την αρχική αύξηση όσο και την περίοδο υψηλής δραστηριότητας και την επακόλουθη υποχώρηση. Επιπλέον, για την τιμή Z το μοντέλο επιδεικνύει πολύ καλή εφαρμογή, καταγράφοντας τόσο τις υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις όσο και τη γενική τάση του σήματος, γεγονός που υποδηλώνει υψηλή προβλεπτική ικανότητα. Συνολικά, τα αποτελέσματα για το 7TS δείχνουν ότι το ARMAX μοντέλο είναι ικανό να αποτυπώνει με μεγάλη ακρίβεια τις διακυμάνσεις στα δεδομένα Y και Z , ενώ παρουσιάζει προκλήσεις στην ακριβή μοντελοποίηση των μεγάλων διακυμάνσεων του X .

5.2.4 Συμπεράσματα για τα δεδομένα του σεισμού δυτικά των Χανίων

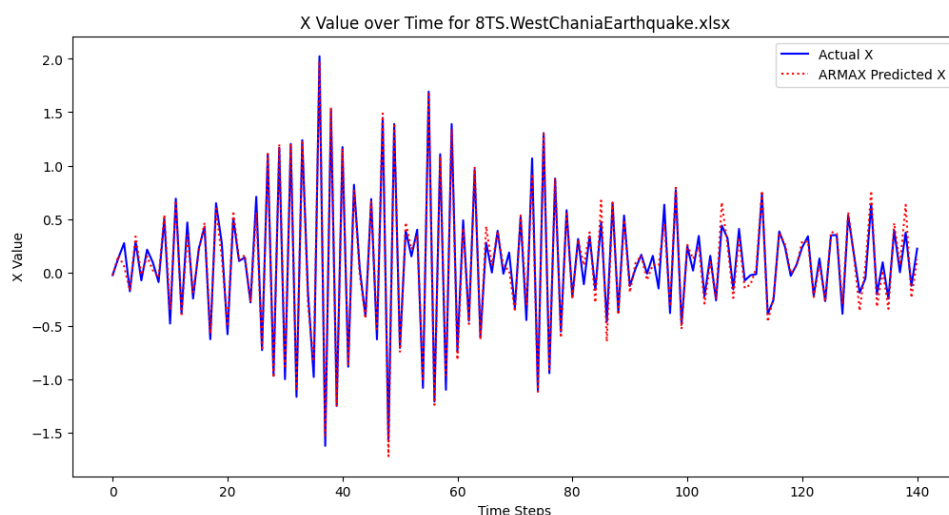


Figure 5.7: Χρονοσειρά για την τιμή X στο 8TS WestChania Earthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) παρουσιάζει ικανοποιητική εφαρμογή στην αναπαραγωγή της πραγματικής τιμής X (μπλε, συνεχή γραμμή), κυρίως στην καταγραφή της συχνότητας των ταλαντώσεων, αν και παρατηρούνται αποκλίσεις στο πλάτος στις πιο έντονες κορυφές.

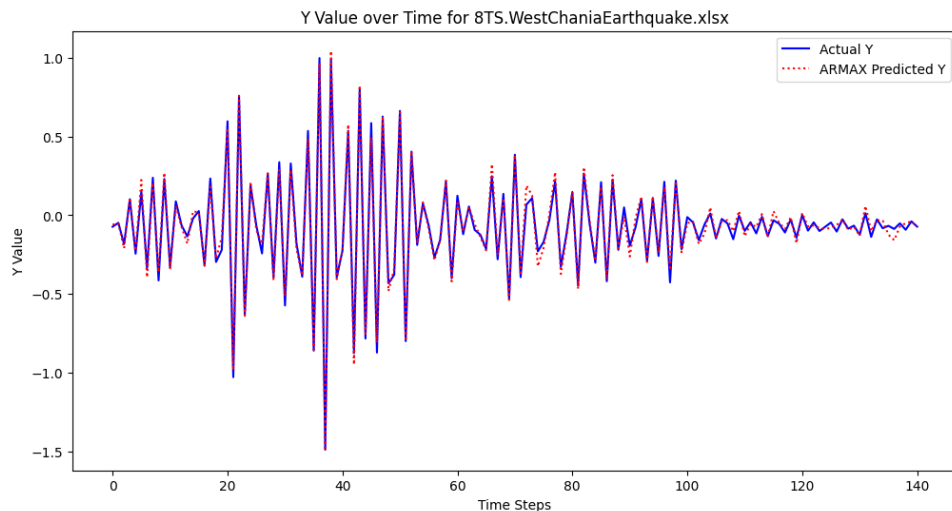


Figure 5.8: Χρονοσειρά για την τιμή Y στο 8TS WestChania Earthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) καταγράφει με επιτυχία τη συμπεριφορά της τιμής Y σε όλες τις φάσεις του σεισμού, αποδεικνύοντας σταθερή απόδοση.

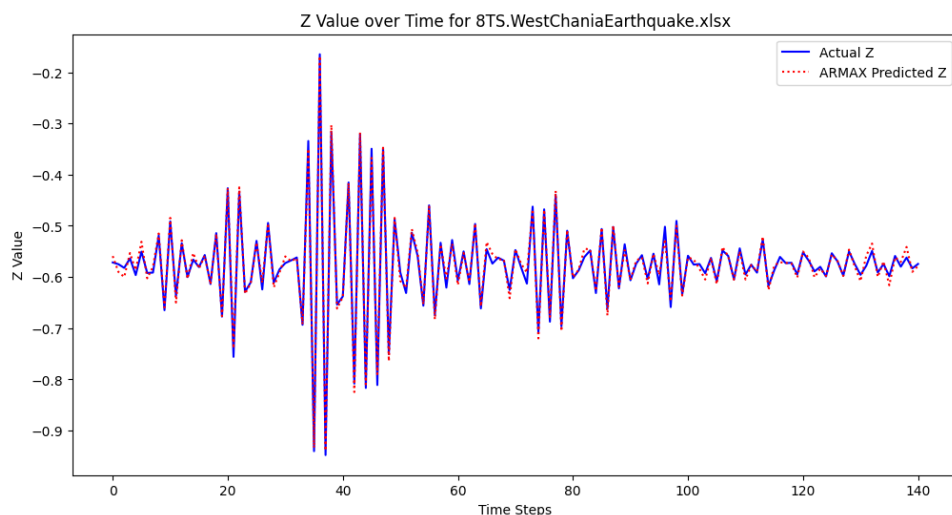


Figure 5.9: Χρονοσειρά για την τιμή Z στο 8TS WestChania Earthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) αναπαράγει με ακρίβεια τις πολύπλοκες ταλαντώσεις της τιμής Z , συμπεριλαμβανομένης μιας έντονης κορυφής γύρω από το βήμα χρόνου 40 και των μικρότερων διακυμάνσεων που ακολουθούν, υποδεικνύοντας υψηλή πιστότητα στην καταγραφή των δυναμικών του σεισμού.

Για το 8TS.WestChaniaEarthquake, τα αποτελέσματα της χρονοσειράς δείχνουν ότι το ARMAX μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητική εφαρμογή στα δεδομένα. Συγκεκριμένα, για την τιμή X το μοντέλο καταφέρνει να συλλαμβάνει κυρίως τη συχνότητα των ταλαντώσεων, αν και παρατηρούνται αποκλίσεις στο πλάτος των κορυφών, ιδιαίτερα στις πιο έντονες διακυμάνσεις. Στην τιμή Y , το μοντέλο αποδίδει εξαιρετικά, καθώς αναπαριστά με ακρίβεια τόσο τις αρχικές μικρές ταλαντώσεις όσο και τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις, καθώς και την επακόλουθη μείωση, υποδεικνύοντας μια σταθερή και αξιόπιστη μοντελοποίηση. Τέλος, για την τιμή Z το ARMAX μοντέλο αναπαράγει με υψηλή πιστότητα τις πολύπλοκες ταλαντώσεις, συμπεριλαμβανομένης μιας έντονης κορυφής γύρω στο βήμα χρόνου 40, γεγονός που μαρτυρεί την υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία του μοντέλου στην καταγραφή των δυναμικών του σεισμικού σήματος. Συνολικά, η εφαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα του 8TS υποδεικνύει ότι, παρά τις μικρές αποκλίσεις στο πλάτος, το ARMAX μοντέλο αποδίδει καλά σε όλες τις διαστάσεις.

5.2.5 Συμπεράσματα για τα δεδομένα του σεισμού στην Σάμο

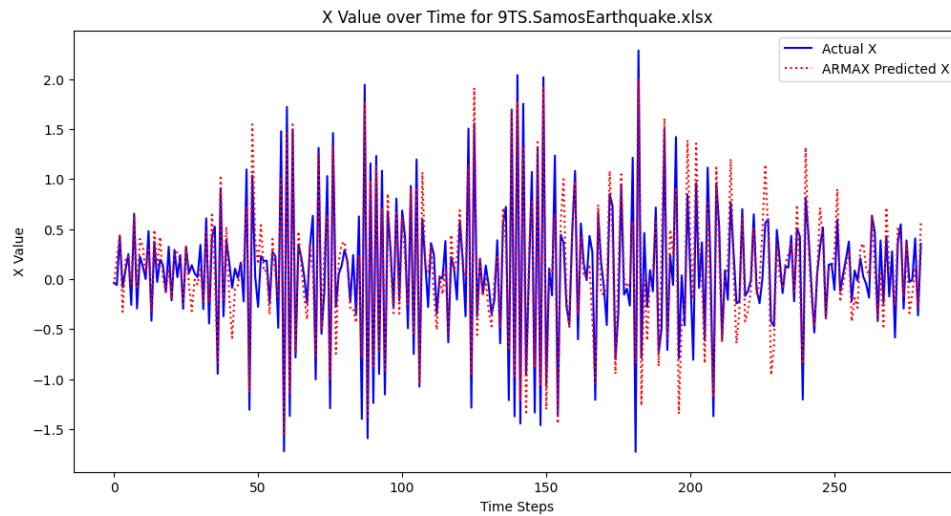


Figure 5.10: Χρονοσειρά για την τιμή X στο 9TS Samos Earthquake. Παρόλο που το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) αποκλίνει σε ορισμένες περιπτώσεις από την πραγματική τιμή X (μπλε, συνεχή γραμμή), ιδιαίτερα στο πλάτος, το μοντέλο καταφέρνει συνολικά να συλλαμβάνει τη συχνότητα και τη γενική πορεία των δεδομένων.

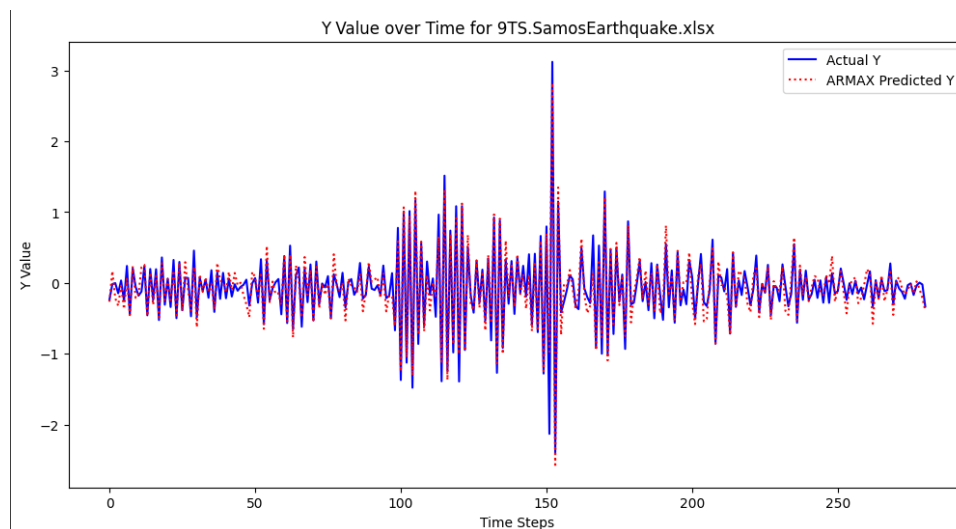


Figure 5.11: Χρονοσειρά για την τιμή Y στο 9TS Samos Earthquake. Το ARMAX μοντέλο (κόκκινο, διακεκομμένη γραμμή) ακολουθεί στενά τις πραγματικές τιμές Y (μπλε, συνεχή γραμμή) για το μεγαλύτερο μέρος της χρονοσειράς, αν και παρατηρείται σημαντική απόκλιση, με παράλειψη μιας μεγάλης θετικής κορυφής περίπου στο βήμα χρόνου 150.

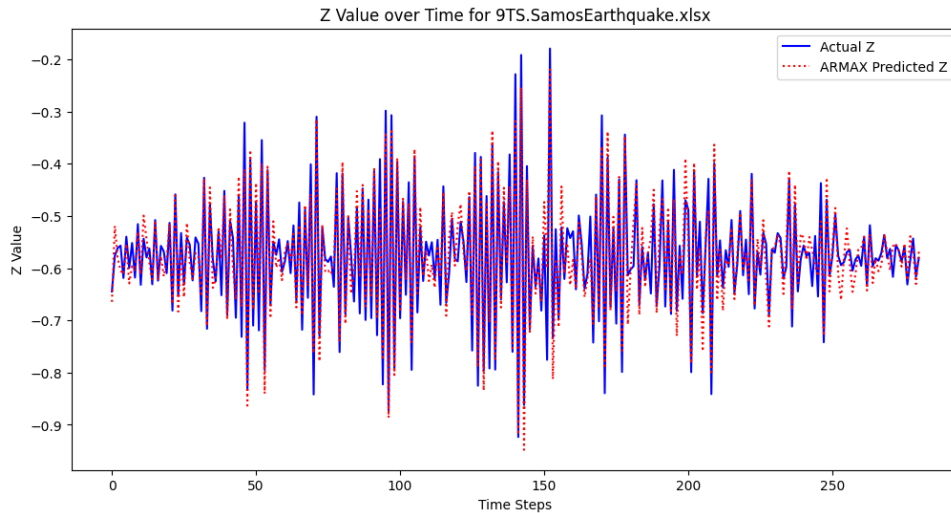


Figure 5.12: Χρονοσειρά για την τιμή Z στο 9TS Samos Earthquake. Ενώ οι προβλέψεις του ARMAX μοντέλου (κόκκινη, διακεκομμένη γραμμή) παρουσιάζουν καλή εφαρμογή όσον αφορά τη συχνότητα σε σχέση με τις πραγματικές τιμές Z (μπλε, συνεχή γραμμή), παρατηρούνται αποκλίσεις στο πλάτος, κυρίως γύρω στο βήμα χρόνου 150, αν και αυτές είναι λιγότερο έντονες σε σύγκριση με τις αποκλίσεις στην τιμή Y .

Στην περίπτωση του 9TS.SamosEarthquake, η ανάλυση της χρονοσειράς αποκαλύπτει ότι το ARMAX μοντέλο καταφέρνει να συλλαμβάνει το γενικό μοτίβο και τη συχνότητα του σεισμικού σήματος, αν και παρατηρούνται αποκλίσεις στο πλάτος σε ορισμένες περιπτώσεις. Για την τιμή X , παρά τις εμφανείς αποκλίσεις στο πλάτος, το μοντέλο καταγράφει επαρκώς τη γενική πορεία των δεδομένων. Όσον αφορά την τιμή Y , το μοντέλο παρουσιάζει στενή συμμόρφωση με τα πραγματικά δεδομένα κατά το μεγαλύτερο μέρος της χρονοσειράς, με την εξαίρεση μιας σημαντικής απόκλισης γύρω στο βήμα χρόνου 150, που υποδεικνύει πιθανές προκλήσεις στην μοντελοποίηση αυτής της διάστασης. Για την τιμή Z , το μοντέλο αποδίδει καλά όσον αφορά τη συχνότητα, αν και σημειώνονται κάποιες αποκλίσεις στο πλάτος, κυρίως κοντά στο βήμα 150, οι οποίες όμως είναι λιγότερο έντονες σε σύγκριση με αυτές των τιμών X και Y . Συνολικά, τα αποτελέσματα για το 9TS υποδεικνύουν ότι το ARMAX μοντέλο έχει μέτρια επιτυχία στην πρόβλεψη των δεδομένων, με την απόδοση στη διάσταση Y να είναι πιο αξιόπιστη σε σύγκριση με τις διαστάσεις X και Z , γεγονός που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση και πιθανή βελτιστοποίηση του μοντέλου.

Η ανάλυση του Πίνακα 5.3 φανερώνει ότι στα δύο αρχεία του σεισμού *Arkalochori* (6TS, 7TS) και σε αυτό του *WestChania* (8TS), το R^2 πλησιάζει το 1, υποδηλώνοντας ότι η γραμμική παλινδρόμηση σε συνδυασμό με τους εξωγενείς όρους (X , Y , Z lagged values και spectral features) αποδίδει εξαιρετικά. Για την περίπτωση του 9TS.SamosEarthquake.xlsx, παρότι το R^2 ανέρχεται στο 0.8832, εμφανίζεται αισθητά αυξημένο RMSE (0.1846), πιθανότατα λόγω εντονότερης διακύμανσης στο συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός. Επιπλέον, αυτές οι αποκλίσεις μπορεί να σηματοδοτούν παρουσία επιπρόσθετων δυναμικών (π.χ. μετασεισμική δραστηριότητα ή θόρυβος) που δεν έχουν ληφθεί πλήρως υπόψη στο μοντέλο.

5.2.6 Υπολείμματα (Residuals) και Στατιστική Συνοψη

Οι πίνακες που παρουσιάζουν τα στατιστικά υπολοίπων (residuals summary) υποδεικνύουν ότι ο μέσος όρος (mean) των σφαλμάτων είναι κοντά στο μηδέν ($mean \approx 0$) για τις περισσότερες μεταβλητές, στοιχείο που αποδεικνύει έλλειψη συστηματικής μεροληψίας. Παράλληλα, οι τιμές **min** και **max** κυμαίνονται σε σχετικά στενά όρια, αποκαλύπτοντας ότι τα σφάλματα δεν παρουσιάζουν μεγάλες εκρήξεις (outliers), με εξαίρεση το αρχείο 9TS.SamosEarthquake.xlsx, όπου η **std** και το **max** δηλώνουν κάπως μεγαλύτερη διασπορά. Η ύπαρξη τέτοιων εκτροπών χρήζει περαιτέρω έρευνας για το κατά πόσο οφείλεται σε ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου σεισμού (π.χ. έντονα μετα-κύματα, διαδοχικά ημι-ανεξάρτητα γεγονότα) ή σε στοιχειακή θορύβου και σφάλματος μέτρησης.

Statistic	X Residuals	Y Residuals	Z Residuals
Count	161.000000	161.000000	161.000000
Mean	-0.000022	0.003389	0.000091
Std	0.129663	0.067970	0.011543
Min	-0.274267	-0.177822	-0.029312
25% (Std)	-0.094958	-0.050679	-0.008241
50% (Std)	-0.005961	0.007840	0.000763
75% (Std)	0.084459	0.048818	0.008723
Max	0.343095	0.181105	0.031179

Table 5.4: Σύνοψη υπολοίπων για τα μοντέλα ARMAX για 6TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx

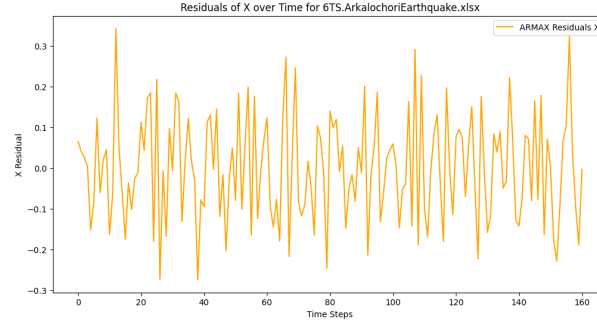


Figure 5.13: Κατανομή των υπολειμμάτων του X για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 6TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα παρουσιάζει τα υπολείμματα του X με μέσο όρο κοντά στο μηδέν (-0.000022) και τυπική απόκλιση 0.129663, υποδεικνύοντας μια ισορροπημένη δομή σφαλμάτων κατά τον άξονα X.

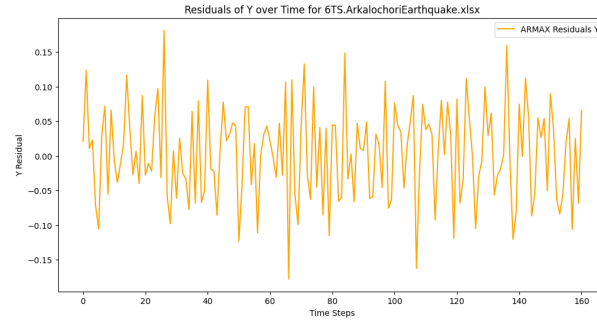


Figure 5.14: Κατανομή των υπολειμμάτων του Y για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 6TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα απεικονίζει τα υπολείμματα του Y με μέσο όρο 0.003389 και τυπική απόκλιση 0.067970, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο αποτυπώνει τη μεταβλητότητα κατά τον άξονα Y με ελάχιστη μεροληψία.

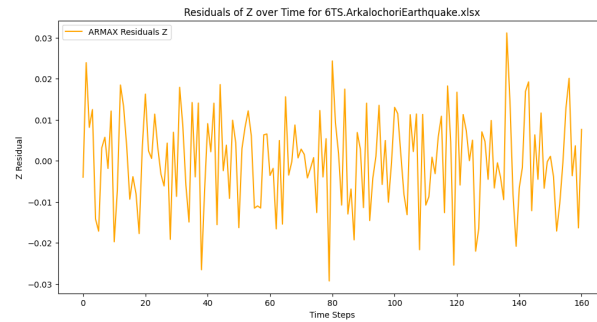


Figure 5.15: Κατανομή των υπολειμμάτων του Z για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 6TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα παρουσιάζει τα υπολείμματα του Z με μέσο όρο 0.000091 και τυπική απόκλιση 0.011543, επιδεικνύοντας πυκνή συγκέντρωση και υψηλή ακρίβεια κατά τον άξονα Z.

Statistic	X Residuals	Y Residuals	Z Residuals
Count	141.000000	141.000000	141.000000
Mean	0.000118	0.000031	0.000416
Std	0.073012	0.040804	0.006274
Min	-0.175530	-0.116138	-0.017658
25% (Std)	-0.050282	-0.026299	-0.003701
50% (Std)	0.001378	-0.001428	0.000132
75% (Std)	0.049049	0.022864	0.004849
Max	0.146964	0.111468	0.017762

Table 5.5: Σύνοψη υπολοίπων για τα μοντέλα ARMAX για 7TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx

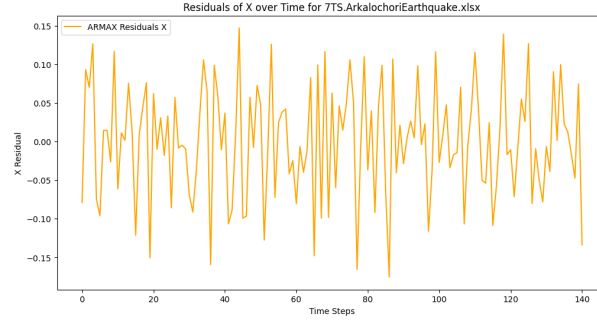


Figure 5.16: Κατανομή των υπολειμμάτων του X για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 7TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα δείχνει τα υπολείμματα του X με μέσο όρο κοντά στο μηδέν (0.000118) και τυπική απόκλιση 0.073012. Η μέτρια διασπορά υποδηλώνει μια ισορροπημένη δομή σφαλμάτων κατά τον άξονα X.

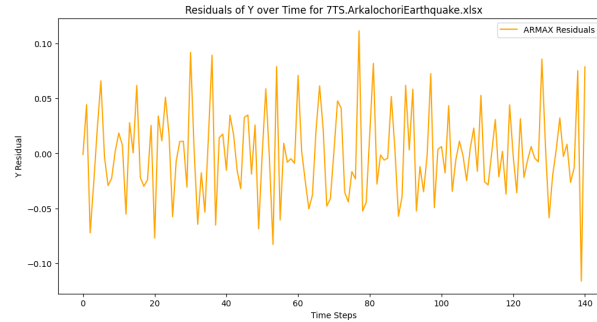


Figure 5.17: Κατανομή των υπολειμμάτων του Y για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 7TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα απεικονίζει τα υπολείμματα του Y με μέσο όρο 0.000031 και τυπική απόκλιση 0.040804. Η μειωμένη διασπορά υποδηλώνει ότι το μοντέλο αποτυπώνει τη μεταβλητότητα κατά τον άξονα Y με ελάχιστη μεροληψία.

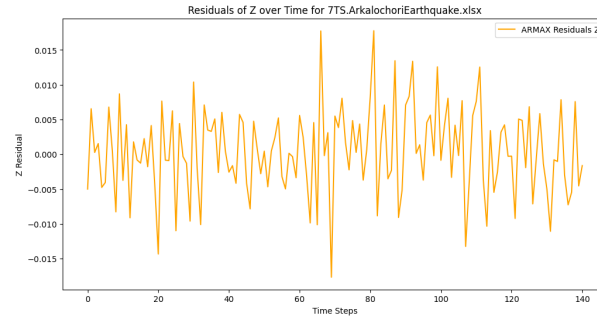


Figure 5.18: Κατανομή των υπολειμμάτων του Z για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 7TS.ArkalochoriEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα παρουσιάζει τα υπολείμματα του Z με μέσο όρο 0.000416 και στενή τυπική απόκλιση 0.006274. Η συγκεντρωμένη κατανομή υποδηλώνει υψηλή ακρίβεια κατά τον άξονα Z.

Statistic	X Residuals	Y Residuals	Z Residuals
Count	141.000000	141.000000	141.000000
Mean	0.001656	-0.001893	-0.000344
Std	0.083601	0.036771	0.009346
Min	-0.259126	-0.121221	-0.021532
25% (Std)	-0.046346	-0.021948	-0.006033
50% (Std)	0.004474	0.000315	0.000203
75% (Std)	0.054809	0.020298	0.005604
Max	0.215203	0.095012	0.024201

Table 5.6: Σύνοψη υπολοίπων για τα μοντέλα ARMAX για 8TS.WestChaniaEarthquake.xlsx

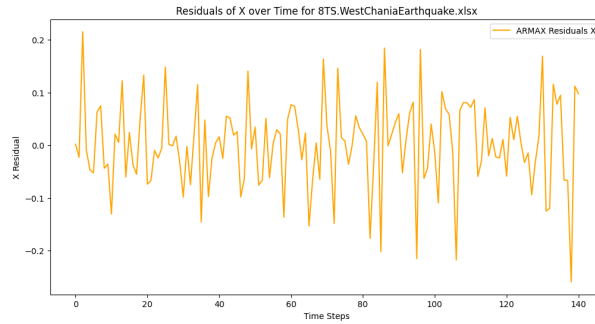


Figure 5.19: Κατανομή των υπολειμμάτων του X για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 8TS.WestChaniaEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα δείχνει τα υπολείμματα του X με μέσο όρο 0.001656 και τυπική απόκλιση 0.083601. Η ελαφρώς ευρύτερη διασπορά αντικατοπτρίζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα κατά τον άξονα X.

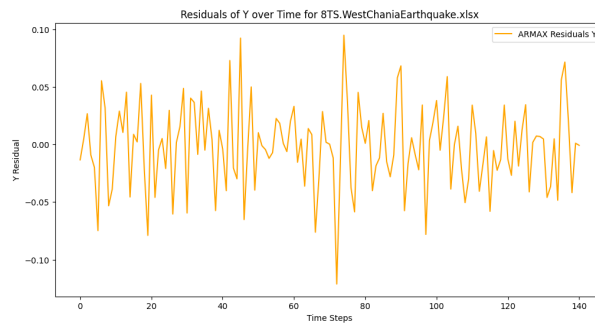


Figure 5.20: Κατανομή των υπολειμμάτων του Y για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 8TS.WestChaniaEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα απεικονίζει τα υπολείμματα του Y με μέσο όρο -0.001893 και τυπική απόκλιση 0.036771. Η συμπαγής κατανομή υποδηλώνει ότι το μοντέλο αποτυπώνει αποτελεσματικά τη μεταβλητότητα κατά τον άξονα Y.

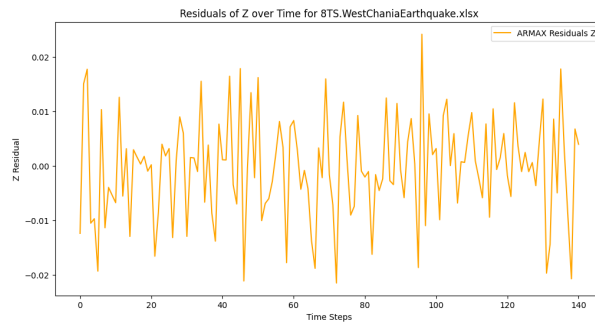


Figure 5.21: Κατανομή των υπολειμμάτων του Z για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 8TS.WestChaniaEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα παρουσιάζει τα υπολείμματα του Z με μέσο όρο -0.000344 και τυπική απόκλιση 0.009346. Η χαμηλή διασπορά υποδηλώνει υψηλή ακρίβεια στις εκτιμήσεις κατά τον άξονα Z.

Statistic	X Residuals	Y Residuals	Z Residuals
Count	281.000000	281.000000	281.000000
Mean	-0.001381	0.003323	-0.000140
Std	0.273353	0.162385	0.038913
Min	-0.884037	-1.159544	-0.175740
25% (Std)	-0.195332	-0.093184	-0.025009
50% (Std)	0.015877	0.005553	0.000370
75% (Std)	0.164378	0.107916	0.024775
Max	0.685761	0.539405	0.093865

Table 5.7: Σύνοψη υπολοίπων για τα μοντέλα ARMAX για 9TS.SamosEarthquake.xlsx

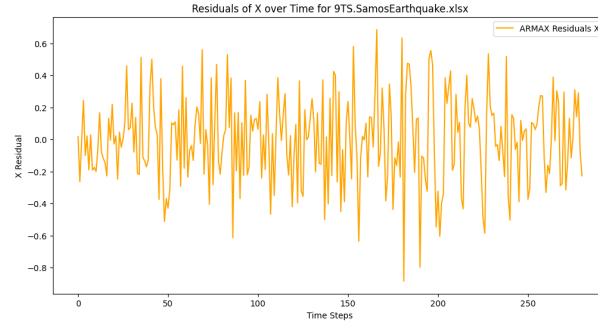


Figure 5.22: Κατανομή των υπολειμμάτων του X για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 9TS.SamosEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα δείχνει τα υπολείμματα του X με μέσο όρο -0.001381 και τυπική απόκλιση 0.273353. Η σχετικά μεγάλη διασπορά υποδηλώνει σημαντική μεταβλητότητα κατά τον άξονα X.

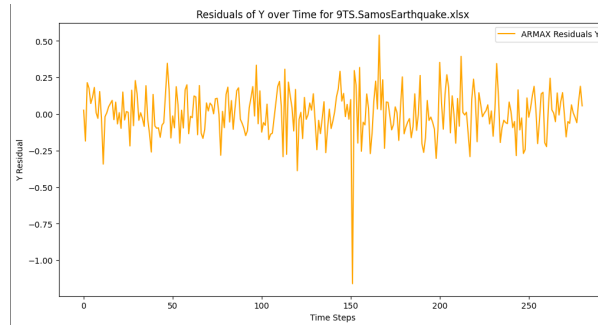


Figure 5.23: Κατανομή των υπολειμμάτων του Y για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 9TS.SamosEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα απεικονίζει τα υπολείμματα του Y με μέσο όρο 0.003323 και τυπική απόκλιση 0.162385. Η μέτρια διασπορά αντικατοπτρίζει αξιοσημείωτη μεταβλητότητα των σφαλμάτων κατά τον άξονα Y.

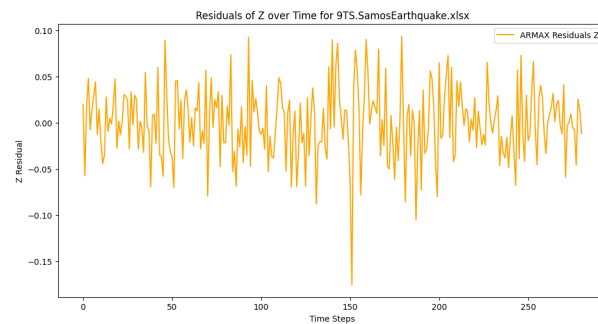


Figure 5.24: Κατανομή των υπολειμμάτων του Z για τα μοντέλα ARMAX στο αρχείο 9TS.SamosEarthquake.xlsx: Το ιστόγραμμα παρουσιάζει τα υπολείμματα του Z με μέσο όρο -0.000140 και τυπική απόκλιση 0.038913. Η στενή συγκέντρωση των σφαλμάτων υποδηλώνει υψηλή ακρίβεια κατά τον άξονα Z.

5.2.7 Συνολική Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων

Από ακαδημαϊκή σκοπιά, η διαφορά απόδοσης ανάμεσα στο στάδιο εκπαίδευσης (όπου για ορισμένους άξονες καταγράφηκαν αρνητικές τιμές R^2) και το στάδιο δοκιμής (όπου σε κάποιες καταγραφές εμφανίζονται $R^2 > 0.98$) φανερώνει τόσο τη σημασία της επαρκούς δειγματοληψίας όσο και την πιθανή ανομοιογένεια των δεδομένων. Η εισαγωγή των εξωγενών μεταβλητών (μετρήσεις επιτάχυνσης, κυλιόμενα στατιστικά και συχνοτικά χαρακτηριστικά) φαίνεται ότι βοηθά σημαντικά στην πρόβλεψη σε νέα γεγονότα, πράγμα που πιστοποιεί τη δύναμη των ARMAX μοντέλων σε πολυμεταβλητές χρονοσειρές. Εντούτοις, όταν ο συνολικός αριθμός χρονικών “παραθύρων” είναι περιορισμένος, το μοντέλο ενδέχεται να δυσκολευτεί κατά την εκπαίδευση, εμφανίζοντας προειδοποιήσεις σύγκλισης και χαμηλές μετρικές [78].

Μία επιπλέον διάσταση που αναδεικνύεται είναι η πιθανή ευαισθησία των ARMAX μοντέλων στη σωστή ρύθμιση της τάξης (p, d, q). Η επιλογή $(1, 0, 1)$ παρέχει μια σχετικά απλή εκδοχή, ωστόσο σε πιο σύνθετες ή μακροχρόνιες καταγραφές απαιτούνται ενδεχομένως υψηλότερες τάξεις αυτοπαλινδρόμησης ή κινούμενου μέσου, προκειμένου να συλληφθεί η εκτενέστερη παρελθοντική επίδραση. Αυτό μπορεί να βελτιώσει τόσο τη σύγκλιση όσο και τις τελικές μετρικές, υπό την προϋπόθεση ότι διατίθενται επαρκή δεδομένα.

Τέλος, πρέπει να υπογραμμιστεί η αξία της διαδικασίας *scaled feature engineering*. Η ενσωμάτωση στατιστικών δεικτών υψηλής τάξης (π.χ. skew, kurtosis) και συχνοτικών παραμέτρων (π.χ. spectral entropy, centroid, bandwidth) δημιουργεί πολυδιάστατες αναπαραστάσεις του σήματος, οι οποίες αποδεικνύονται καθοριστικές στην επίτευξη επιτυχημένων προβλέψεων σε νέα σεισμικά γεγονότα. Σε περιπτώσεις όπου η μετάβαση σε πραγματικά περιβάλλοντα (real-time applications) είναι επιθυμητή [82, 90], η παραπάνω διαδικασία παραμένει εφαρμόσιμη, αλλά απαιτείται βελτιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους και ενδεχομένως ανάπτυξη πιο αποδοτικών αλγορίθμων σύγκλισης.

5.2.8 Συμπερασματική Επισκόπηση

Συμπερασματικά, η σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα εκπαίδευσης και δοκιμής επιβεβαιώνει ότι το προτεινόμενο ARMAX σχήμα σε συνδυασμό με την εξελεγμένη διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται αποτελεσματικά σε νέα σεισμικά δεδομένα, αποδίδοντας R^2 ακόμα και πάνω από 0.98 σε ορισμένες περιπτώσεις. Ταυτόχρονα, παρατηρούνται προκλήσεις όταν ο αριθμός “παραθύρων” είναι περιορισμένος ή όταν οι σεισμικές μετρήσεις εμφανίζουν έντονη μεταβλητότητα. Σε συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας δεδομένων, πιθανότατα απαιτείται αναθεώρηση της τάξης του μοντέλου ή/και εμπλουτισμός του συνόλου των χαρακτηριστικών με επιπλέον αισθητήρες ή διαφορετικούς τύπους μέτρησης. Επιπλέον, τα ConvergenceWarnings μπορούν να αρθούν με κατάλληλη παραμετροποίηση (βλ. αλλαγή τάξης ARMAX, αύξηση του αριθμού επαναλήψεων maxiter, επιλογή διαφορετικών αρχικών τιμών κ.λπ.) [78].

Η παρούσα ανάλυση, λοιπόν, καταδεικνύει αφενός τις δυσκολίες που μπορεί να ανακύψουν κατά την εφαρμογή προηγμένων μοντέλων σε δεδομένα περιορισμένης κλίμακας ή ποικιλόμορφης ποιότητας, αφετέρου όμως υπογραμμίζει και την ικανότητα του ίδιου μοντέλου να γενικεύει επιτυχώς σε νέα, διαφορετικά σεισμικά γεγονότα, υπό την προϋπόθεση ύπαρξης επαρκούς πληροφορίας. Το γεγονός αυτό συμβάλλει θετικά στον σχεδιασμό ενός μελλοντικού ολοκληρωμένου πλαισίου παρακολούθησης και πρόγνωσης [81], όπου τα ARMAX μοντέλα με εμπλουτισμένη ανάλυση χαρακτηριστικών θα μπορούσαν να αποτελέσουν βασικό πυλώνα για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την απόκριση ή τη συντήρηση μιας κρίσιμης δομής σε πραγματικές επιχειρησιακές συνθήκες.

Chapter 6

Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα διατριβή ανέπτυξε και αξιολόγησε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο προσομοίωσης, πρόγνωσης και δοκιμής μοντέλων χρονοσειρών, με στόχο την ανάλυση δυναμικών καταγραφών σε πραγματικά ή συνθετικά σεισμικά δεδομένα. Το πλαίσιο βασίστηκε σε τεχνικές προεπεξεργασίας και εξαγωγής εξελιγμένων χαρακτηριστικών (στατιστικά, συχνοτικά και κυλιόμενα μεγέθη) που εφαρμόστηκαν σε υποσύνολα δεδομένων (sliding windows), και εν συνεχεία σε μοντέλα ARMAX (AutoRegressive Moving Average with exogenous Inputs) για την πρόβλεψη μεγεθών-στόχων (X , Y , Z). Η μεθοδολογία επικύρωσης περιελάμβανε διαχωρισμό των δεδομένων σε στάδιο εκπαίδευσης (training) και στάδιο δοκιμής (testing), εξασφαλίζοντας την αξιολόγηση της γενίκευσης του μοντέλου σε νέα, μη “ορατά” καταγραφικά αρχεία. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των Κεφαλαίων 4 και 5 κατέδειξαν τόσο τις δυνατότητες όσο και τις προκλήσεις της προσέγγισης αυτής.

Από την υλοποίηση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων, προέκυψαν ορισμένες καθοριστικές διαπιστώσεις. Πρώτον, η κατανομή και ο αριθμός των χρονικών παραθύρων (sliding windows) διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη διαδικασία μάθησης. Αυτό επιβεβαιώθηκε ειδικότερα στα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5, όπου για τα αρχεία εκπαίδευσης με περιορισμένα δεδομένα (π.χ., 1TS.ThessalyEarthquake με 81 παράθυρα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1) παρατηρήθηκαν προβλήματα σύγκλισης (ConvergenceWarnings) [78] και τα μοντέλα για τις μεταβλητές X και Y παρουσίασαν αρνητικό R^2 (-0.1042 και -0.2932 αντίστοιχα, Πίνακας 5.2). Εντούτοις, τα ίδια μοντέλα απέδωσαν εξαιρετικά καλά σε νέα αρχεία στο στάδιο δοκιμής με περισσότερα δείγματα για χαμηλό θόρυβο, επιτυγχάνοντας R^2 ακόμη και άνω του 0.98 (π.χ., για το αρχείο 6TS.ArkalochoriEarthquake το R^2 ήταν 0.9813, Πίνακας 5.3). Δεύτερον, η ολοκληρωμένη διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών, που συμπεριλαμβάνει στατιστικές, φασματικές και κυλιόμενες ιδιότητες (όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4), απεδείχθη κομβική για την ικανότητα του μοντέλου να συλλάβει σύνθετα φαινόμενα όπως οι μεταβολές από σεισμικά γεγονότα. Τρίτον, η χρήση εξωγενών μεταβλητών (exogenous inputs) με υστερήσεις (lags) προσέφερε στο ARMAX πλαίσιο μια πρόσθετη ευελιξία στην προσέγγιση των μη-γραμμικών, πολυμεταβλητών σχέσεων που κρύβουν τα δεδομένα επιτάχυνσης ή άλλων ενδείξεων.

Η δυνατότητα γενίκευσης του ίδιου πλαισίου σε ευρύτερα πεδία εφαρμογών (π.χ. διαχείριση βιομηχανικών ή περιβαλλοντικών χρονοσειρών) αναδεικνύεται μέσα από τα θετικά αποτελέσματα στο στάδιο δοκιμής, όπως η επιτυχής πρόβλεψη για τις μετατοπίσεις X , Y , Z για τον σεισμό του Αρκαλοχωρίου (Εικόνες 5.1-5.3) με χαμηλά RMSE (Πίνακας 5.3). Ωστόσο, οι δυσκολίες που παρατηρήθηκαν για τον σεισμό της Σάμου (Εικόνες 5.10-5.12 και Πίνακας 5.3) υπογραμμίζουν την ευαισθησία στην ποιότητα και μεταβλητότητα των δεδομένων εισόδου. Περαιτέρω βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί μέσα από: 1. Εμπλουτισμό της διαδικασίας εξαγωγής χαρακτηριστικών με επιπρόσθετες τεχνικές ανάλυσης σήματος (π.χ. Wavelet transforms). 2. Διεύρυνση της τάξης του ARMAX ((p , d , q)) για την αντιμετώπιση πιο σύνθετων δυναμικών, ιδίως σε καταγραφές μεγάλης διάρκειας ή με πολλαπλές φάσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις από το Κεφάλαιο 5 όπου η τάξη (1,0,1) οδήγησε σε προειδοποιήσεις σύγκλισης σε δεδομένα περιορισμένης έκτασης. 3. Ενσωμάτωση σύγχρονων βελτιστοποιητικών μεθόδων (global optimization) [96], ώστε να ξεπεραστούν τα φαινόμενα μη σύγκλισης και να προσδιορίζονται αυτόματα οι βέλτιστες υπερ-παραμέτροι. 4. Δυναμική προσαρμογή του παραθύρου (adaptive windowing), με στόχο την ανίχνευση χρονικών φάσεων όπου το σήμα εμφανίζει δραματικές αλλαγές, όπως κατά τη διάρκεια ενός κυρίου σεισμικού κύματος ή μετεπεισοδίων (aftershocks).

Συνολικά, η εκτεθείσα μεθοδολογία καταδεικνύει ότι η σύνθεση παραθύρων, η ενδεδειγμένη εξαγωγή χαρακτηριστικών και η χρήση μοντέλων ARMAX με εξωγενείς μεταβλητές συγκροτούν ένα βιώσιμο και αποδοτικό πλαίσιο, ικανό να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα ακόμη και σε εφαρμόσιμα σενάρια πραγματικής λειτουργίας. Παρά τις αρχικές δυσκολίες που παρουσιάζονται σε ορισμένα αρχεία με περιορισμένα δεδομένα ή έντονο θόρυβο (όπως αναλύθηκε στα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5.1), οι δομικά ισχυρές επιδόσεις σε υπόλοιπα αρχεία (Κεφάλαιο 5.2) ενθαρρύνουν τη μελλοντική έρευνα και την επέκταση του ίδιου πλαισίου σε ευρύτερες ή διαφορετικές κατηγορίες χρονοσειρών.

Bibliography

- [1] Charalambidi, B.; et al. *Finite Element Modelling and Analysis of Masonry Structures: The Neoria Monument Case Study*. Developments in the Built Environment, 2022, **10**, 100069. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100069>
- [2] Stavroulakis, M.E.; et al. *Dynamic Response of Masonry Monuments: A Case Study for Neoria*. Buildings, 2023, **13**, 2204. <https://doi.org/10.3390/buildings13092204>
- [3] Drosopoulos, G.; Stavroulakis, G.E. *A multi-scale model for masonry structures using the extended finite element method (XFEM)*. Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg, 2018, **331**, 220–236.
- [4] Motsa, S.; et al. *Contact Interfaces and Nonlinear Analysis for Large Stone Masonry Monuments*. International Journal of Architectural Heritage, 2020, **14**, 156–177.
- [5] Du, X. *Advanced Damage Modelling in Historic Structures*. PhD Thesis, Technical University of Crete, 2019.
- [6] ApplSci11997 *Digital Twins for Infrastructure: A Comprehensive Survey on Applications and Methods*. Applied Sciences, 2022, **12**, 11997. <https://doi.org/10.3390/app122311997>
- [7] Conde, B.; et al. *Assessment of Damage and Restoration in Historical Monuments using Remote Sensing*. Remote Sensing, 2016, **8**, 133. <https://doi.org/10.3390/rs8020133>
- [8] Ferrari, F.; et al. *Finite element modeling and limit analysis of masonry arches*. Engineering Structures, 2019, **50**, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.008>
- [9] Betti, M.; et al. *Nonlinear dynamic analysis of masonry bridges subjected to multi-support excitation*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, **28**, 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.07.014>
- [10] Lakzaeian, M. *Damage Plasticity in Masonry Structures Under Seismic Loading*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011, **40**, 985–1002. <https://doi.org/10.1002/eqe.1066>
- [11] Lourenço, P.B. Computations on historic masonry structures. Prog. Struct. Eng. Mater. 2002, **4**, 301–319. <https://doi.org/10.1002/pse.125>
- [12] Tzamtzis, A.D.; Asteris, P.G. Finite Element Analysis of Masonry Structures: Part II—Proposed 3-D Nonlinear Microscopic Model. In Proceedings of the Ninth North American Masonry Conference, Clemson, SC, USA, 1–4 June 2003.
- [13] Penelis, G.; Penelis, G. Restoration of the Margirgis Church and Roman Tower in Cairo. Struct. Eng. Int. 2020, **30**, 64–73. <https://doi.org/10.1080/10168664.2020.1708083>
- [14] D’Altri, A.M.; Sarhosis, V.; Milani, G.; Rots, J.; Cattari, S.; Lagomarsino, S.; Sacco, E.; Tralli, A.; Castellazzi, G.; de Miranda, S. Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification. Arch. Computat. Methods Eng. 2020, **27**, 1153–1185. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09351-x>
- [15] Kappos, A.J.; Penelis, G.G.; Drakopoulos, C.G. Evaluation of simplified models for lateral load analysis of unreinforced masonry buildings. ASCE J. Struct. Eng. 2002, **128**, 890–897. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:7\(890\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:7(890))

- [16] Quagliarini, E.; Maracchini, G.; Clementi, F. Uses and limits of the Equivalent Frame Model on existing unreinforced masonry buildings for assessing their seismic risk: A review. *J. Build. Eng.* 2017, 10, 166–182. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.03.004>
- [17] Shabani, A.; Kioumars, M.; Zucconi, M. State of the art of simplified analytical methods for seismic vulnerability assessment of unreinforced masonry buildings. *Eng. Struct.* 2021, 239, 112280. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112280>
- [18] Leftheris, B.; Sapounaki, A.; Stavroulaki, M.E.; Stavroulakis, G.E. *Computational Mechanics for Heritage Structures*; WIT- Computational Mechanics Publications: Boston, MA, USA, 2006. <https://doi.org/10.2495/978-1-85312-952-1>
- [19] Asteris, P.G.; Chronopoulos, M.P.; Chrysostomou, C.Z.; Varum, H.; Plevris, V.; Kyriakides, N.; Silva, V. Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems. *Eng. Struct.* 2014, 62, 118–134. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.031>
- [20] Da Silva Luis, C.M.; Milani, G.; Paulo, B. Lourenço: Probabilistic-based discrete model for the seismic fragility assessment of masonry structures. *Structures* 2023, 52, 506–523. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.102>
- [21] Bhattacharya, S.; Nayak, S.; Dutta, S.C. A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures, *International. J. Disaster Risk Reduct.* 2014, 7, 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2013.12.004>
- [22] Spyarakos, C.C.; Maniatakis, C.A. Nominal Life of Interventions for Monuments and Historic Structures. In: *Transdisciplinary Multi-spectral Modeling and Cooperation for the Preservation of Cultural Heritage. TMM.CH 2018*; Moropoulou, A., Ed.; Communications in Computer and Information Science; Springer: Cham, Switzerland, 2019; Volume 962. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12957-6_53
- [23] Kocaman, I. Effect of restoration interventions on the seismic behavior of historical masonry buildings: The case of Molla Siyah mosque. *Eng. Fail. Anal.* 2023, 148, 107206. [CrossRef] <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107206>
- [24] Wu, X.; Lu, J.; Wang, Z.; Yang, W.; Qiao, N. Dynamic characteristics and seismic response analysis of the bottle-shaped masonry ancient pagoda. *Structures* 2022, 44, 1648–1659. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.049>
- [25] Ferrante, A.; Loverdos, D.; Clementi, F.; Milani, G.; Formisano, A.; Lenci, S.; Sarhosis, V. Discontinuous approaches for nonlinear dynamic analyses of an ancient masonry tower. *Eng. Struct.* 2021, 230, 111626. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111626>
- [26] Schiavoni, M.; Giordano, E.; Roscini, F.; Clementi, F. Numerical modeling of a majestic masonry structure: A comparison of advanced techniques. *Eng. Fail. Anal.* 2023, 149, 107293. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107293>
- [27] Sharma, S.; Marasca, A.; Ponte, M.; Bento, R. Modelling the in-plane cyclic behaviour of typical Portuguese rubble stone masonry using the applied element method. *Structures* 2022, 46, 1224–1242. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.012>
- [28] Porcu, M.C.; Montis, E.; Saba, M. Role of model identification and analysis method in the seismic assessment of historical masonry towers. *J. Build. Eng.* 2021, 43, 103114. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103114>
- [29] Hoveidae, N.; Fathi, A.; Karimzadeh, S. Seismic damage assessment of a historic masonry building under simulated scenario earthquakes: A case study for Arge-Tabriz. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2021, 147, 106732. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106732>
- [30] Di Gennaro, L.; Guadagnuolo, M.; Monaco, M. Rocking Analysis of Towers Subjected to Horizontal Forces. *Buildings* 2023, 13, 762. <https://doi.org/10.3390/buildings13030762>
- [31] Chácará, C.; Reátegui, R.; Oré, Á.; Suarez, P.; Aguilar, R. Integration of NDT, 3D parametric modelling, and nonlinear numerical analysis for the seismic assessment of a vaulted stone-masonry historical building. *J. Build. Eng.* 2023, 70, 106347. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106347>

- [32] Su, Z.; Zheng, W.; Wang, Y.; Hou, X. Seismic Vulnerability Analysis of Masonry Structures Built with Disassembled Brick Wall Sections. *Buildings* 2022, 12, 1831. <https://doi.org/10.3390/buildings12111831>
- [33] Stavroulaki, M.E.; Riveiro, B.; Drosopoulos, G.A.; Solla, M.; Koutsianitis, P.; Stavroulakis, G.E. Modelling and strength evaluation of masonry bridges using terrestrial photogrammetry and finite elements. *Adv. Eng. Softw.* 2016, 101, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.12.005>
- [34] Valente, M. Earthquake response and damage patterns assessment of two historical masonry churches with bell tower. *Eng. Fail. Anal.* 2023, 151, 107418. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107418>
- [35] Greek Anti-Seismic CODE—2000 (EAK 2000), Earthquake Design and Protection Organization and, Association of Civil Engineers of Greece; ATTICA PRINTING SA: Athens, Greece, 2000.
- [36] Valente, M. Seismic behavior and damage assessment of two historical fortified masonry palaces with corner towers. *Eng. Fail. Anal.* 2022, 134, 106003. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106003>
- [37] Tapkın, S.; Tercan, E.; Motsa, S.; Drosopoulos, G.A.; Stavroulaki, M.E.; Maravelakis, M.; Stavroulakis, G.E. Structural Investigation of Masonry Arch Bridges Using Various Nonlinear Finite Element Models. *J. Bridge Eng.* 2022, 27, 04022053. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001929](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001929)
- [38] Seismosoft. SeismoMatch 2022—A Computer Program for Spectrum Matching of Earthquake Records. 2022. <https://seismosoft.com/>
- [39] Al-Atik, L.; Abrahamson, N.A. An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthq. Spectra* 2010, 26, 601–617. <https://doi.org/10.1193/1.3459159>
- [40] Rayegani, A.; Nouri, G. Seismic collapse probability and life cycle cost assessment of isolated structures subjected to pounding with smart hybrid isolation system using a modified fuzzy based controller. *Structures* 2022, 44, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.087>
- [41] Allemang, R.J., 2003. The modal assurance criterion – twenty years of use and abuse. *Sound Vib.* 37, 14–23. August.
- [42] Anastasio, S., 2020. Building between the Two Rivers: an Introduction to the Building Archaeology of Ancient Mesopotamia. *Building between the Two Rivers*. Archaeopress Archaeology, Oxford.
- [43] Asikoglu, A.; Avşar, O.; Lourenço, P.B.; Kaplan, O.; Karanikoloudis, G. Finite element modeling and operational modal analysis of a historical masonry mosque. In: *Proceedings of the 7th EC-COMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn 2019)*, Papadrakakis, M., Fragiadakis, M., Eds.; Crete, Greece, 24–26 June 2019.
- [44] Betti, M.; Galano, L.; Vignoli, A., 2016. Finite element modelling for seismic assessment of historic masonry buildings. In: D’Amico, S. (Ed.), *Earthquakes and Their Impact on Society*. Springer, Cham, pp. 377–415. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21753-6_15
- [45] Charalambidi, B.; Motsa, S.; Drosopoulos, G.; Koutsianitis, P.; Kasampali, A.; Stavroulaki, M.; Stavroulakis, G., 2021. Structural damage investigation of the Neoria monument in Chania. In: *2nd International Conference TMM-CH*. Athens.
- [46] Chilton, J.C.; Isler, H., 2020. *Heinz Isler: the Engineer’s Contribution to Contemporary Architecture*. Thomas Telford Publishing, Telford.
- [47] Conde, B.; Drosopoulos, G.; Stavroulakis, G.; Riveiro, B.; Stavroulaki, M., 2016. Inverse analysis of masonry arch bridges for damaged condition investigation: application on Kakodiki bridge. *Eng. Struct.* 127, 388–401. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.038>
- [48] Drosopoulos, G.A.; Stavroulakis, G.E., 2018. A computational homogenization approach for the study of localization of masonry structures using the XFEM. *Arch. Appl. Mech.* 88, 2135–2152. <https://doi.org/10.1007/s00419-017-1279-1>

- [49] Drosopoulos, G., Stavroulakis, G., Massalas, C., 2008. Influence of the geometry and the abutments movement on the collapse of stone arch bridges. *Construct. Build. Mater.* 22, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.017>
- [50] Du, Z.-Z., 2019. eXtended Finite Element Method (XFEM) in Abaqus. Simulia, Johnston. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/resources/xfem-in-abaqus/>
- [51] Evlogimenou, I., December, 2011. Diploma Thesis. In: Venetian Neoria Chania: Static Solution and Intervention Proposal. NTUA, School of Architecture, D.P.M.S. Protection of Monuments.
- [52] Ferrari, R., Froio, D., Rizzi, E., Gentile, C., Chatzi, E.N., 2019. Model updating of a historic concrete bridge by sensitivity- and global optimization-based Latin Hypercube Sampling. *Eng. Struct.* 179, 139–160. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.139>
- [53] Gilbert, M., Melbourne, C., 1994. Rigid-block analysis of masonry structures. *Struct. Eng.* 72.
- [54] Heyman, J., 1982. *The Masonry Arch*. Ellis Horwood Limited, Chichester.
- [55] Lakzaeian, F.H., 2011. Ambient vibration testing and finite element model updating of a concrete footbridge. In: The 4th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC 2011). Istanbul, Turkey, 9–11 May.
- [56] Limitstate. Ring. <https://www.limitstate.com/ring>
- [57] Motsa, S.M., Drosopoulos, G.A., Stavroulaki, M.E., Stavroulakis, G.E., Ruben, P., Borg, P., Galea, P., d’Amico, S., 2019. Large-scale contact analysis for the stability estimation of the Mnajdra Monuments. In: Zigoni (Ed.), *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*. Taylor & Francis, Abingdon, pp. 2160–2164.
- [58] Motsa, S.M., Drosopoulos, G.A., Stavroulaki, M.E., Maravelakis, E., Borg, R.P., Galea, P., D’amico, S., Stavroulakis, G.E., 2020. Structural investigation of Mnajdra megalithic monument in Malta. *J. Cult. Herit.* 41, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.06.007>
- [59] Pastor, M., Binda, M., Harcarik, T., 2012. Modal assurance criterion. *Procedia Eng.* 48, 543–548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>
- [60] Providakis, C., March 2021. Experimental investigation of eigenmodal characteristics. In: Skoutelis, N., et al. (Eds.), *Research Investigation for the Restoration of Neoria*, Technical University of Crete, Municipality of Chania, Ephorate of Antiquities. Chania.
- [61] Regulation for Valuation and Structural Interventions for Masonry (KADET), 2021. Greece.
- [62] Simulia, D.S., 2013. Abaqus 6.13 User’s Manual. Dassault Systems, Providence, pp. 305–306. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [63] Skoutelis, N., et al. (Eds.), March 2021. *Research Investigation for the Restoration of Neoria*. Technical University of Crete, Municipality of Chania, Ephorate of Antiquities, Chania.
- [64] Stavroulaki, M.E., Tsinarakis, Th., 2011. Finite element analysis of masonry barrel vaults. In: 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics. Athens.
- [65] Stavroulaki, M.E., Drosopoulos, G.A., Tavlopoulou, E., Skoutelis, N., Stavroulakis, G.E., 2018. Investigation of the structural behaviour of a masonry castle by considering the actual damage. *Int. J. Mason. Res.* 3, 1–33. <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1505/IJMRA.2018.100001>
- [66] Wright, L.; Davidson, S. How to tell the difference between a model and a digital twin. *Adv. Model. Simul. Eng. Sci.* 2020, 7, 13. <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4>
- [67] Bolton, A.; Butler, L.; Dabson, I.; Enzer, M.; Evans, M.; Fenemore, T.; Harradence, F. Gemini Principles. (CDBB_REP_006). 2018. <https://www.cdbb.cam.ac.uk/Resources/ResourcePublications/TheGeminiPrinciples.pdf>
- [68] Roest, M. Available online: <https://www.linkedin.com/pulse/five-ways-classify-your-digital-twin-mark-roest>

- [69] Siemens. Available online: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/>
- [70] XMPRO. Available online: <https://xmpro.com/digital-twins-the-ultimate-guide/>
- [71] ARUP. Available online: <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/digital-twins>
- [72] Riveiro, B.; Solla, M. *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure*, 1st ed.; CRC Press: London, UK, 2016. <https://www.routledge.com/Non-Destructive-Techniques-for-the-Evaluation-of-Structures-and-Infrastructure/Riveiro-Solla/p/book/9781138028515>
- [73] Guyan, R.J. Reduction of Stiffness and Mass Matrices. *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J.* 1965, 3, 380–381. <https://doi.org/10.2514/3.2874>
- [74] Allen, M.S.; Rixel, D.; Van der Seijs, M.; Tiso, P.; Abrahamsson, T.; Mayes, R.L. *Substructuring in Engineering Dynamics: Emerging Numerical and Experimental Techniques*, 1st ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-25532-9>
- [75] Stavroulakis, G.E. *Inverse and Crack Identification Problems in Engineering Mechanics*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2000. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04130-0>
- [76] Waszczyszyn, Z.; Ziemiański, L. Neural Networks in the Identification Analysis of Structural Mechanics Problems. In *Parameter Identification of Materials and Structures, CISM International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures)*; Mróz, Z., Stavroulakis, G.E., Eds.; Springer: Vienna, Austria, 2005; Volume 469, pp 285–350. <https://doi.org/10.1007/3-211-27377-9>
- [77] Mróz, Z.; Stavroulakis, G.E. (Eds.) *Parameter Identification of Materials and Structures, CISM International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures)*; Springer: Vienna, Austria, 2005; Volume 469.
- [78] Aster, R.C.; Borchers, B.; Thurber, C.H. *Parameter Estimation and Inverse Problems*, 3rd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018.
- [79] Gallet, A.; Rigby, S.; Tallman, T.N.; Kong, X.; Hajirasouliha, I.; Liew, A.; Liu, D.; Chen, L.; Hauptmann, A.; Smyl, D. Structural engineering from an inverse problems perspective. *Proc. R. Soc. A* 2022, 478, 20210526. <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0526>
- [80] Huang, D.Z.; Schneider, T.; Stuart, A.M. Iterated Kalman methodology for inverse problems. *J. Comput. Phys.* 2022, 463, 111262. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111262>
- [81] Bado, M.F.; Tonelli, D.; Poli, F.; Zonta, D.; Casas, J.R. Digital Twin for Civil Engineering Systems: An Exploratory Review for Distributed Sensing Updating. *Sensors* 2022, 22, 3168. <https://doi.org/10.3390/s22093168>
- [82] Ye, C.; Butler, L.; Calka, B.; Iangurazov, M.; Lu, Q.; Gregory, A.; Girolami, M.; Middleton, C. A digital twin of bridges for structural health monitoring. In *Structural Health Monitoring: Enabling Intelligent Life-Cycle Health Management for Industry Internet of Things (IIOT)*, Proceedings of the 12th International Workshop on Structural Health Monitoring, Online, 10–12 September 2019; Stanford University: Stanford, CA, USA, 2019; Volume 1, pp. 1619–1626.
- [83] Shim, C.; Kang, H.; Dang, N. Digital Twin Models for Maintenance of Cable-Supported Bridges. In *Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction*, Cambridge, UK, 8–10 July 2019; pp. 737–742.
- [84] Jiang, F.; Ding, Y.; Song, Y.; Geng, F.; Wang, Z. Digital twin-driven framework for fatigue lifecycle management of steel bridges. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2022. <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2135130>
- [85] Benzon, H.-H.; Chen, X.; Belcher, L.; Castro, O.; Branner, K.; Smit, J. An Operational Image-Based Digital Twin for Large-Scale Structures. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3216. <https://doi.org/10.3390/app12063216>

- [86] Rojas-Mercedes, N.; Erazo, K.; Di Sarno, L. Seismic fragility curves for a concrete bridge using structural health monitoring and digital twins. *Earthq. Struct.* 2022, 22, 503–515. <https://doi.org/10.12989/eas.2022.22.6.503>
- [87] Mahmoodian, M.; Shahriver, F.; Setunge, S.; Mazaheri, S. Development of Digital Twin for Intelligent Maintenance of Civil Infrastructure. *Sustainability* 2022, 14, 8664. <https://doi.org/10.3390/su14148664>
- [88] Pagliari, L.; Nezzi, C.; Fraccaroli, L.; Concli, F. Development of a FEM Model for the Digital Twin Application and the Monitoring of CorTen Road Barriers in the Autonomous Province of Bozen/Bolzano. In *Managing and Implementing the Digital Transformation; ISIEA 2022; Lecture Notes in Networks and Systems*, Matt, D.T., Vidoni, R., Rauch, E., Dallasega, P., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2022; Volume 525. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06622-2_13
- [89] Casas Rius, J.R.; Chacón Flores, R.A.; Stipanovic, I.; Škaric Palic, S.; Ramonell Cazador, C. D5.1 SHM Digital Twin Requirements for Residential, Industrial Buildings and Bridges. 2022. <http://hdl.handle.net/2117/366624>
- [90] Rageh, A.; Azam, S.E.; Alomari, Q.; Linzell, D.; Wood, R. Chapter 10: Model updating and parameter identification for developing digital twins for riveted steel railway bridges. In *Recent Developments in Structural Health Monitoring and Assessment—Opportunities and Challenges*; World Scientific: Singapore, 2022; pp. 285–318. https://doi.org/10.1142/9789811240800_0010
- [91] Fahim, M.; Sharma, V.; Cao, T.V.; Canberk, B.; Duong, T.Q. Machine learning-based digital twin for predictive modeling in wind turbines. *IEEE Access* 2022, 10, 14184–14194. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3148434>
- [92] General Electric. Available online: <https://www.ge.com/digital/industrial-managed-services-remote-monitoring-for-iiot/>
- [93] Lu, J.; Yang, Z.; Zheng, X.; Wang, J.; Kiritsis, D. Exploring the concept of Cognitive Digital Twin from model-based systems engineering perspective. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022, 121, 5835–5854. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08168-3>
- [94] Abdalla, K.M.; Stavroulakis, G.E. A Backpropagation Neural Network Model for Semi-rigid Steel Connections. *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 1995, 10, 77–87. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.1995.tb00251.x>
- [95] Akselos. Available online: <https://akselos.com/knowledge-base/digital-twins-for-structural-condition-assessment-for-power-station/>
- [96] Hamdia, K.; Zhuang, X.; Rabczuk, T. An efficient optimization approach for designing machine learning models based on genetic algorithm. *Neural Comput. Appl.* 2021, 33, 1923–1933. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05040-z>
- [97] Protopapadakis, E.; Schauer, M.; Pierri, E.; Doulamis, A.D.; Stavroulakis, G.E.; Boehrsen, J.-U.; Langer, S. A genetically optimized neural classifier applied to numerical pile integrity tests considering concrete piles. *Comput. Struct.* 2016, 162, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.01.004>
- [98] Yagawa, G.; Oishi, A. *Computational Mechanics with Neural Networks*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4722-7>
- [99] Raissi, M.; Perdikaris, P.; Karniadakis, G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *J. Comput. Phys.* 2019, 378, 686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
- [100] Katsikis, D.; Muradova, A.D.; Stavroulakis, G.E. A Gentle Introduction to Physics-Informed Neural Networks, with Applications in Static Rod and Beam Problems. *J. Adv. Appl. Comput. Math.* 2022, 9, 103–128. <https://doi.org/10.36937/jaacm.2022.003.006>
- [101] Futai, M.M.; Bittencourt, T.N.; Carvalho, H.; Ribeiro, D.M. Challenges in the application of digital transformation to inspection and maintenance of bridges. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2022, 18. <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2151673>

- [102] Chen, K.; Eskandari Torbaghan, M.; Chu, M.; Zhang, L.; Garcia-Hernández, A. Identifying the most suitable machine learning approach for a road digital twin. *Smart Infrastruct. Constr.* 2021, 174, 88–101. <https://doi.org/10.1680/jsmic.21.00027>
- [103] Akselos. Available online: <https://akselos.com/knowledge-base/a-systems-approach-to-structural-digital-twins-harnessing-data-sensors-and-robotics/>
- [104] ASDEA. Available online: <https://asdeasoft.net/?digital-twinning>
- [105] Schroeder, G.; Steinmetz, C.; Pereira, C.E.; Muller, I.; Garcia, N.; Espindola, D.; Rodrigues, R. Visualising the digital twin using web services and augmented reality. In *Proceedings of the 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Poitiers, France, 19–21 July 2016; pp. 522–527. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2016.7819251>
- [106] Künz, A.; Rosmann, S.; Loria, E.; Pirker, J. The Potential of Augmented Reality for Digital Twins: A Literature Review. In *Proceedings of the 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Christchurch, New Zealand, 12–16 March 2022; pp. 389–398. <https://doi.org/10.1109/VR51125.2022.00058>