



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

ΔΙΠΜΣ «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων (αλγορίθμων) γένεσης τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων

ΤΟΥ
ΑΛΕΞΑΝΔΡΙΔΗ ΘΕΟΔΩΡΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Copyright © ΑΛΕΞΑΝΔΡΙΔΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Alexandridis Theodoros, 2024

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διδακτορικής μου διατριβής, Καθηγητή Μιχαήλ Φραγκιαδάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε χορηγώντας μου αυτό το θέμα και για την αμέριστη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου. Επίσης, θέλω να εκφράσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Μανόλη Γεωργιουδάκη, ο οποίος με καθοδήγησε στην πορεία αυτής της διαδικασίας, παρέχοντάς μου την αναγκαία καθοδήγηση και πολύτιμες συμβουλές. Επίσης, δεν μπορώ παρά να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Ήρα Γιάννη για την προσφορά του κώδικα που χρησιμοποίησα στην εργασία μου.

Τέλος, θέλω να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη προς την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη και κατανόησή τους καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της απαιτητικής περιόδου σπουδών μου. Η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη συνεχή τους υποστήριξη και ενθάρρυνση.

Εκφράζω, λοιπόν, τα θερμά μου ευχαριστήρια σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας με τον δικό τους τρόπο.

Αλεξανδρίδης Θεόδωρος



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΠΜΣ «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων (αλγορίθμων) γένεσης τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων

Αλεξανδρίδης Θεόδωρος

Επιβλέπων: Μιχαήλ Φραγκιαδάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα επιταχυνσιογραφήματα αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών, ειδικότερα όταν αυτές παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά. Η χρήση πραγματικών επιταχυνσιογραφημάτων επιτρέπει την ρεαλιστική προσομοίωση ενός σεισμικού γεγονότος. Ωστόσο, η περιορισμένη διαθεσιμότητα σεισμικών καταγραφών μεγάλης έντασης για αρκετές περιοχές μελέτης, καθώς επίσης και το γεγονός ότι η διαθεσιμότητα καταγραφών περιορίζεται μόνο σε καταγραφές των τελευταίων δεκαετιών, καθιστούν την παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων ιδιαίτερα σημαντική. Η διαθεσιμότητα προγραμματιστικών εργαλείων για την εφαρμογή τέτοιων μεθόδων είναι περιορισμένη και στην πλειονότητα τους αφορούν εμπορικά λογισμικά. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την ανάπτυξη ενός λογισμικού εργαλείου για την εφαρμογή και την συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων παραγωγής τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι που έχουν προταθεί στην διεθνή βιβλιογραφία (προσαρμογή πραγματικών επιταχυνσιογραφημάτων, στοχαστικά στάσιμα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα και στοχαστικά πλήρως μη-στάσιμα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα). Για τις ανάγκες του λογισμικού χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού *Python* αξιοποιώντας κατάλληλες βιβλιοθήκες για την επιτάχυνση σύνθετων διαδικασιών. Τέλος, μέσω ενός κοινού παραδείγματος, έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων αυτών, αξιοποιώντας το λογισμικό που δημιουργήθηκε, με κατάλληλα μετρικά και με παράλληλη εξαγωγή ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών τους.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

MSc "ANALYSIS AND DESIGN OF STRUCTURES"

MASTER THESIS

Comparison assessment of various methodologies on generation of artificial accelerograms

Alexandridis Theodoros

Supervisor: Michalis Fragkiadakis, Associate Professor

ABSTRACT

This thesis focuses on methods that produce artificial accelerograms. Based on the literature, three different methods are studied, and their results are compared. For this work, an autonomous software environment was created in the Python programming language, through which users can utilize the methods for generating new artificial accelerograms and presenting various quantitative characteristics. Finally, the results of these methods are presented through the software, and a qualitative comparison is made.

In Chapter 1, the thesis outlines the motivation behind the work and provides an overview of the literature used throughout the writing process.

Chapter 2 delves into the core methodologies proposed in the literature for accelerogram generation, including artificial, synthetic, and real accelerogram adjustment techniques. This examination lays the foundation for understanding the various approaches used in seismic engineering research.

Moving to Chapter 3, the three methodologies selected for study are presented, each offering distinctive approaches for the generation of artificial accelerograms. Method 1 corresponds to the adaptation of real accelerograms, proposed by Ferreira et al. (2020), where existing records are modified to produce artificial accelerograms. This method includes scaling the original accelerogram in the time domain to match a target spectrum, followed by iterative convergence to achieve compatibility with the target spectrum, employing Fourier transformation for frequency domain modification, and finally, transforming back to the time domain.

For Method 2, the papers of Shinozuka and Deodatis (1991) and Cacciola et al. (2004) are being cited. This method focuses on stochastic, stationary artificial accelerograms. It employs spectral representation methods to generate artificial signals, incorporating random phase differences and harmonic functions to produce stochastic stationary accelerograms. The generated signals undergo iterative adjustments to match the target spectrum and ensure compatibility through repeated convergence processes.

Method 3 constitutes an extension of Method 2. For its analysis, the study of Cacciola et al. (2010) has been reviewed. This new method introduces stochastic, non-stationary artificial accelerograms. Building upon the spectral representation method, this approach combines existing seismic recordings with stochastic stationary signals to create fully non-stationary accelerograms. Another important element is that Method 3 utilizes a combination of the spectral representation technique and an envelope function that derives from the initial seismic recordings, ensuring both stochastic nature and compatibility with the target response spectrum.

In Chapter 4, the focus shifts to the designed software that is tailored for the implementation of the studied methodologies. In this context, an autonomous software environment was developed to allow the implementation of various methodologies associated with the generation of accelerograms, especially artificial ones. Developed in the Python programming language using the PyCharm environment, this software offers a user-friendly graphical interface with data input fields and presentation charts.

The narrative transitions to Chapter 4, where the focus shifts to the designed software, which is tailored for the implementation of the studied methodologies. A key point of this software lies on its graphical user interface and the comprehensive examination of its multifaceted functionalities, underscoring its indispensability in the realm of accelerogram generation.

Next, Chapter 5 focuses on the comparative analysis of three methodologies that all employ the same illustrative example. Utilizing the software developed and introduced earlier, all methodologies were applied, and results were extracted.

The example data encompassed the definition of a common elastic acceleration spectrum from EC8, serving as the foundation for deriving compatible generated accelerograms. Additionally, for the implementation of methodologies 1 and 3, a seed record was established, derived from a genuine seismic event, specifically the Athens earthquake of 13/9/1986.

The outcomes for each methodology were assessed in 1, 5 and 20 steps. An examination of the alignment between the original recording and the generated accelerograms unveiled noteworthy observations. Furthermore, the compatibility between the spectral acceleration diagrams of the generated accelerograms and the target spectrum was scrutinized, elucidating the efficacy of each methodology.

The analysis revealed a progression in the degree of convergence with the target spectrum across the methodologies, which highlights notable distinctions in their approaches and outcomes.

Finally, the dissipation of seismic energy over time is observed. All methodologies exhibit a significant duration much greater compared to the original input accelerogram, suggesting limitations in simulating real seismic behaviour. Additionally, the destructiveness of the generated accelerograms is evaluated using common metric indices that reveal variations among the methodologies. These findings underscore the complexities in accurately capturing seismic phenomena and highlight the importance of refining simulation methodologies for enhanced structural analysis.

In Chapter 6, the narrative reaches some conclusive insights derived from this thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο της Εργασίας, Κίνητρο Και Υπόβαθρο	1
1.2	Βιβλιογραφική επισκόπηση	3
1.3	Διάρθρωση εργασίας.....	3
2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	5
2.1	Το πλαίσιο του EC8 για την χρήση επιταχυνσιογραφήματων στην ανάλυση των κατασκευών 5	
2.2	Φάσματα απόκρισης	7
2.3	Χαρακτηριστικά επιταχυνσιογραφήματων	9
2.4	Κατηγορίες Μεθόδων	11
2.4.1	Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα (Artificial Accelerograms).....	12
2.4.2	Συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα (Synthetic Accelerograms)	14
2.4.3	Προσαρμογή Πραγματικών Επιταχυνσιογραφήματων (Real accelerograms adjustment).....	15
3	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	17
3.1	Μέθοδος 1: Προσαρμογή πραγματικών επιταχυνσιογραφήματων	17
3.2	Μέθοδος 2: Στοχαστικά, στάσιμα, τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα	19
3.3	Μέθοδος 3: Στοχαστικά, μη-στάσιμα, τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα	20
4	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	23
4.1	Το γραφικό περιβάλλον (GUI)	24
4.1.1	Εισαγωγή Δεδομένων (Pre-processor).....	25
4.1.2	Εισαγωγή καταγραφής	27
4.2	Παραγωγή επιταχυνσιογραφήματος (Processor)	31
4.2.1	Υπολογισμός ελαστικού φάσματος απόκρισης σύμφωνα με τον EC8.....	31
4.2.2	Υπολογισμός του φάσματος απόκρισης χρονοϊστορίας επιταχυνσιογραφήματος	33
4.2.3	Διόρθωση γραμμής βάσης (baseline correction).....	36
4.2.4	Μετασχηματισμός Φουριέ.....	36
4.2.5	Χρήση παράλληλου προγραμματισμού & JIT μεταγλώττισης	37
4.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων (Post-processor).....	38
5	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	50
5.1	Δεδομένα Παραδείγματος.....	50
5.1.1	1 ^η επανάληψη.....	52
5.1.2	5 ^η επανάληψη.....	56
5.1.3	20 ^η επανάληψη	60

5.1.4 Κατανομή ενέργειας στον χρόνο & καταστρεπτικότητα.....	64
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΞΕΛΙΞΗ.....	68
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της Εργασίας, Κίνητρο Και Υπόβαθρο

Οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις στην επιστήμη των υπολογιστών, σε συνδυασμό με τις συνεχείς βελτιώσεις στην υπολογιστική ισχύ, έχουν επαναπροσδιορίσει τον τομέα της μηχανικής των κατασκευών. Οι μηχανικοί εργάζονται συνεχώς για την ανάπτυξη νέων καλύτερων μεθόδων ανάλυσης με στόχο τον σχεδιασμό οικονομικότερων και ταυτόχρονα ασφαλέστερων κατασκευών. Οι δυναμικές μη γραμμικές μέθοδοι αποτελούν την αιχμή του δόρατος στην επιστήμη του δομοστατικού μηχανικού, για την προσομοίωση της πραγματικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτών των προηγμένων αναλυτικών μεθόδων εξαρτάται από την ακρίβεια αναπαράστασης των δεδομένων εισόδου, όπως π.χ. των παραμέτρων του υλικού και των φορτίων στις κατασκευές. Ο προσδιορισμός των φορτίων που πρόκειται να ασκηθούν σε μια κατασκευή, και ιδιαίτερα ακριβέστερων δεδομένων δυναμικών φορτίων, όπως τα σεισμικά φορτία, αποτελεί σημαντική πρόκληση. Ωστόσο, η χρήση υψηλής ακρίβειας αναλυτικών εργαλείων με δεδομένα εισόδου χαμηλής ανάλυσης μειώνει τη συνολική ακρίβεια, και κατά συνέπεια αναιρεί το πλεονέκτημα που διαθέτει μια ακριβής μη γραμμική μέθοδος εξ' αρχής. Συνεπώς, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για βελτιωμένα μοντέλα για τον προσδιορισμό των δυναμικών φορτίων που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν οι κατασκευές κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Το κενό αυτό προσπαθεί να καλύψει η μέθοδος ανάλυσης με χρονοϊστορία επιταχυνσιογραφημάτων.

Στην μελέτη των κατασκευών, η μέθοδος αυτή στην πράξη παραμένει ακόμα μια εξειδικευμένη πρακτική η οποία σπανίως χρησιμοποιείται σε πραγματικές εφαρμογές κατασκευών. Διαδραματίζει ωστόσο, ένα κρίσιμο ρόλο σε ορισμένα εξειδικευμένα θέματα του μηχανικού. Κάποιες από τις περιπτώσεις όπου επιλέγεται τέτοιου είδους ανάλυση είναι για παράδειγμα γέφυρες, ιδιαίτερα ψηλά κτίρια, κτίρια υψηλής σημασίας για την πολιτεία, ή ακόμα και σε

περιοχές όπου λείπουν επαρκή δεδομένα σεισμών. Επιπρόσθετα, όταν μία μελέτη απαιτεί μη γραμμική ανάλυση, όπως για παράδειγμα στην αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας μιας υφιστάμενης κατασκευής, προτιμάται η χρήση της εναλλακτικής απλούστερης στατικής μεθόδου, δηλαδή της υπερωθητικής (static pushover analysis), η οποία ωστόσο δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε σε κάποιες από τις πολλές σημαντικές αδυναμίες και περιορισμούς της στατικής μη γραμμικής μεθόδου. Συγκεκριμένα, στην στατική υπερωθητική μέθοδο, η σεισμική απόκριση του φορέα σχετίζεται με το αντίστοιχο μονοβάθμιο σύστημα ταλαντωτή, το οποίο συνεπάγεται ότι η σεισμική απόκριση μπορεί να ελεγχθεί μόνο από την κύρια ιδιομορφή και η επίδραση ανώτερων ιδιομορφών ταλάντωσης στη σεισμική απόκριση αγνοείται. Αυτό περιορίζει σημαντικά το εύρος εφαρμογών της συγκεκριμένης μεθόδου, καθώς περιορίζεται σε κτήρια με κανονικότητα και μαζική ομοιομορφία. Ακόμα, στην μέθοδο αυτή αγνοείται πλήρως η πιθανή συνεισφορά της κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας. Ένα ακόμα μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι κατά την προοδευτική εμφάνιση πλαστικών περιοχών στον φορέα, η κατανομή της έντασης δεν μεταβάλλεται, μη λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών του φορέα στην εκάστοτε φάση της ανάλυσης. Όλα αυτά καθιστούν τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση με χρονοϊστορία (με τεχνητά ή φυσικά επιταχυνσιογράφηματα), ιδιαίτερα «ελκυστική» καθώς είναι η μέθοδος με τις λιγότερες απλοποιήσεις σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες μεθόδους που διαθέτει ένας μηχανικός.

Κύριο αντικείμενο της εργασίας αυτής, λοιπόν, αποτελεί η ανάπτυξη ενός νέου προγραμματιστικού εργαλείου για την ανάπτυξη, την εφαρμογή και την σύγκριση διάφορων μεθόδων παραγωγής τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων. Σε πρώτο στάδιο, η εργασία επικεντρώνεται στην βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων παραγωγής επιταχυνσιογραφημάτων που έχουν προταθεί. Έπειτα, επιλέγονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι από την βιβλιογραφία. Για αυτές γίνεται μια πληρέστερη μελέτη της θεωρίας στην οποία βασίζεται η κάθε μία, αλλά και εξετάζονται οι δομές τους σε επίπεδο αλγοριθμικό. Εν συνεχεία, γίνεται μία παρουσίαση του λογισμικού που αναπτύχθηκε, μέσω περιγραφής των δυνατοτήτων του αλλά και του τρόπου λειτουργίας του. Σημαντικό χαρακτηριστικό του λογισμικού αυτού είναι η ύπαρξη ενός γραφικού περιβάλλοντος για την εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό καθώς επίσης και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των τριών αυτών μεθόδων και εξάγονται συμπεράσματα για τις διαφορές, πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα και πεδίο εφαρμογής της κάθε μιας εξεταζόμενης μεθόδου.

1.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στο κομμάτι της συλλογής πληροφοριών για την θεωρία πίσω από την παραγωγή επιταχυνσιογραφημάτων, αποτελείται κυρίως από τα Bommer and Acevedo (2004) [1] και Iervolino et. Al (2008) [2]. Εκεί γίνεται μια συνολική επισκόπηση των σημαντικότερων μεθόδων που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία, και περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος προσέγγισης που ακολουθεί η κάθε μέθοδος. Σύμφωνα με αυτά τα άρθρα γίνεται και η κατηγοριοποίηση των μεθόδων στο κεφάλαιο 2 και ακολουθείται η σχετική ορολογία.

Έπειτα, για τις μεθόδους που εξετάζονται στην παρούσα εργασία έχουν ληφθεί υπόψη τα ακόλουθα. Για την πρώτη μέθοδο (τροποποίηση πραγματικών καταγραφών), ακολουθείται η μέθοδος που προτείνεται στο Ferreira et al. (2020) [3]. Εκεί, ο συγγραφέας παρουσιάζει μια νέα μέθοδο για την παραγωγή επιταχυνσιογραφημάτων, χρησιμοποιεί μια αρχική πραγματική καταγραφή και την τροποποιεί την κατάλληλα στο πεδίο των συχνοτήτων, ώστε να γίνει συμβατή με το φάσμα απόκρισης που επιλέγεται.

Για την δεύτερη μέθοδο (στοχαστικά, στάσιμα, τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα) έχουν μελετηθεί το Shinozuka and Deodatis (1991) [4], όπου προτείνεται η μέθοδος της φασματικής αναπαράστασης (spectral representation method) για την γένεση τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, και το Cacciola et al. (2004) [5], στο οποίο γίνεται χρήση της συνάρτησης πυκνότητας φασματικής ισχύος (PSD function), ούτως ώστε να επιτευχθεί συμβατότητα με το στοχευόμενο φάσμα απόκρισης.

Τέλος, για την τρίτη μέθοδο (στοχαστικά, μη-στάσιμα, τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα), ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στο Cacciola et al. (2010) [6]. Σε αυτό το άρθρο επεκτείνεται η μέθοδος 2, έτσι ώστε με την νέα μέθοδο που προτείνει ο συγγραφέας, να παράγονται πλήρως μη-στάσιμα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα. Για να το επιτύχει αυτό, η μέθοδος αξιοποιεί μια αρχική καταγραφή, η οποία έπειτα επαλληλίζεται με ένα στάσιμο τεχνητό σήμα. Στο τεχνητό αυτό σήμα εφαρμόζεται η συνάρτηση εύρους (envelope function) που προτείνουν οι Jennings et al. (1968) [7], ενώ για την επίτευξη συμβατότητας με το φάσμα στόχου ακολουθείται η διαδικασία που προτείνεται στο Γιαννή et. al [8], κατά την οποία η σύγκλιση γίνεται με τροποποίηση του επιταχυνσιογραφήματος στο πεδίο των συχνοτήτων, όμοια με την μέθοδο 1 [3].

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Η εργασία χωρίζεται στα εξής επιμέρους κεφάλαια:

- Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αρχικά μια ανασκόπηση των διατάξεων του EC8 όσον αφορά τη χρήση των επιταχυνσιογραφημάτων στην μελέτη των κατασκευών και έπειτα γίνεται η

διάκριση των διαφόρων μεθόδων παραγωγής επιταχυνσιογραφημάτων που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία.

- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι τρεις μέθοδοι που επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, και γίνεται μια ανάλυση του τρόπου λειτουργίας τους.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση του λογισμικού που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή των εξεταζόμενων μεθόδων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος αλλά και οι δυνατότητές του.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μία αριθμητική εφαρμογή με τη χρήση του λογισμικού, όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η σύνοψη και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω εξέλιξη του θέματος.

2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

2.1 Το πλαίσιο του EC8 για την χρήση επιταχυνσιογραφημάτων στην ανάλυση των κατασκευών

Όπως οι περισσότεροι κώδικες παγκοσμίως, έτσι και ο Ευρωκώδικας 8 (EC8), παρέχει συγκεκριμένες οδηγίες, μολονότι περιορισμένες, για τη χρήση τους και θεσπίζει ορισμένους κανόνες για την πρακτική εφαρμογή των επιταχυνσιογραφημάτων στη σεισμική ανάλυση κτιρίων [9]. Αναφέρει λοιπόν πως η σεισμική κίνηση μπορεί να αναπαρασταθεί σε όρους χρονοϊστοριών επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης. Όταν χρησιμοποιείται χωρικό μοντέλο της κατασκευής, η σεισμική κίνηση θα πρέπει να αποτελείται από τρία (3) επιταχυνσιογράφημα που δρουν ταυτόχρονα. Ωστόσο, το ίδιο επιταχυνσιογράφημα δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα κατά μήκος και πλάτος.

Ο κανονισμός διακρίνει δύο κύριους τύπους επιταχυνσιογραφημάτων, τα *τεχνητά επιταχυνσιογράφημα* και τις *καταγραφές ή προσομοιώσεις επιταχυνσιογραφημάτων* και ορίζει συγκεκριμένες οδηγίες για την χρήση τους.

Τεχνητά Επιταχυνσιογράφημα:

- Τα τεχνητά επιταχυνσιογράφημα θα πρέπει να είναι συμβατά με τα ελαστικά φάσματα απόκρισης που παρέχονται στον EC8.
- Η διάρκεια των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων πρέπει να αντιστοιχεί με το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του σεισμικού γεγονότος, ενώ όταν υπάρχουν ελλιπή δεδομένα για μία περιοχή η ελάχιστη διάρκεια T_s του στάσιμου μέρους των επιταχυνσιογραφημάτων θα πρέπει να είναι δέκα (10) δευτερόλεπτα.

- Η συλλογή των τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον τρία επιταχυνσιογραφήματα.
- Η τιμή του μέσου φάσμα απόκρισης των επιλεχθέντων τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή του $\alpha_g.S$ για την τοποθεσία, για $T = 0$. (δηλαδή $S_{(T=0)} > \alpha_g.S$)
- Στο εύρος των περιόδων μεταξύ $0,2T_1$ και $2 T_1$ (όπου T_1 είναι η δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος του φορέα), καμία τιμή του μέσου φάσματος απόκρισης δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 90% της αντίστοιχης τιμής του ελαστικού φάσματος απόκρισης.

Καταγραφές ή Προσομοιώσεις Επιταχυνσιογραφήματων:

Επιτρέπεται επίσης η χρήση πραγματικών καταγραφών ή προσομοιωμένων επιταχυνσιογραφήματων τα οποία παράγονται μέσω προσομοίωσης των σεισμογεννητικών μηχανισμών πηγής και διάδοσης, εφόσον ανταποκρίνονται στην περιοχή μελέτης του έργου, και αφού κλιμακωθούν στην κατάλληλη τιμή $\alpha_g.S$ για τη ζώνη που εξετάζεται. Ακόμα, όπως και στα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, ομοίως και εδώ ορίζονται οι εξής κανόνες:

- Η συλλογή των επιταχυνσιογραφήματων πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον τρία επιταχυνσιογραφήματα.
- Η τιμή του μέσου φάσμα απόκρισης των επιλεχθέντων επιταχυνσιογραφήματων, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή του $\alpha_g.S$ για την τοποθεσία, για $T = 0$. (δηλαδή $S_{(T=0)} > \alpha_g.S$)
- Στο εύρος των περιόδων μεταξύ $0,2T_1$ και $2 T_1$ (όπου T_1 είναι η δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος του φορέα), καμία τιμή του μέσου φάσματος απόκρισης δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 90% της αντίστοιχης τιμής του ελαστικού φάσματος απόκρισης.

Όταν επιλέγεται η μέθοδος ανάλυσης με χρονοϊστορία, συνήθως πρακτική αποτελεί να επιλέγονται τουλάχιστον επτά (7) στον αριθμό επιταχυνσιογραφήματα, κάθε ένα από τα οποία περιλαμβάνουν δυο συνιστώσες στην οριζόντια διεύθυνση. Το κριτήριο επιλογής των καταγραφών αυτών (είτε τεχνητών είτε πραγματικών) είναι για την κάθε μία, τα σεισμογεννητικά χαρακτηριστικά της πηγής τους να ανταποκρίνονται στην περιοχή μελέτης, καθώς επίσης και το μέσο ελαστικό φάσμα που απορρέει από αυτές να είναι εντός των αποδεκτών αποκλίσεων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από το ελαστικό φάσμα που ορίζει ο κανονισμός για την περιοχή.

Συνηθέστερη πρακτική για την ανάλυση κατασκευών με χρονοϊστορία επιταχυνσιογραφήματων, είναι η επιλογή πραγματικών καταγραφών (αυτούσιων ή τροποποιημένων). Μια τέτοια μέθοδος επιλογής πραγματικών καταγραφών είναι αυτή του *mean spectrum matching*, κατά την οποία αναζητούνται κατάλληλα επιταχυνσιογραφήματα με

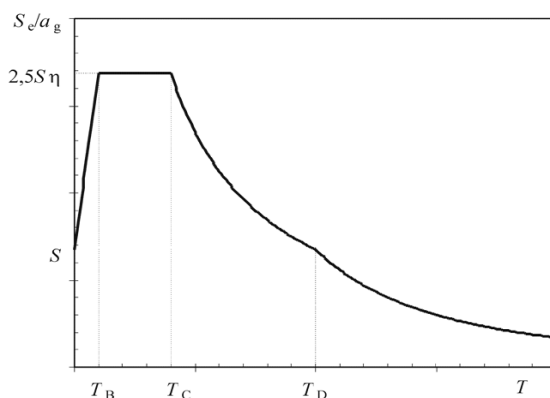
ή χωρίς κλιμάκωση τους στο πεδίο του χρόνου, έτσι ώστε το μέσο φάσμα αυτών να είναι συμβατό με το στοχευόμενο φάσμα απόκρισης.

Ωστόσο, η περιορισμένη διαθεσιμότητα σεισμικών καταγραφών μεγάλης έντασης για αρκετές περιοχές μελέτης, καθώς επίσης και το γεγονός ότι η διαθεσιμότητα καταγραφών περιορίζεται μόνο σε καταγραφές των τελευταίων δεκαετιών, καθιστούν την παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων ιδιαίτερα σημαντική. Ακόμα, η χρήση πραγματικών επιταχυνσιογραφήματων από άλλες γεωγραφικές περιοχές για την προσομοίωση ενός σεισμικού γεγονότος, ακόμα και όταν αυτές έχουν όμοια εδαφικά χαρακτηριστικά με την περιοχή που μελετάτε, εγείρει αρκετά ερωτηματικά ως προς την συμβατότητα τους με την περιοχή μελέτης.

Στη δυσκολία εύρεσης κατάλληλων καταγραφών επίσης, αναφέρεται και το άρθρο [2], όπου καταλήγει πώς η ιδιαιτερότητα της εδαφικής κατηγορίας της περιοχής μελέτης και η σπάνια εύρεση καταγραφών που να προέρχονται από παρόμοιες εδαφικές συνθήκες (όπως για παράδειγμα μαλακά εδάφη κατηγορίας D και E) ενδέχεται να οδηγήσει σε αδυναμία εύρεσης του απαιτούμενου αριθμού κατάλληλων επιταχυνσιογραφήματων.

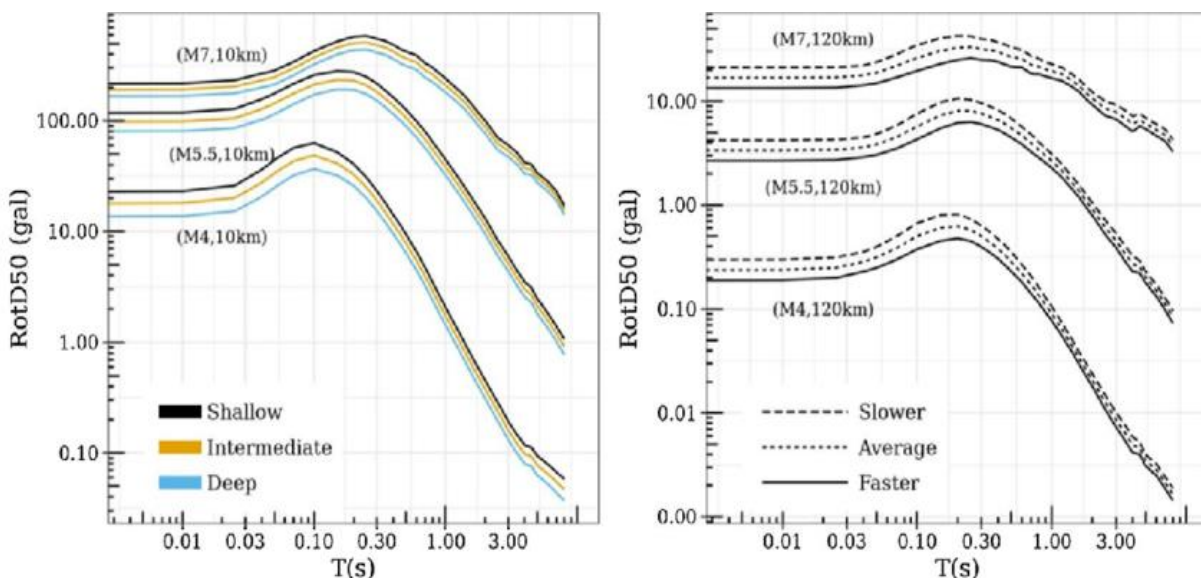
2.2 Φάσματα απόκρισης

Τα φάσματα απόκρισης αναπαριστούν τη μέγιστη απόκριση μιας κατασκευής, σε όρους επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετατόπισης, για διαφορετικές ιδιοπεριόδους αυτής λόγω μιας εδαφικής σεισμικής διέγερσης. Οι περισσότεροι μέθοδοι παραγωγής επιταχυνσιογραφήματων χρησιμοποιούν το φάσμα απόκρισης του EC8 ή άλλων αντίστοιχων διεθνών αντισεισμικών κανονισμών, έτσι ώστε τα παραγόμενα επιταχυνσιογραφήματα να είναι συμβατά με τον εκάστοτε κανονισμό. Τα φάσματα αυτά προέκυψαν ύστερα από στατιστική ανάλυση διάφορων σεισμικών καταγραφών και προσπαθούν να προσδιορίσουν την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση που προβλέπεται να αναπτυχθεί σε μία περιοχή λόγω μιας σεισμικής διέγερσης, για δεδομένη περίοδο επαναφοράς. Η μορφή του ελαστικού φάσματος που ορίζει ο EC8 φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



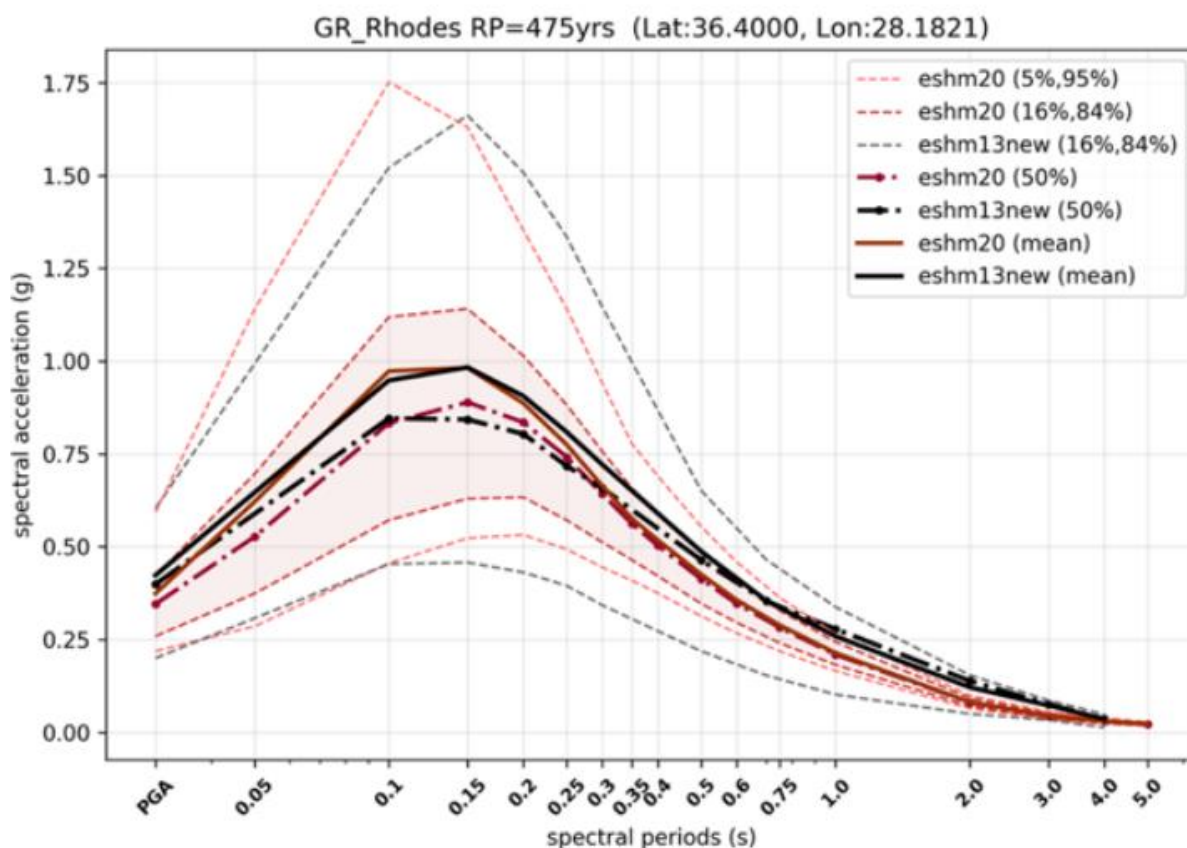
Εικόνα 2.1: Μορφή του ελαστικού φάσματος απόκρισης κατά τον EC8, [9]

Εκτός από το φάσμα απόκρισης του EC8 και άλλων παρόμοιων αντισεισμικών κανονισμών, έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία και άλλα φάσματα. Μια κατηγορία τέτοιων φασμάτων, προκύπτουν μέσω διάφορων μοντέλων προσομοίωσης της εδαφικής κίνησης (Ground Motion Models). Έχουν προταθεί διάφορα τέτοια μοντέλα, π.χ. Boore and Atkinson (2008). Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν διάφορες παραμέτρους σχετικές με την σεισμική διέγερση, και εξάγουν φάσματα απόκρισης συμβατά με την περιοχή μελέτης. Τέτοιες παράμετροι συνήθως αποτελούν μεγέθη όπως η σεισμική ένταση, η επικεντρική απόσταση, ο τύπος του σεισμικού ρήγματος, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κλπ. Με τον τρόπο αυτό παράγονται φάσματα απόκρισης ειδικά προσαρμοσμένα στην περιοχή που εξετάζεται, δίνοντας ιδιαίτερη αξία σε αυτά. Στην Εικόνα 2.2 φαίνονται τα διαγράμματα φασματικής επιτάχυνσης που προκύπτουν με εφαρμογή ενός τέτοιου μοντέλου για διάφορες τιμές εστιακού βάθους.



Εικόνα 2.2: Παραγόμενο Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων μέσω μεθόδων (GMM) (Kotha et al. (2020))

Μια ακόμα κατηγορία είναι αυτή των φασμάτων σταθερής σεισμικής επικινδυνότητας (Uniform hazard spectra). Πρόκειται για φάσματα απόκρισης με ίση πιθανότητα υπέρβασης (π.χ. 10% σε 50 έτη) σε όλες τις ιδιοπεριόδους. Υπολογίζονται μέσω μοντέλων πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου (PSHA), τα οποία ενσωματώνουν δεδομένα της σεισμικής πηγής, ιστορικό σεισμικών γεγονότων, εξισώσεις πρόβλεψης σεισμικών κινήσεων και χαρακτηριστικά της τοποθεσίας μελέτης. Ένα τέτοιο μοντέλο αποτελεί το European Seismic Hazard Model (ESHM20). Στο διάγραμμα της εικόνας Εικόνα 2.3, συγκεντρώνονται τα φάσματα σταθερής σεισμικής επικινδυνότητας που προέκυψαν με τα μοντέλα ανάλυσης κινδύνου (ESHM20 και ESHM13), για την περιοχή της Ρόδου.



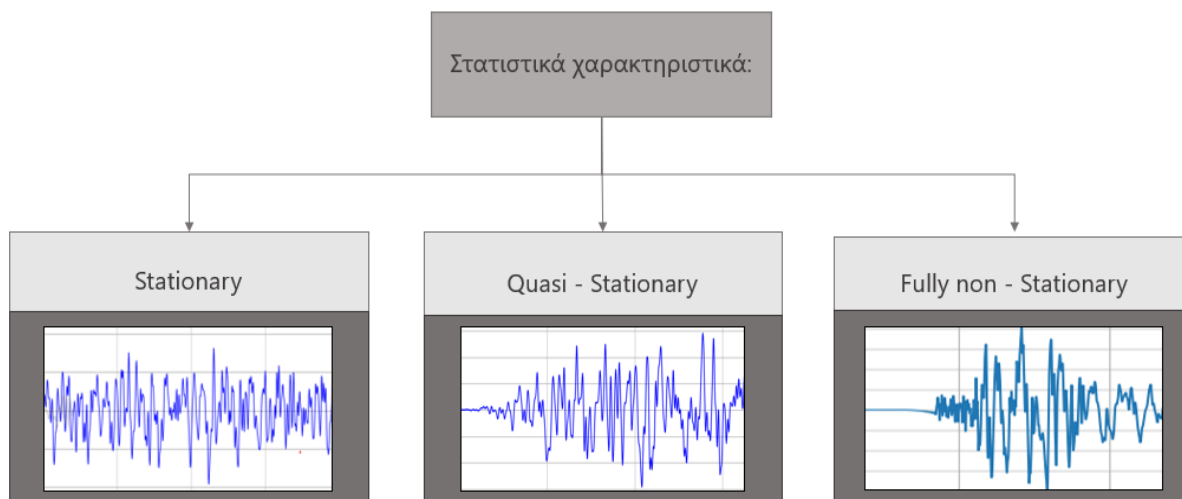
Εικόνα 2.3: Φάσματα σταθερής σεισμικής επικινδυνότητας (UHS) για την περιοχή της Ρόδου (ESHM20)

2.3 Χαρακτηριστικά επιταχυνσιογραφήματων

Πριν αναφερθούμε στις μεθόδους παραγωγής επιταχυνσιογραφήματων, θα ήταν δόκιμο να ορίσουμε κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν ένα επιταχυνσιογράφημα.

Αρχικά, ο τρόπος κατά τον οποίο εξελίσσεται ένα επιταχυνσιογράφημα κατά την πάροδο του χρόνου το κατατάσσει σε στάσιμο (stationary), μερικώς μη-στάσιμο (quasi non-stationary) και πλήρως μη-στάσιμο (fully non-stationary). Τα σταθερά σήματα εμφανίζουν σταθερές στατιστικές ιδιότητες κατά την πάροδο του χρόνου, ενώ τα μη σταθερά σήματα εμφανίζουν χρονικά μεταβαλλόμενες στατιστικές ιδιότητες. Τα μερικώς μη στάσιμα σήματα, εμφανίζουν μεταβλητότητα σε κάποια μόνο στατιστικά χαρακτηριστικά τους. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η μεταβλητότητα αυτή αναφέρεται στην εξέλιξη του εύρους του πλάτους ενός επιταχυνσιογραφήματος. Αυτή η διάκριση είναι κρίσιμη στη σεισμική ανάλυση, καθώς αντικατοπτρίζει την ποικιλία και την πολυπλοκότητα της κίνησης του εδάφους. Έτσι, τα πλήρως μη-στάσιμα επιταχυνσιογραφήματα θεωρούνται τα πιο κατάλληλα για την προσομοίωση της σεισμικής καταπόνησης στις κατασκευές. Παρακάτω, στην Εικόνα 2.4, παρατίθενται κάποιες

χαρακτηριστικές μορφές χρονοϊστοριών των τριών αυτών κατηγοριών επιταχυνσιογραφημάτων.

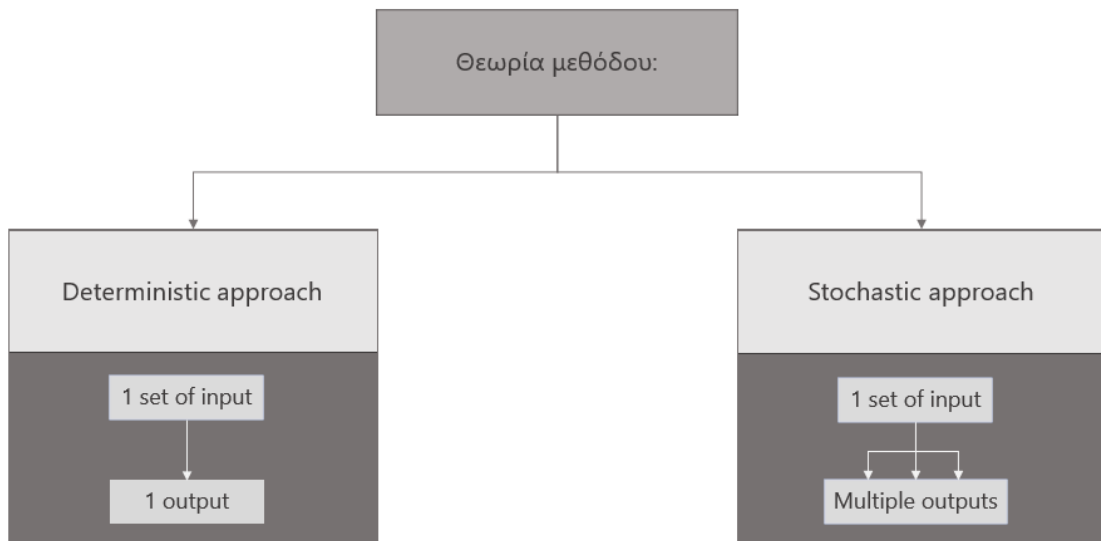


Εικόνα 2.4: Διάκριση επιταχυνσιογραφημάτων με βάση τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της μεθόδου που ακολουθείται είναι η θεωρία που τη διέπει, και τα κατατάσσουμε σε ντετερμινιστικά και στοχαστικά (Εικόνα 2.5).

Οι ντετερμινιστικές μέθοδοι, χρησιμοποιούν ένα σετ δεδομένων και παράγουν ένα μονοσήμαντο σετ αποτελεσμάτων. Λειτουργούν δηλαδή, υπό την υπόθεση ότι η μελλοντική κατάσταση μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα, βάσει των γνωστών παραμέτρων και των φυσικών νόμων. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει μια διαφανή σχέση αιτίου και αποτελέσματος μεταξύ των δεδομένων εισόδου και των αποτελεσμάτων, διευκολύνοντας την απλή ερμηνεία. Για την παραγωγή ενός αριθμού επιταχυνσιογραφημάτων απαιτείται και ο προσδιορισμός του ανάλογου αριθμού παραμέτρων. Επιπλέον, οι ντετερμινιστικές μέθοδοι είναι υπολογιστικά αποδοτικές και απαιτούν λιγότερα δεδομένα για ακριβείς προβλέψεις.

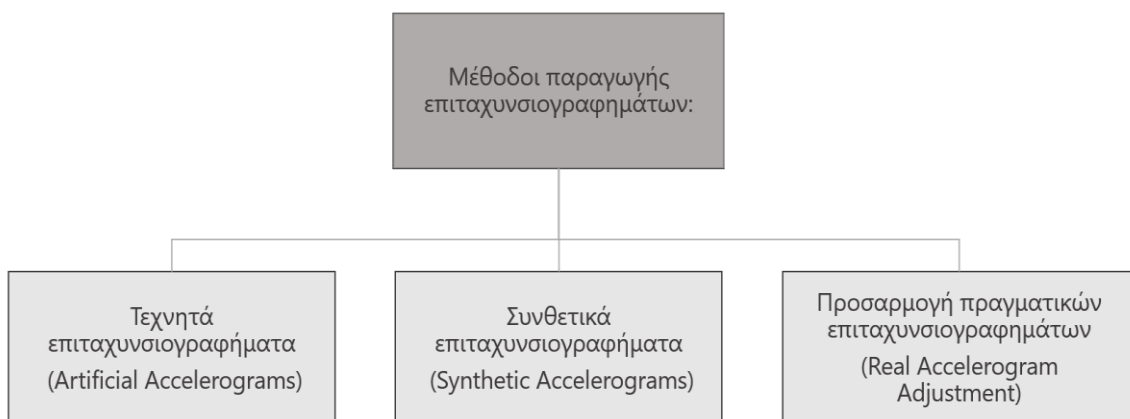
Από την άλλη πλευρά, οι στοχαστικές μέθοδοι εισάγουν τυχαιότητα και αβεβαιότητα στη διαδικασία μοντελοποίησης, αντανακλώντας την εφαρμογή τους στην αξιολόγηση κινδύνου. Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη την πιθανότητα διαφορετικών αποτελεσμάτων και παρέχουν ένα εύρος πιθανών αποτελεσμάτων. Οι στοχαστικές μέθοδοι εξειδικεύονται στην αποτύπωση της εγγενούς αβεβαιότητας των σεισμικών γεγονότων. Συνήθως απαιτούν περισσότερα δεδομένα και υπολογιστικούς πόρους σε σύγκριση με τις ντετερμινιστικές προσεγγίσεις. Αντίθετα από τις ντετερμινιστικές μεθόδους, οι στοχαστικές μέθοδοι είναι ικανές να παράγουν απεριόριστα αποτελέσματα με βάση ένα μόνο σύνολο δεδομένων εισόδου. Επιπλέον, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των στοχαστικών μοντέλων απαιτεί μια λεπτομερή κατανόηση των πιθανοτήτων και των στατιστικών εννοιών.



Εικόνα 2.5: Διάκριση σε Στοχαστικά - Ντετερμινιστικά μοντέλα

2.4 Κατηγορίες Μεθόδων

Έχουν προταθεί πάρα πολλές μέθοδοι παραγωγής επιταχυνσιογραφήματων στην βιβλιογραφία. Έως τώρα, δεν έχει υπάρξει κάποιος ενδεδειγμένος τρόπος για την διάκριση των μεθόδων αυτών σε κατηγορίες. Έτσι, διαφορετικές απόψεις συναντώνται ως προς την ορολογία. Σε αυτήν την ενότητα, ακολουθείται η πιο κοινά αποδεκτή κατηγοριοποίηση των μεθόδων παραγωγής επιταχυνσιογραφήματων. Συγκεκριμένα διακρίνουμε τα *τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα* (*artificial accelerograms*), τα *συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα* (*synthetic accelerograms*), και την *προσαρμογή πραγματικών επιταχυνσιογραφήματων* (*real accelerograms adjustment*) (Εικόνα 2.6).



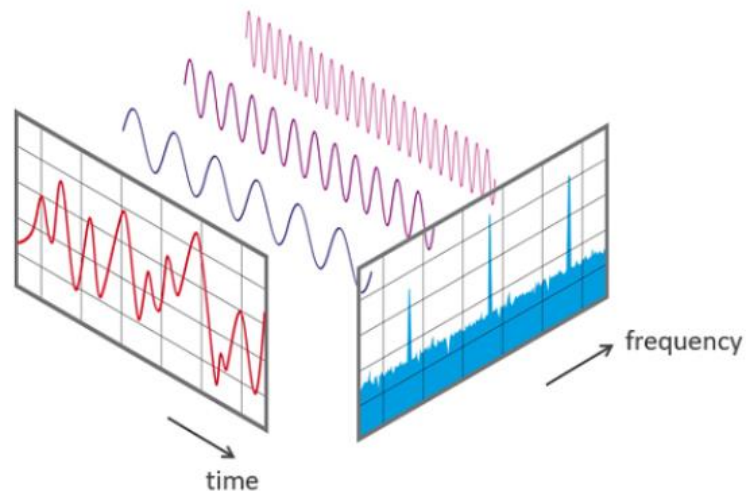
Εικόνα 2.6: Κατηγορίες μεθόδων παραγωγής επιταχυνσιογραφήματων

2.4.1 Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα (Artificial Accelerograms)

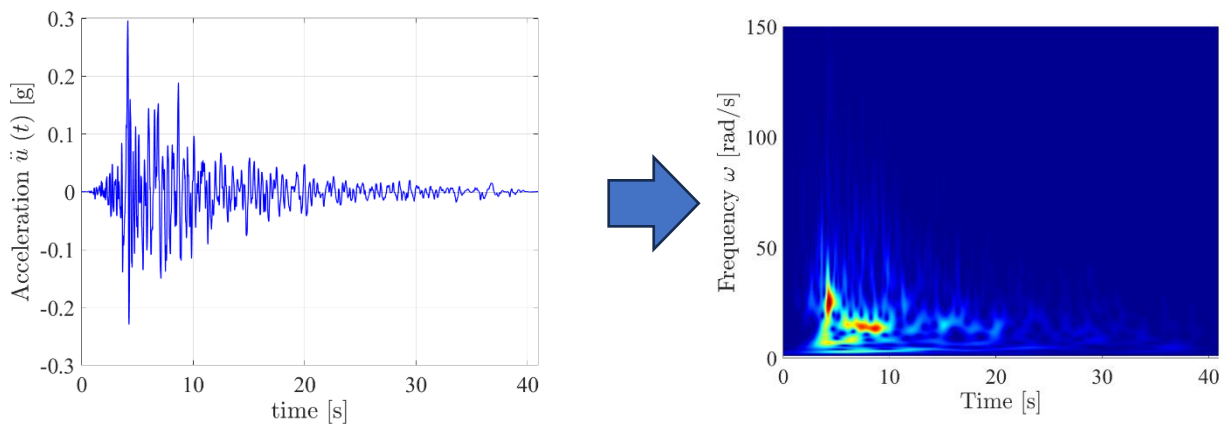
Τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα δημιουργούνται μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων που αναπαράγουν τα χαρακτηριστικά πραγματικών σεισμικών γεγονότων. Ως δεδομένο συνήθως καθορίζεται ένα φάσμα στόχου, όπως το ελαστικό φάσμα της περιοχής που ορίζει ο εκάστοτε κανονισμός, και παράγεται ένα τεχνητό σεισμικό σήμα, το φάσμα του οποίου ταυτίζεται σε έναν ικανοποιητικό βαθμό με το φάσμα στόχου. Η πλήρης συμβατότητα του φάσματος που προκύπτει από το εκάστοτε παραγόμενο σήμα με το φάσμα στόχου που έχει οριστεί ως δεδομένο, είναι αδύνατη. Έτσι, το κάθε μοντέλο ορίζει ποσοτικοποιημένα κριτήρια εφαρμογής των δύο αυτών φασμάτων, όπως π.χ. το κριτήριο που ορίζει ο EC8 (δηλαδή οι μέσες τιμές των ελαστικών φασμάτων απόκρισης δεν πρέπει να είναι μικρότερες από το 90% της αντίστοιχης τιμής του ελαστικού φάσματος απόκρισης) ή το μέσο σφάλμα μεταξύ των δύο συναρτήσεων (mean error) να μην ξεπερνάει κάποια καθορισμένη τιμή (tolerance).

Αφού καθορισθεί το φάσμα στόχου, η διαδικασία που ακολουθείται είναι, αρχικά, η γένεση ενός τεχνητού σήματος, συνήθως μέσω της υπέρθεσης ημιτονοειδών κυμάτων με διαφορά φάσης. Σε αυτό συνήθως εφαρμόζεται και μια συνάρτηση σχήματος (envelope function) με την οποία το τεχνητό σήμα αποκτά μεταβλητότητα στο εύρος των τιμών του σε σχέση με το χρόνο, όπως συμβαίνει και σε ένα πραγματικό σεισμικό γεγονός. Έπειτα, το σήμα αυτό τροποποιείται κατάλληλα, μέσω ενός βρόγχου διορθωτικών επαναλήψεων, έτσι ώστε να βελτιωθεί η συμβατότητά του με το φάσμα στόχου.

Για την τροποποίηση αυτή απαιτείται ο μετασχηματισμός του σήματος. Υπάρχουν δύο τεχνικές που συναντάει κανείς στην βιβλιογραφία για τον σκοπό αυτό. Η πιο συνήθης τεχνική περιλαμβάνει τον μετασχηματισμό του νέου επιταχυνσιογραφήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω του μετασχηματισμού Fourier, όπου το σήμα αναλύεται σε όλο το σύνολο της χρονικής του διάρκειας σε ένα συνεχές φάσμα περιοδικών εκθετικών σημάτων, Εικόνα 2.7. Η δεύτερη μέθοδος μετασχηματίζει ένα επιταχυνσιογραφήμα από το πεδίο του χρόνου στα πεδία των χρόνο-συχνοτήτων χρησιμοποιώντας συναρτήσεις κυματιδίων (wavelets) (Continuous Wavelet Transformation) Εικόνα 2.8.

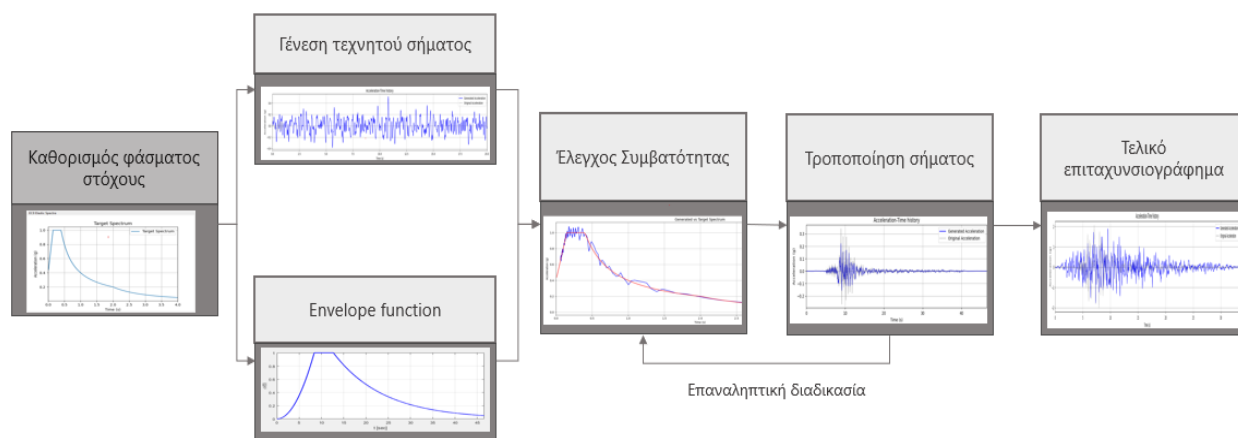


Εικόνα 2.7: Ο μετασχηματισμός σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων, Fourier Transformation [www.nti-audio.com]



Εικόνα 2.8: Ο μετασχηματισμός σήματος στο πεδίο των χρόνο-συχνοτήτων, CWT [Yanni et al (2020) [13]]

Αφού επιτευχθεί η απαιτούμενη συμβατότητα, τότε ο βρόγχος τερματίζει και καταλήγουμε στο τελικό παραγόμενο τεχνητό επιταχυνσιογράφημα. Το παραγόμενο επιταχυνσιογράφημα που προκύπτει με αυτή τη μέθοδο, είναι συμβατό με το φάσμα που έχει καθοριστεί (spectrum compatible). Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Εικόνα 2.9).



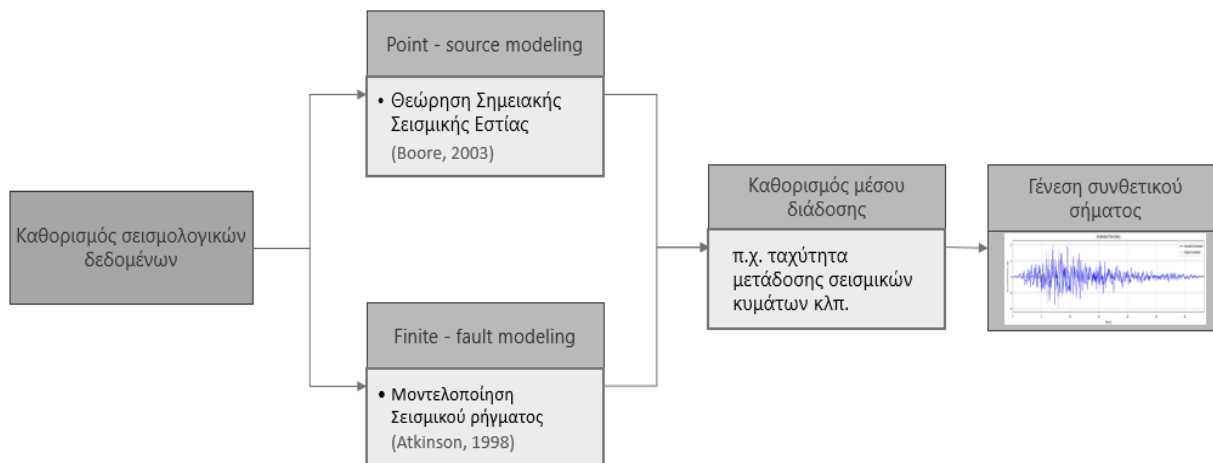
Εικόνα 2.9: Ενδεικτικό διάγραμμα ροής παραγωγής τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων

2.4.2 Συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα (Synthetic Accelerograms)

Εν αντιθέσει με τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, τα συνθετικά δημιουργούνται έχοντας ως δεδομένο συγκεκριμένα ποσοτικοποιημένα σεισμολογικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε σεναρίου μελέτης. Τέτοια δεδομένα μπορεί να είναι η επικεντρική απόσταση του εξεταζόμενου σημείου (απόσταση από την πηγή του σεισμού), η μορφή του ρήγματος γένεσης του σεισμού και τα χαρακτηριστικά του, η ταχύτητα μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο έδαφος κλπ.

Καταλαβαίνουμε αμέσως πως τέτοια δεδομένα δεν είναι εύκολα προσβάσιμα από τον μελετητή μηχανικό, ενώ ακόμα πιθανόν να απαιτούν και επιπλέον συνεργασία με κάποιον έμπειρο σεισμολόγο. Ωστόσο, η χρήση τους παράγει περισσότερο ρεαλιστικά χαρακτηριστικά επιταχυνσιογραφήματων για την εκάστοτε περιοχή μελέτης, δηλαδή είναι συμβατά με την ίδια την περιοχή μελέτης (site compatible).

Σε αυτή τη μέθοδο έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για την προσομοίωση της πηγής γένεσης των σεισμικών κυμάτων. Συγκεκριμένα, υπάρχουν μέθοδοι που θεωρούν τη σεισμική εστία σημειακή (point-source modeling) π.χ. [10], θεώρηση η οποία είναι ρεαλιστική για σεισμούς με μεγάλη επικεντρική απόσταση, και μέθοδοι οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους τη μορφή του ρήγματος (finite- fault modeling) π.χ. [11], οι οποίες είναι καταλληλότερες για την προσομοίωση σεισμών κοντά στην επικεντρική περιοχή και συνυπολογίζουν φαινόμενα όπως η κατευθυντικότητα του σεισμού. Στην Εικόνα 2.11, διακρίνουμε την γραφική αναπαράσταση ενός τέτοιου μοντέλου παραγωγής τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων.

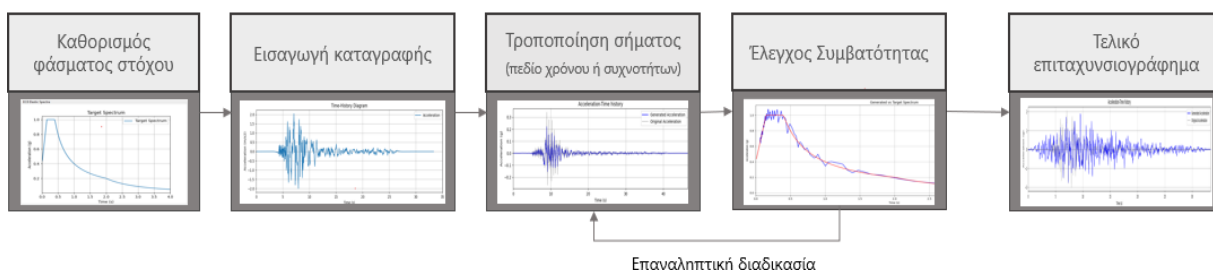


Εικόνα 2.10: Ενδεικτικό διάγραμμα ροής παραγωγής συνθετικών επιταχυνσιογραφήματων

2.4.3 Προσαρμογή Πραγματικών Επιταχυνσιογραφήματων (Real accelerograms adjustment)

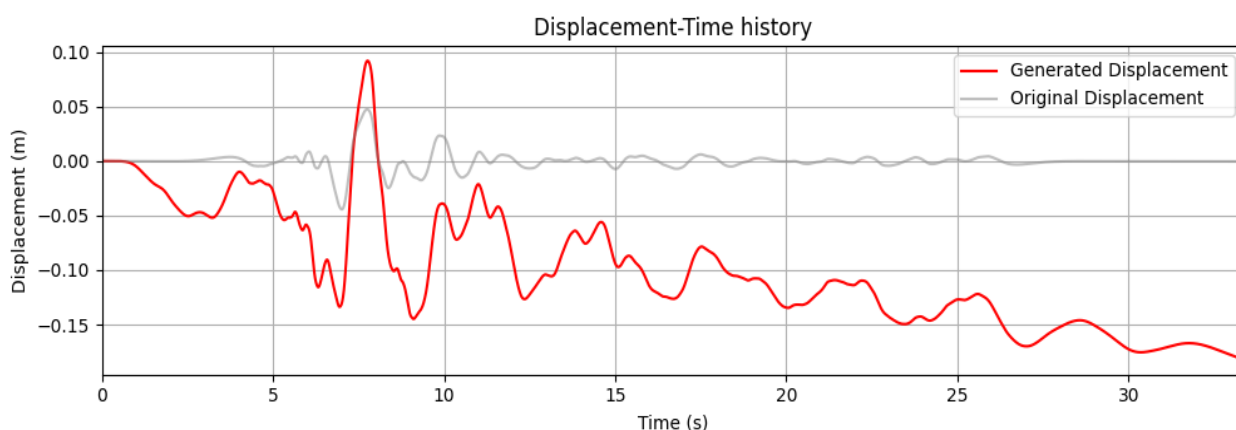
Η προσαρμογή πραγματικών επιταχυνσιογραφήματων συνίσταται στην τροποποίηση ή την κλιμάκωση εγγεγραμμένων σεισμικών δεδομένων, έτσι ώστε να είναι συμβατά με επιθυμητά φάσματα. Αυτή η μέθοδος αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω της πληθώρας βάσεων δεδομένων για σεισμικές καταγραφές που έχουν δημιουργηθεί από διάφορα ιδρύματα, καθώς και της σχετικής της απλότητας.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί εμπειρικές σχέσεις και στατιστικές τεχνικές για να προσαρμόσει πραγματικά επιταχυνσιογράφηματα σε συγκεκριμένα σενάρια σχεδιασμού ή συνθήκες τοποθεσίας. Ρυθμίζοντας τα πλάτη, τη διάρκεια και το περιεχόμενο συχνότητας πραγματικών επιταχυνσιογραφήματων, οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να παράγουν νέα επιταχυνσιογράφηματα, τα οποία είναι συμβατά με οποιοδήποτε φάσμα στόχου. Ωστόσο, η ποιότητα της παραγόμενης χρονοϊστορίας επιτάχυνσης, εξαρτάται άμεσα από την αρχική απόκλιση του μητρικού επιταχυνσιογραφήματος από το ορισμένο φάσμα στόχου. Στην Εικόνα 2.11, απεικονίζεται σχηματικά η διαδικασία αυτή.

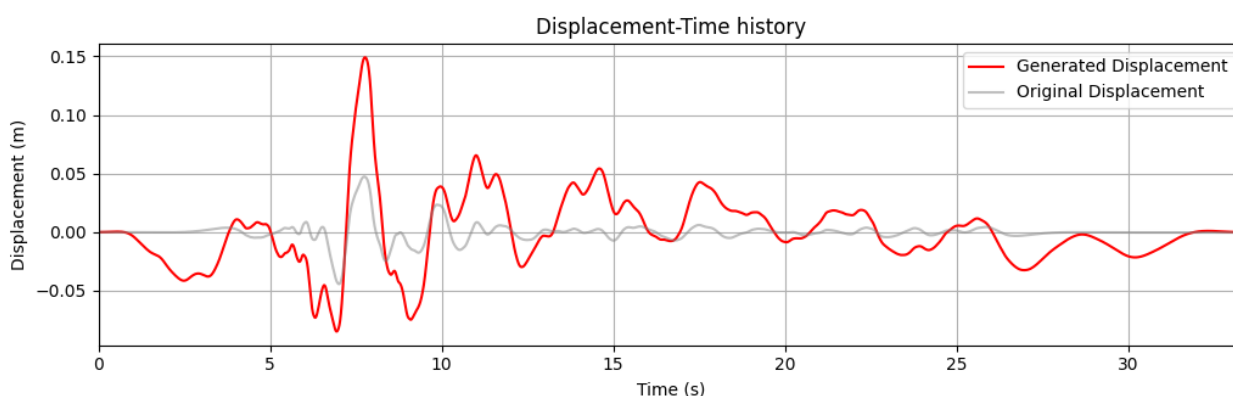


Εικόνα 2.11: Ενδεικτικό διάγραμμα ροής παραγωγής συνθετικών επιταχυνσιογραφήματων

Στο τέλος κάθε μεθόδου παραγωγής νέων επιταχυνσιογραφημάτων, εφαρμόζεται η διόρθωση της γραμμής βάσης (base line correction), με σκοπό την επίτευξη ρεαλιστικής συμπεριφοράς της χρονοϊστορίας των μετακινήσεων, έτσι ώστε στο τέλος η μετακίνηση να επιστρέφει στο μηδέν (Εικόνα 2.12, Εικόνα 2.13). Συνήθως χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι προσαρμογής της χρονοϊστορίας, όπως είναι η γραμμική, πολυώνυμικη (δεύτερου ή τρίτου βαθμού) και άλλες.



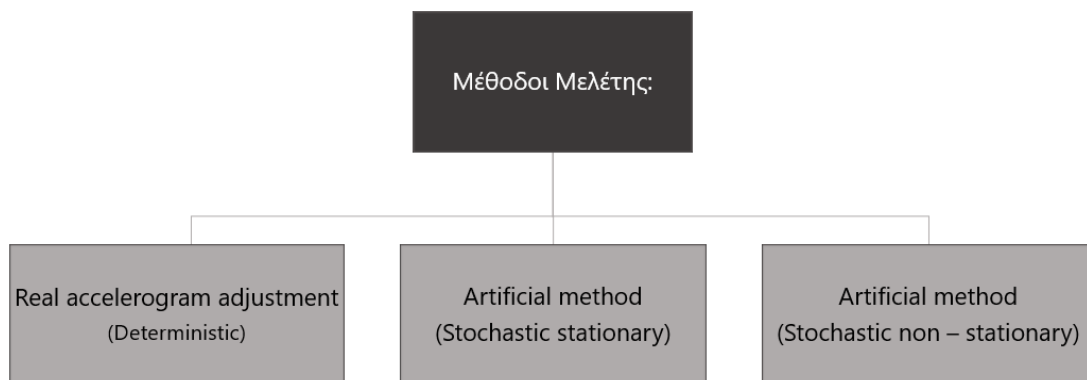
Εικόνα 2.12: Χρονοϊστορία σε όρους μετακίνησης πριν από την διαδικασία διόρθωσης της γραμμής βάσης



Εικόνα 2.13: Χρονοϊστορία σε όρους μετακίνησης μετά από την διαδικασία διόρθωσης της γραμμής βάσης

3 ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Από τις διάφορες μεθόδους που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά σε αυτές τις Μεθόδους παραγωγής τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων. Οι μέθοδοι αυτές (Εικόνα 3.1), έχουν διαφορετική προσέγγιση και παράγουν διαφορετικού τύπου τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα.



Εικόνα 3.1: Μέθοδοι μελέτης στην παρούσα εργασία

3.1 Μέθοδος 1: Προσαρμογή πραγματικών επιταχυνσιογραφημάτων

Η μέθοδος αυτή δημοσιεύτηκε στο [3], σύμφωνα με το οποίο άρθρο, ο συγγραφέας προτείνει μια νέα μέθοδο παραγωγής τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, μέσω της τροποποίησης μιας αρχικής καταγραφής. Η πορεία που ακολουθείται αναλύεται παρακάτω.

Αρχικά, εισάγεται μια αρχική μητρική καταγραφή επιταχυνσιογραφήματος και καθορίζεται το φάσμα στόχου. Σε πρώτο στάδιο, το αρχικό επιταχυνσιογράφημα κλιμακώνεται στο πεδίο του

χρόνου καθολικά, προκειμένου η μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους (PGA) που καταγράφεται σε αυτό να ισούται με την μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους που ορίζει το καθορισμένο φάσμα στόχου (δηλαδή $S_a(\tau=0)$). Από αυτό το τροποποιημένο επιταχυνσιογράφημα, υπολογίζεται το αντίστοιχο φάσμα απόκρισης.

Εν συνεχεία, ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης της συμβατότητας του παραγόμενου φάσματος με το φάσμα στόχου. Κατά τη διαδικασία αυτή, υπολογίζεται ο λόγος του φάσματος στόχου προς το παραγόμενο φάσμα, Εξ. (3-1).

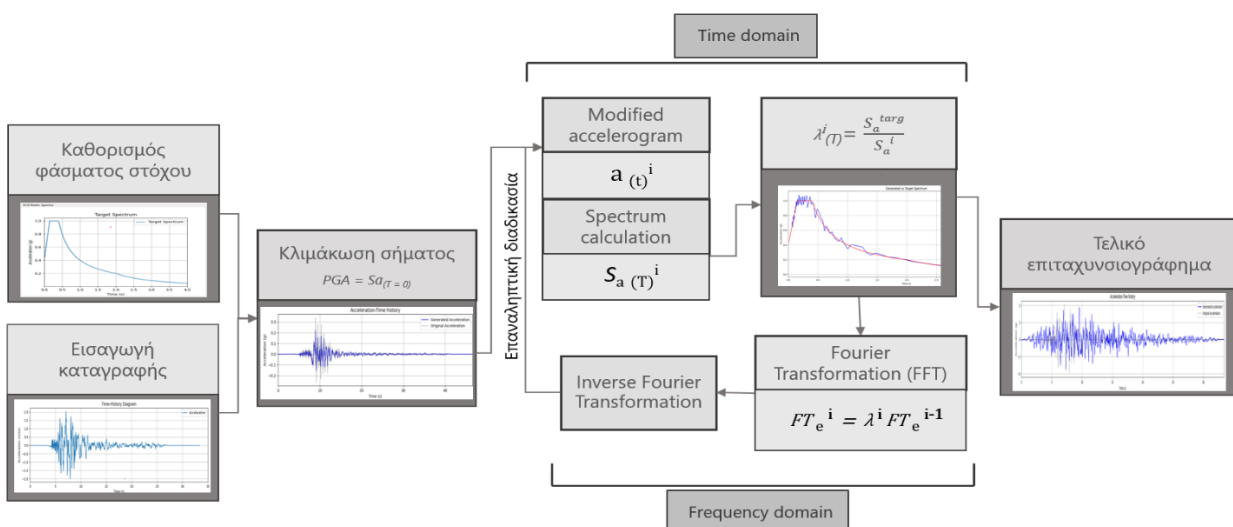
$$\lambda^i_{(T)} = \frac{S_a^{targ}}{S_a^i} \quad (3-1)$$

Έπειτα, ακολουθεί ο μετασχηματισμός Φουριέ (Fourier transformation) της χρονοϊστορίας, όπου τροποποιείται, με βάση την Εξ. (3-2), το επιταχυνσιογράφημα στο πεδίο των συχνοτήτων.

$$FT_e^i = \lambda^i FT_e^{i-1} \quad (3-2)$$

Τέλος, με τον αντίστροφο μετασχηματισμό, επανυπολογίζεται το νέο τροποποιημένο επιταχυνσιογράφημα στο πεδίο του χρόνου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον ορισμένο αριθμό επαναλήψεων που έχει ορίσει ο χρήστης. Μετά το πέρας των απαιτούμενων επαναλήψεων, η διαδικασία εξέρχεται από τον βρόγχο και προκύπτει το τελικό προσαρμοσμένο επιταχυνσιογράφημα.

Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η μεγάλη σύγκλιση με το καθορισμένο φάσμα στόχου. Στο διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2, φαίνεται η βασική αλγοριθμική δομή της μεθόδου.



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα ροής **Μεθόδου 1**

3.2 Μέθοδος 2: Στοχαστικά, στάσιμα, τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο [4], όπου προτείνεται η μέθοδος φασματικής αναπαράστασης (spectral representation method) για την γένεση τεχνητών σημάτων, καθώς και στο [5] όπου χρησιμοποιείται η συνάρτηση φασματικής ισχύος (power spectral density) για την επίτευξη συμβατότητας με το στοχευόμενο φάσμα απόκρισης. Ακόμα, η μέθοδος παρουσιάζεται αναλυτικά στο [8]. Με την μέθοδο αυτή παράγονται τεχνητά στοχαστικά στάσιμα επιταχυνσιογραφήματα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το τεχνητό στοχαστικό επιταχυνσιογράφημα $a_G(t)$, προκύπτει μέσω της επαλληλίας N αρμονικών συναρτήσεων με συχνότητα ω_i και τυχαία διαφορά φάσης $\theta_i [0, 2\pi]$, Εξ. (3-3).

$$a_G(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2G(\omega_i)\Delta\omega} \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (3-3)$$

Οι αρμονικές αυτές συναρτήσεις έχουν μέγιστο πλάτος που καθορίζεται από τη συνάρτηση φασματικής ισχύος (power spectral density) $G(\omega_i)$, σύμφωνα με την Εξ. (3-4), όπου $S_a(\omega_i, \zeta)$ η επιτάχυνση του στοχευόμενου φάσματος απόκρισης για την συχνότητα ω_i και ζ ο συντελεστής της απόσβεσης. Ακόμα, ο όρος ω_u περιγράφει το άνω όριο της συχνότητας (upper cut-off frequency) πέρα από το οποίο η συνάρτηση G θεωρείται ότι έχει τιμή ίση με το μηδέν, ενώ ο όρος $\omega_o = 1 \text{ rad/s}$ αναφέρεται στο κατώτατο όριο της συχνότητας.

$$G(\omega_i) = \begin{cases} \frac{4\zeta}{\omega_i\pi - 4\zeta\omega_{i-1}} \left[\frac{S_a^2(\omega_i, \zeta)}{\eta_{X_i}^2} - \Delta\omega \sum_{k=1}^{i-1} G(\omega_k) \right] & \omega_o \leq \omega_i \leq \omega_u \\ 0 & \omega_i < \omega_o \end{cases} \quad (3-4)$$

Ο όρος η_{X_i} είναι ο παράγοντας κορυφής (peak factor) και υπολογίζεται με βάση την Εξ. (3-5) και εκφράζει ένα μέτρο της μέγιστης τιμής ενός σήματος σε σχέση με την τιμή της τυπικής απόκλισης.

$$\eta_{X_i}(T_s, p) = \sqrt{2 \ln \left\{ 2N_{X_i} \left[1 - \exp \left(-\delta_{X_i}^{1.2} \sqrt{\pi \ln(2N_{X_i})} \right) \right] \right\}} \quad (3-5)$$

Όπου N_{X_i} ο μέσος ρυθμός διέλευσης από το μηδέν (Mean Zero Crossing Rate), Εξ. (3-6), και δ_{X_i} ο παράγοντας διασποράς (spread factor), ο οποίος χαρακτηρίζει τη διασπορά της στοχαστικής διαδικασίας, Εξ. (3-7). Η παράμετρος p περιγράφει την πιθανότητα μη υπέρβασης ($p = 0.5$), και με τον όρο T_s οριοθετείται η χρονική διάρκεια του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος.

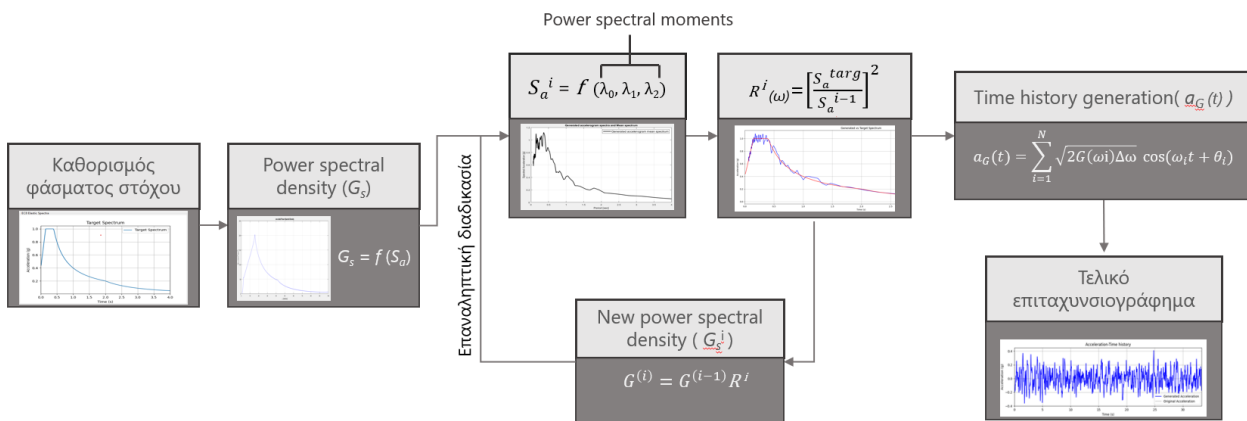
$$N_{X_i} = \frac{T_s}{2\pi} \omega_i (-\ln p)^{-1} \quad (3-6)$$

$$\delta_{X_i} = \sqrt{1 - \frac{1}{(1 - \zeta^2)} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arctan \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}\right)^2} \quad (3-7)$$

Για την συμβατότητα με το φάσμα στόχου, ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία η τιμή της συνάρτησης $G(\omega_i)$ προσαρμόζεται σε κάθε επανάληψη με βάση την Εξ. (3-8).

$$G(\omega_i)^{(j+1)} = G(\omega_i)^{(j)} \left[\frac{S_a^{targ}(\omega_i, \zeta)}{S_a^{(j)}(\omega_i, \zeta)} \right]^2 \quad (3-8)$$

Η παραπάνω περιγραφόμενη διαδικασία συνοψίζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Διάγραμμα ροής **Μεθόδου 2**

3.3 Μέθοδος 3: Στοχαστικά, μη-στάσιμα, τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα

Η μέθοδος αυτή αποτελεί στην ουσία επέκταση της προηγούμενης μεθόδου παραγωγής τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων. Βασίζεται στα [6] και [8] όπου προτείνεται η μέθοδος φασματικής αναπαράστασης (spectral representation method), που παρουσιάστηκε προηγουμένως, σε συνδυασμό με την αξιοποίηση μιας υπάρχουσας μητρικής σεισμικής καταγραφής (seed record). Με την μέθοδο αυτή παράγονται πλήρως μη-στάσιμα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα. Χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα καταγραφή η μέθοδος πετυχαίνει την δημιουργία μη στάσιμων σημάτων, και χρησιμοποιεί το στοχαστικό στάσιμο σήμα ως διορθωτικό παράγοντα για την επίτευξη συμβατότητας με το στοχευόμενο φάσμα απόκρισης, ενώ ταυτόχρονα προσδίδει στο παραγόμενο επιταχυνσιογράφημα τον στοχαστικό χαρακτήρα.

Το τεχνητό στοχαστικό επιταχυνσιογράφημα $a_G(t)$, προκύπτει επαλληλίζοντας τη μητρική χρονιοστορία \ddot{u}_g^R (προσαρμοσμένη με έναν συντελεστή κλιμάκωσης α_{sc}), με το στάσιμο σήμα που

προκύπτει μέσω της μεθόδου φασματικής αναπαράστασης, στο οποίο εφαρμόζεται και μία συνάρτηση εύρους $\varphi(t)$ (envelope function), Εξ. (3-6).

$$a_G(t) = a_{sc} \ddot{u}_g^R(t) + \varphi(t) \sum_{i=1}^N \sqrt{2G_s(\omega_i)\Delta\omega} \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (3-6)$$

Η συνάρτηση $\varphi(t)$, καθορίζεται από την εισαχθείσα αρχική καταγραφή όπως προτείνεται στο [7] Εξ. (3-7). Αφού υπολογισθεί το διάγραμμα της συνάρτησης Husid για το μητρικό επιταχυνσιογράφημα, υπολογίζονται τα t_1 , t_2 ως t_5 , t_{95} αντίστοιχα, όπου $H(t_5) = 5\%$ και $H(t_{95}) = 95\%$.

$$\varphi(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_1}\right)^2, & t < t_1 \\ 1, & t_1 \leq t < t_2 \\ \exp\left[-\frac{3}{t_f - t_1}(t_1 - t_2)\right], & t > t_2 \end{cases} \quad (3-7)$$

Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, το μέγιστο πλάτος του στοχαστικού σήματος καθορίζεται από τη συνάρτηση φασματικής ισχύος (power spectral density) $G_s(\omega_i)$, με τη σχέση να τροποποιείται αυτή τη φορά σύμφωνα με την Εξ. (3-7). Ο παράγοντας $U(\cdot)$ είναι η unit step function και καθορίζει το πρόσημο της εξίσωσης ώστε να αποφευχθούν οι αρνητικές τιμές της συνάρτησης.

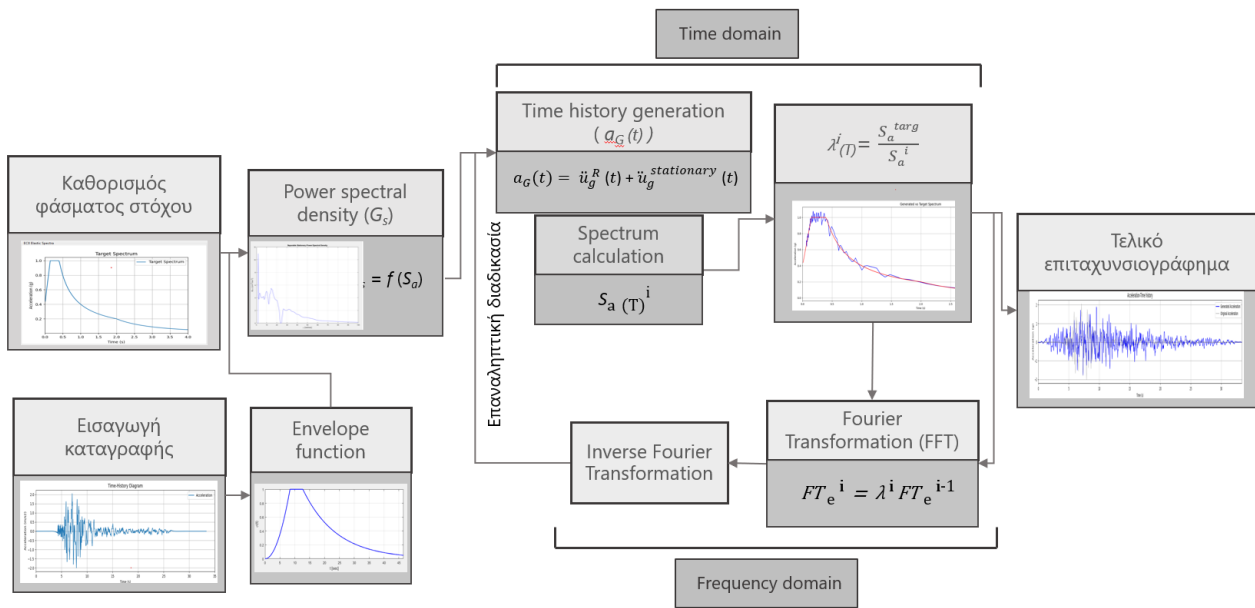
$$G_s(\omega_i) = \frac{4\zeta}{\omega_i\pi - 4\zeta\omega_{i-1}} U \left[\frac{S_a^2(\omega_i, \zeta) - (a_{sc}S_a^R(\omega_i, \zeta))^2}{\eta_{X_i}^2} - \Delta\omega \sum_{k=1}^{i-1} G_s(\omega_k) \right] \quad \omega_0 \leq \omega_i \leq \omega_u$$

$$* \left[\frac{S_a^2(\omega_i, \zeta) - (a_{sc}S_a^R(\omega_i, \zeta))^2}{\eta_{X_i}^2} - \Delta\omega \sum_{k=1}^{i-1} G_s(\omega_k) \right], \quad (3-8)$$

$$G_s(\omega_i) = 0, \omega_i < \omega_0$$

Τέλος, για την συμβατότητα με το φάσμα στόχου, όπως έχει προταθεί στο [8], ακολουθείτε η ίδια μέθοδος σύγκλισης με αυτή της Μεθόδου 1, δηλαδή με τη χρήση του μετασχηματισμού Φουριέ και την τροποποίηση της χρονοϊστορίας στο πεδίο των συχνοτήτων σύμφωνα με τις Εξ. (3-1) και Εξ. (3-2).

Στην Εικόνα 3.3, αναπαρίσταται γραφικά το διάγραμμα ροής της μεθόδου.



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ροής **Μεθόδου 3**

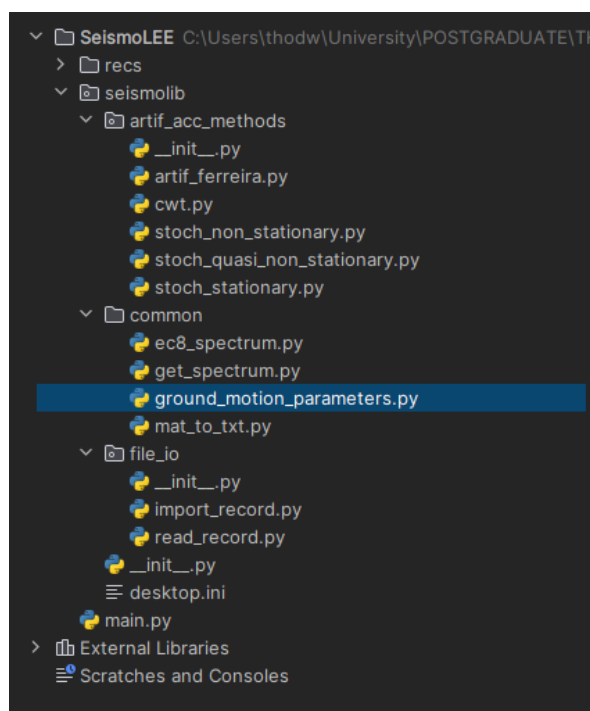
4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας, δημιουργήθηκε ένα αυτόνομο λογισμικό περιβάλλον, για την εφαρμογή όλων των εξεταζόμενων μεθόδων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Το λογισμικό δημιουργήθηκε και με σκοπό να αποτελέσει μια επέκταση της υπάρχουσας διαδικτυακής εφαρμογής SeismoLEE (<http://seismolee.eu/>), επεκτείνοντας τις δυνατότητές της με την ενσωμάτωση του αλγορίθμου παραγωγής τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων. Η συγκεκριμένη εφαρμογή έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, και αποτελεί ένα σύγχρονο εργαλείο ανάλυσης και επεξεργασίας επιταχυνσιογραφημάτων. Αναλυτικότερα, πρόκειται για μία δωρεάν διαδικτυακή εφαρμογή που χρησιμοποιείται για την διόρθωση καταγραφών, τον προσδιορισμό του φάσματος απόκρισης, την εφαρμογή φίλτρων (filtering), τον υπολογισμό διάφορων μετρικών έντασης, την εξαγωγή παλμών κλπ.

Για την ανάπτυξη του νέου λογισμικού χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού **Python**. Αξιοποιήθηκαν διάφορες πρόσθετες δυνατότητες που παρέχονται για την γλώσσα αυτή μέσω τρίτων βιβλιοθηκών. Η δομή του λογισμικού οργανώνεται μέσω μιας βιβλιοθήκης που δημιουργήθηκε από επιμέρους υποπρογράμματα (modules), έτσι ώστε να αποτελεί το περιβάλλον για την κοινή εισαγωγή - εξαγωγή δεδομένων μεταξύ των μεθόδων. Όλα τα επιμέρους υποπρογράμματα καλούνται από το κύριο εκτελέσιμο αρχείο (*main.py*). Με αυτό τον τρόπο, υποστηρίζεται η προσθήκη επιπρόσθετων αλγορίθμων παραγωγής επιταχυνσιογραφημάτων, με εύκολο και άμεσο τρόπο, καθώς πολλές υπορουτίνες που χρησιμοποιούν οι διάφορες μέθοδοι είναι κοινές, όπως π.χ. ο υπολογισμός του φάσματος του EC8, ο υπολογισμός του φάσματος των επιταχύνσεων ενός τυχαίου σήματος κλπ. Ακόμα, υπάρχει και αρχείο εντός της βιβλιοθήκης με έναν μεγάλο αριθμό πραγματικών καταγραφών

για την γρήγορη εισαγωγή δεδομένων. Στην Εικόνα 4.1, φαίνεται η διαμόρφωση της βιβλιοθήκης του λογισμικού.



Εικόνα 4.1: Δομή βιβλιοθήκης προγράμματος

4.1 Το γραφικό περιβάλλον (GUI)

Για την δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος του χρήστη (*GUI*) αξιοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **tkinter**. Η βιβλιοθήκη αυτή παρέχει διάφορα γραφικά πεδία (*button*, *textbox*, *combobox* κλπ.), τα οποία δημιουργούν γεγονότα (*events*) κατά την αλληλεπίδρασή τους με τον χρήστη. Τα γεγονότα αυτά αξιοποιούνται προγραμματιστικά (*event-driven programming*), για να δημιουργηθεί ένα γραφικό περιβάλλον που αλληλοεπιδρά με τον χρήστη κατά την λειτουργία της εφαρμογής. Όλα τα πεδία στοιχίζονται σε γραμμές και στήλες (*rows*, *columns*), για την επιμελή χωροθέτηση τους εντός του χώρου του κυρίου παραθύρου. Στο κομμάτι του κώδικα παρακάτω παρατίθεται ως παράδειγμα η δημιουργία του πεδίου *combobox* που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατηγορίας του εδάφους από τον χρήστη καθώς και των αντίστοιχων επεξηγηματικών *label*, ενώ στην Εικόνα 4.2 εμφανίζεται το αποτέλεσμα που προκύπτει.

```

# Soil Type
soil_var = tk.StringVar()
soil_label = ttk.Label(ec8_frame, text="Soil Type:")
soil_label.grid(row=1, column=0, sticky='e', padx=10, pady=5)
soil_combobox = ttk.Combobox(ec8_frame, textvariable=soil_var,
                             values=['A', 'B', 'C', 'D', 'E'], state="readonly")
soil_combobox.grid(row=1, column=1, sticky="ew")
soil_help_label = ttk.Label(ec8_frame, text="(e.g., 1, 1.2, 1.5)")
soil_help_label.grid(row=1, column=2, sticky='w', padx=(0, 10))
soil_combobox.set('C') # Set a default value

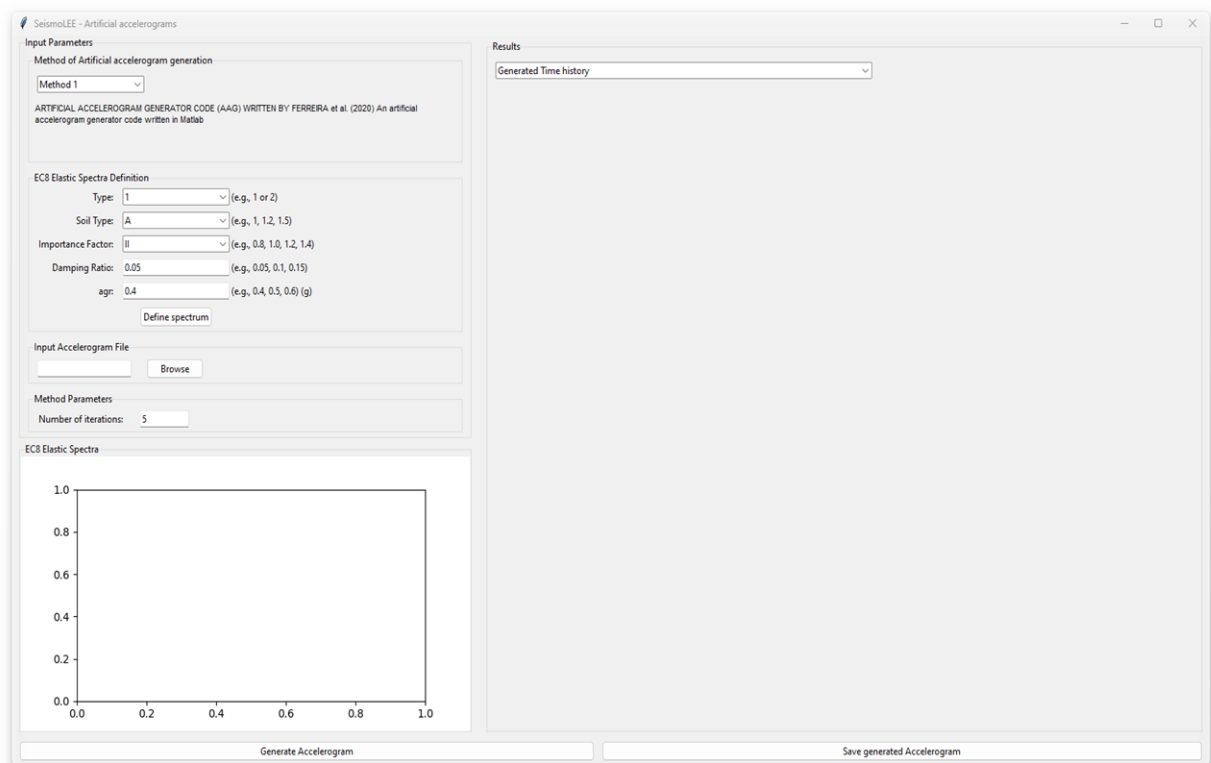
```



Εικόνα 4.2: Μορφή πεδίων του κύριου παραθύρου

4.1.1 Εισαγωγή Δεδομένων (Pre-processor)

Στην Εικόνα 4.3, παρουσιάζεται η κεντρική οθόνη του λογισμικού. Η οθόνη χωρίζεται σε δύο καρτέλες όπου ομαδοποιούνται τα δεδομένα εισαγωγής και τα αποτελέσματα.



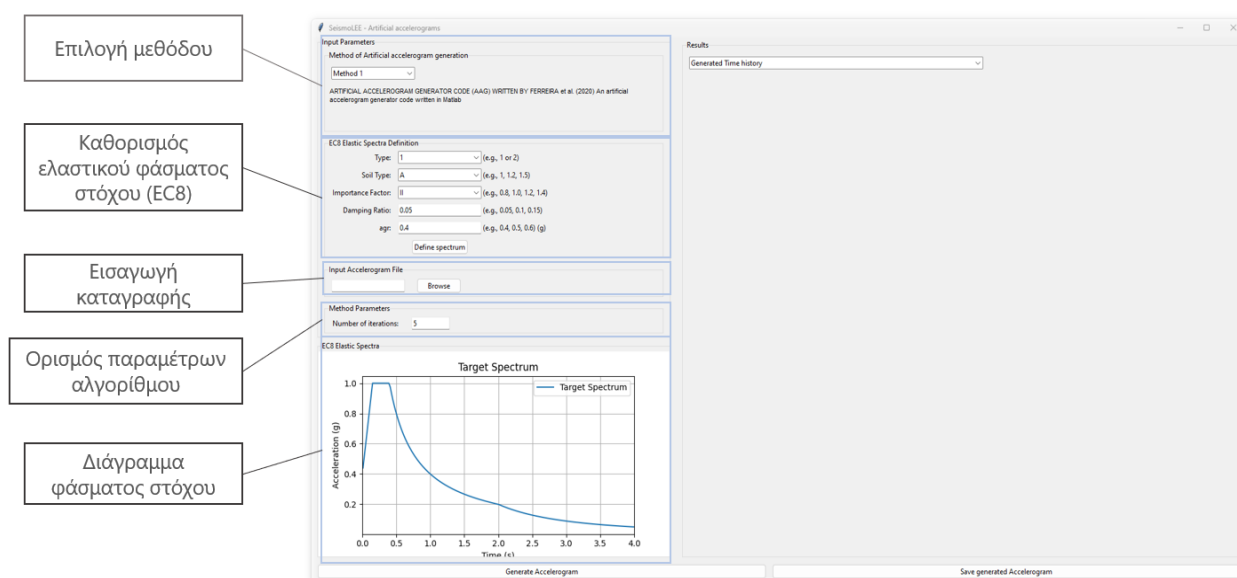
Εικόνα 4.3: Κύριο παράθυρο

Στα αριστερά, συγκεντρώνονται όλες οι παράμετροι που πρέπει να προσδιορίσει ο χρήστης για την έναρξη του αλγορίθμου παραγωγής επιταχυνσιογραφημάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης

πρέπει να επιλέξει αρχικά την επιθυμητή μέθοδο που θα ακολουθηθεί. Στις επιλογές αυτές, διατίθενται οι τρεις μέθοδοι που έχουν συζητηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο:

1. Προσαρμογή πραγματικού επιταχυνσιογραφήματος,
2. Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα, στάσιμο
3. Τεχνητό επιταχυνσιογράφημα, πλήρως μη στάσιμο

Έπειτα, θα πρέπει να καθοριστούν όλες οι απαραίτητες παράμετροι που σχετίζονται με τον προσδιορισμό του ελαστικού φάσματος, το οποίο θα αποτελεί και το φάσμα στόχου των παραγόμενων σημάτων. Το φάσμα είναι πλήρως συμβατό με τον EC8. Οι παράμετροι που οφείλει ο χρήστης να ορίσει είναι ο τύπος του φάσματος (τύπος 1 ή τύπος 2), ο τύπος το εδάφους (A, B, C, D, E), ο συντελεστής σπουδαιότητας γ (I, II, III, IV), ο λόγος απόσβεσης ξ , και η εδαφική επιτάχυνση αναφοράς α_{gR} . Έπειτα, ο χρήστης μπορεί να εισάγει μια υπάρχουσα καταγραφή επιταχυνσιογραφήματος, σε μορφή .txt, μέσα από την αντίστοιχη καρτέλα. Αναλυτικότερη περιγραφή για αυτή την λειτουργία δίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4.4: Κύριο παράθυρο, καρτέλα εισαγωγής δεδομένων

Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα να καθοριστεί ο αριθμός των διορθωτικών επαναλήψεων που θα εκτελέσει ο εκάστοτε αλγόριθμος για την βελτίωση της συμβατότητας του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος με το καθορισμένο φάσμα του EC8.

Τέλος, υπάρχει διαθέσιμο και ένα γραφικό διάγραμμα για την απεικόνιση του φάσματος στόχου που έχει οριστεί. Το διάγραμμα αυτό σχεδιάζεται με παραμέτρους τα δεδομένα εισαγωγής που έχει εισάγει ο χρήστης στα πεδία της κατάλληλης καρτέλας. Για την γραφική απεικόνιση όλων

των διαθέσιμων διαγραμμάτων γίνεται χρήση της βιβλιοθήκης γραφικών *matplotlib.pyplot*. Η ρουτίνα σχεδιασμού του στοχευόμενου φάσματος απόκρισης παρουσιάζεται στον παρακάτω κώδικα. Για τη διαδικασία υπολογισμού του φάσματος απόκρισης του EC8 (*ec8_spectrum.f*), γίνεται λόγος αργότερα στην παράγραφο 4.2.2.

```
def plot_spectrum(type_str, soil_str, importance_str, damp_str, agr_str, canvas):
    # INPUT (Eurocode 8 section 3.2.2.2)
    # soil=1 to 5 equivalent to soil A to E
    # Earthquake type=1 or type=2
    # importance = 0.8, 1, 1.2, 1.4 respectively for importance class I to IV
    # agr is the base peak acceleration reference

    global Sa_targ

    try:
        # Mapping combobox values to their corresponding numerical values
        type_mapping = {'1': 1, '2': 2}
        soil_mapping = {'A': 1, 'B': 2, 'C': 3, 'D': 4, 'E': 5}
        importance_mapping = {'I': 0.8, 'II': 1.0, 'III': 1.2, 'IV': 1.4}

        # Convert string variables to numbers using the mappings
        type_num = type_mapping.get(type_str, 1)
        soil_num = soil_mapping.get(soil_str, 1)
        importance_num = importance_mapping.get(importance_str, 0.8)
        damp_num = float(damp_str)
        agr_num = float(agr_str)

        # Call ec8_spectrum function with numbers
        T = np.arange(0.01, 4.00, 0.02)
        Sa_targ = ec8_spectrum.f(soil_num, type_num, importance_num,
                                damp_num, agr_num, T)

        Sa_targ = [T, Sa_targ]

        # Clear the previous plot by clearing the figure
        canvas.figure.clf()

        # Plotting the Spectrum diagram
        ax = canvas.figure.add_subplot(111)
        ax.plot(Sa_targ[0], Sa_targ[1], label='Target Spectrum')
        ax.set_xlabel('Time (s)')
        ax.set_ylabel('Acceleration (g)')
        ax.set_title('Target Spectrum')
        ax.legend()
        ax.grid(True)
        ax.set_xlim([0, 4])

        # Draw the canvas
        canvas.draw()
```

4.1.2 Εισαγωγή καταγραφής

Για την εισαγωγή μητρικών καταγραφών (seed record), έχει δημιουργηθεί μία αυτόνομη καρτέλα, με γραφικά και πεδία εισαγωγής παραμέτρων, με σκοπό την εύκολη και γρήγορη εισαγωγή εξωτερικών αρχείων. Τα αρχεία εισάγονται σε μορφή κειμένου *.txt* και στη συνέχεια μετατρέπονται σε κατάλληλη δομή (*np.array*) έτσι ώστε να είναι αναγνωρίσιμα από τα υπόλοιπα

υποπρογράμματα του λογισμικού. Η λειτουργία αυτή είναι κρίσιμης σημασίας, για την εύρυθμη λειτουργία του προγράμματος αλλά και κατά το στάδιο της ανάπτυξης, στο στάδιο του *debugging*.

Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζει κάποιος που προσπαθεί να εισάγει αρχεία καταγραφών σε ένα λογισμικό, είναι η αναγνώριση τους από το πρόγραμμα. Ο λόγος είναι πως υπάρχουν διάφορες μορφές δομών τέτοιων αρχείων κειμένου, ανάλογα με την εκάστοτε βάση δεδομένων από τα οποία τα προμηθεύεται κανείς. Έτσι συναντάμε διάφορες δομές όπως Pacific Peer, INGV, EVT και πολλές άλλες.

Ο κάθε οργανισμός, από τον οποίο μπορούμε να λάβουμε καταγραφές πραγματικών επιταχυνσιογραφημάτων, έχει συνήθως και την δική του μορφή με την οποία δομεί τα δεδομένα εντός του αρχείου κειμένου. Κάποια λογισμικά του εμπορίου, για να ξεπεράσουν αυτό το εμπόδιο, ζητούν από τον χρήστη να προσδιορίσει κατά την εισαγωγή της καταγραφής και τις παραμέτρους που καθορίζουν την δομή των δεδομένων εντός του αρχείου, ώστε να μπορέσει να αναγνωριστεί και από τον κώδικα του προγράμματος.

Η μέθοδος αυτή, μπορεί να είναι αποτελεσματική για μια απλή εφαρμογή μερικών καταγραφών, ωστόσο, αποτρέπει την αυτοματοποιημένη προγραμματιστική εισαγωγή μεγάλου αριθμού αρχείων, από βάσεις δεδομένων με αρχεία διαφόρων τύπων, η οποία είναι καίριας σημασίας για νέα μοντέλα σε επίπεδο προγραμματισμού, ή για μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης που απαιτούν μεγάλο σετ εκπαίδευσης (training set).

Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια, δημιουργήθηκε μια ρουτίνα αυτόματης αναγνώρισης της δομής των δεδομένων που περιέχονται σε ένα αρχείου κειμένου (*AutoRead*). Η μέθοδος αυτή, έχει ελεγχθεί για έναν ικανοποιητικό αριθμό καταγραφών, με διάφορες μορφές δομών, και βρέθηκε να λειτουργεί στο μεγαλύτερο αριθμό των περιπτώσεων. Συνοπτικά, η μέθοδος προσπαθεί αρχικά να ξεχωρίσει τα αριθμητικά δεδομένα από τα διάφορα σχόλια ή πληροφορίες που συνηθίζεται να περιέχονται μέσα σε ένα τέτοιο αρχείου καταγραφής, και τα χωρίζει σε δύο μέρη. Εντός του πρώτου μέρους των σχολίων προσπαθεί να αναγνωρίσει τις μονάδες μέτρησης της καταγραφής (g , m/s^2 , cm/s^2), καθώς και το βήμα της καταγραφής σε περίπτωση που απουσιάζει η στήλη του χρόνου. Στο δεύτερο μέρος, όπου έχουν απομονωθεί τα αριθμητικά δεδομένα, αρχικά ο αλγόριθμος προσπαθεί να αναγνωρίσει τον πιθανό χαρακτήρα με τον οποίο χωρίζονται τα δεδομένα (delimiter). Ο τρόπος που το πετυχαίνει αυτό είναι μέσω της παρατήρησης του συνολικού αριθμού εμφάνισης των διαφόρων μη αριθμητικών χαρακτήρων (πχ , ; / space tab κλπ.) σε κάθε γραμμή του αρχείου. Επειδή τα αρχεία καταγραφών περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό αριθμητικών δεδομένων τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους με κάποιο χαρακτήρα, συνεπάγεται ότι και ο χαρακτήρας διαχωρισμού θα εμφανίζεται αντίστοιχα πολύ συχνά. Έτσι, η ρουτίνα ανιχνεύει τον πιθανό χαρακτήρα delimiter, μετρώντας την εμφάνιση

κάθε πιθανού χαρακτήρα εντός του σώματος των δεδομένων. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνεται στις παρακάτω γραμμές κώδικα.

```
def detect_delimiter(lines):  
  
    # Variables to store potential delimiters and their counts  
    potential_delimiters = [r'\s+', ',', '\t', ';', ':', '_', '/', '!', '\n']  
    delimiter_counts = {delimiter: 0 for delimiter in potential_delimiters}  
  
    # Iterate through each line  
    for line in lines:  
        # Check if the line contains numerical data  
        if (any(char.isdigit() for char in line) and  
            all(char.isdigit() or char in '.-eE'  
              or char in potential_delimiters  
              for char in line)):  
  
            # Analyze the line to identify the delimiter  
            for delimiter in potential_delimiters:  
                try:  
                    # Split the line using the delimiter  
                    count = re.split(delimiter, line)  
                except Exception as e:  
                    break  
                if len(count) > 1:  
                    delimiter_counts[delimiter] += len(count) - 1  
  
    # Identify the delimiter with the highest count  
    detected_delimiter = max(delimiter_counts, key=delimiter_counts.get)  
  
    if delimiter_counts[detected_delimiter] == 0:  
        detected_delimiter = r'\s+'  
  
    return detected_delimiter
```

Έπειτα, ακολουθεί η διαδικασία διαχωρισμού της στήλης του χρόνου (εάν υπάρχει) με των υπολοίπων στηλών των επιταχύνσεων. Επειδή γνωρίζουμε ότι οι καταγραφές των σεισμικών γεγονότων έχουν κατά μεγάλο βαθμό σταθερό χρονικό βήμα, μπορούμε να προσδιορίσουμε τα δεδομένα του χρόνου από αυτά των επιταχύνσεων. Ακόμα, ο αλγόριθμος έχει την δυνατότητα να παραβλέψει καταγραφές ταχυτήτων και μετακινήσεων που μπορεί να περιέχονται παρακάτω στο αρχείο κειμένου, όταν αυτές διαχωρίζονται από σχετικά σχόλια, ενώ μπορεί ακόμη να αναγνωρίσει και δομές όπου σε κάθε γραμμή εμπεριέχονται πολλαπλές χρονικές τιμές (π.χ. αρχεία .EVT). Ωστόσο, εάν για οποιοδήποτε λόγο ο αλγόριθμος αδυνατεί να αναγνωρίσει τα δεδομένα εισαγωγής, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να παρέμβει και να καθορίσει τις παραμέτρους αναγνώρισης χειροκίνητα (manually). Συγκεκριμένα, ο χρήστης στην χειροκίνητη λειτουργία καλείται να συμπληρώσει τις παραμέτρους που αφορούν το χρονικό βήμα της καταγραφής (Time step), τον χαρακτήρα διαχωρισμού (Delimiter), τις μονάδες μέτρησης της επιτάχυνσης, την πρώτη και την τελευταία γραμμή εντός των οποίων εμπεριέχονται τα αριθμητικά δεδομένα της καταγραφής (First Line, Last Line) και τέλος να προσδιορίσει τις στήλες του χρόνου και τις επιτάχυνσης (Time Column, Acceleration Column). Από τις διαθέσιμες παραμέτρους, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως με την χειροκίνητη λειτουργία δεν μπορούν να

εισαχθούν αρχεία καταγραφών τα οποία περιλαμβάνουν πολλαπλές στήλες για τις τιμές της επιτάχυνσης και του χρόνου. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η μορφή αρχείου .EVT Εικόνα 4.5 όπου η ρουτίνα *AutoRead* καταφέρνει να αναγνωρίσει.

```

UNCORRECTED ACCELEROGRAM DATA          PROCESSED: 09/27/2003
AGR10301.EVT
08/14/2003 5:18:54 (GMT)                (ORIGIN: 08/14/2003 5:18:54 GMT)
AGR10301                                TRIGGER TIME: 8/14/2003 5:19:04.000 GMT
STATION NO. 1  38.621N 21.406E QDR      S/N 406 (4 CHNS OF 4 AT STA)
QDR S/N 406
CHAN 1: L      (STA CHN: 1)
AGR10301.EVT                            08/14/2003 5:18:54 (GMT)
HYPOCENTER: 38.862N 20.735E H= 10.0KM ML= 5.90
INSTR PERIOD = 0.0200 SEC, DAMPING =0.6000, SENSITIVITY =1.250 VDC/G
NO. OF POINTS = 4800 RECORD LENGTH = 48.000 SEC
UNITS OF UNCOR ACCEL ARE SEC AND G/10.   MAX = -0.031 G, AT 2.800 SEC
RMS ACCEL OF COMPLETE RECORD = 0.006 G
 1  1  1  4  4  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0
0.020  0.600  48.000  0.006  0.100  1.250  -0.031  2.800
50.000  0.000  0.000  0.000  10.000  0.000  10.000  10.000
0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
0.000  0.000
0.000  0.007  0.010  0.016  0.020 -0.002  0.030 -0.010  0.040 -0.013
0.050 -0.013  0.060  0.000  0.070  0.007  0.080 -0.008  0.090 -0.014
0.100 -0.017  0.110  0.005  0.120 -0.013  0.130 -0.013  0.140 -0.013
0.150  0.003  0.160 -0.004  0.170  0.007  0.180 -0.012  0.190  0.020
0.200  0.019  0.210  0.027  0.220  0.027  0.230  0.018  0.240  0.021
0.250  0.027  0.260  0.027  0.270  0.016  0.280  0.024  0.290  0.024
0.300  0.007  0.310 -0.007  0.320 -0.013  0.330  0.002  0.340 -0.013
0.350  0.003  0.360  0.008  0.370  0.020  0.380  0.007  0.390  0.007
0.400 -0.009  0.410  0.007  0.420  0.022  0.430  0.045  0.440  0.007
0.450  0.019  0.460  0.027  0.470  0.024  0.480  0.016  0.490  0.012
    
```

Εικόνα 4.5: Αρχείο κειμένου σεισμικής καταγραφής μορφής .EVT

. Στην Εικόνα 4.6 φαίνεται η μορφή και οι λειτουργίες της καρτέλας εισαγωγής καταγραφών.

Εικόνα 4.6: Παράθυρο εισαγωγής καταγραφής

4.2 Παραγωγή επιταχυνσιογραφήματος (Processor)

Αφού καθοριστούν όλες οι απαραίτητες παράμετροι που απαιτούνται για την εφαρμογή της επιλεγμένης μεθόδου, ο χρήστης μπορεί να εκκινήσει την διαδικασία παραγωγής επιταχυνσιογραφήματος, μέσω του *button* "Generate accelerogram". Έπειτα, εκκινείται ο αλγόριθμος της μεθόδου που έχει επιλεγθεί, σύμφωνα με την διαδικασία που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

4.2.1 Υπολογισμός ελαστικού φάσματος απόκρισης σύμφωνα με τον EC8

Ο υπολογισμός του ελαστικού φάσματος απόκρισης γίνεται σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό EC8 για τις οριζόντιες συνιστώσες της σεισμικής δράσης, Εξ. (4-1), (4-2), (4-3), (4-4) [9].

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (4-1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (4-2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (4-3)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \quad (4-4)$$

Όπου $S_e(T)$ το ελαστικό φάσμα απόκρισης, T είναι η περίοδος ταλάντωσης ενός μονοβάθμιου γραμμικού συστήματος κίνησης, a_g είναι η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε έδαφος κατηγορίας A ($a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$), T_B είναι η περίοδος κάτω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης, T_C είναι η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης, T_D είναι η τιμή της περιόδου που ορίζει την αρχή της περιοχής σταθερής μετακίνησης του φάσματος, S είναι ο συντελεστής εδάφους, και η ο συντελεστής απόσβεσης.

Οι τιμές των περιόδων T_B , T_C και T_D καθώς και αυτή του συντελεστή εδάφους S , που περιγράφουν την μορφή του ελαστικού φάσματος απόκρισης εξαρτώνται από την κατηγορία του εδάφους, Πίνακας 4-1 και Πίνακας 4-2.

Πίνακας 4-1: Τιμές παραμέτρων που καθορίζουν το οριζόντιο φάσμα ελαστικής απόκρισης (Τύπου 1)

Εδαφικός Τύπος	S	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Πίνακας 4-2: Τιμές παραμέτρων που καθορίζουν το οριζόντιο φάσμα ελαστικής απόκρισης (Τύπου 2)

Εδαφικός Τύπος	S	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,30	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2

Σημειώνεται πως για την περίπτωση του φάσματος τύπου 1 (για περιοχές υψηλής σεισμικότητας), έχουν ληφθεί υπόψη οι παράμετροι που καθορίζει το ελληνικό προσάρτημα του κανονισμού (Πίνακας 4-3).

Πίνακας 4-3: Τιμές παραμέτρων που καθορίζουν το οριζόντιο φάσμα ελαστικής απόκρισης (Τύπου 1), Ελληνικό προσάρτημα EC8

Κατηγορία Εδάφους	S	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,5
B	1,2	0,15	0,5	2,5
C	1,15	0,20	0,6	2,5
D	1,35	0,20	0,8	2,5
E	1,4	0,15	0,5	2,5

Ακόμα, παρατίθεται και ο κώδικας της συνάρτησης υπολογισμού του φάσματος του κανονισμού. Σημαντικό πλεονέκτημα της συνάρτησης αυτής είναι το γεγονός ότι οι τιμές του υπολογιζόμενου φάσματος είναι συνεχής και όχι διακριτές. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή *np.where*, όπου διαχωρίζονται επιμέρους διαστήματα ιδιοπεριόδων με βάση τις τιμές των T_B, T_C, T_D, και

προσδιορίζεται διαφορετική σχέση υπολογισμού σε κάθε διάστημα. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται η ανάγκη για γραμμική παρεμβολή όταν θα συγκριθεί το φάσμα στόχου με το φάσμα απόκρισης του παραγόμενου επιταχυνσιογραφήματος, στις τιμές των ιδιοπεριόδων που δεν έχει υπολογιστεί η τιμή του φάσματος στόχου.

```
def f(soil, type, importance, damp, agr, T):
    # INPUT (Eurocode 8 section 3.2.2.2)
    # soil= A to E
    # Earthquake type=1 or type=2
    # importance = 0.8, 1, 1.2, 1.4 respectively for importance class I to IV
    # agr is the base peak acceleration reference

    if type == 1:
        if soil == 'A':
            TB, TC, TD, S = 0.15, 0.40, 2.5, 1.0
        elif soil == 'B':
            TB, TC, TD, S = 0.15, 0.50, 2.50, 1.2
        elif soil == 'C':
            TB, TC, TD, S = 0.20, 0.60, 2.50, 1.15
        elif soil == 'D':
            TB, TC, TD, S = 0.20, 0.80, 2.5, 1.35
        elif soil == 'E':
            TB, TC, TD, S = 0.15, 0.50, 2.50, 1.4
    elif type == 2:
        if soil == 'A':
            TB, TC, TD, S = 0.05, 0.25, 1.2, 1.0
        elif soil == 'B':
            TB, TC, TD, S = 0.05, 0.25, 1.2, 1.35
        elif soil == 'C':
            TB, TC, TD, S = 0.10, 0.25, 1.2, 1.50
        elif soil == 'D':
            TB, TC, TD, S = 0.10, 0.30, 1.2, 1.80
        elif soil == 'E':
            TB, TC, TD, S = 0.05, 0.25, 1.2, 1.60

    ag = importance * agr
    eta = max(np.sqrt(10 / (5 + 100 * damp)), 0.55)

    Sa = np.zeros_like(T)
    i1 = np.where(T <= TB)
    i2 = np.where((T > TB) & (T <= TC))
    i3 = np.where((T >= TC) & (T <= TD))
    i4 = np.where(T > TD)

    Sa[i1] = S * ag * (1 + (T[i1] / TB) * (eta * 2.5 - 1))
    Sa[i2] = S * ag * eta * 2.5
    Sa[i3] = (S * ag * eta * 2.5) * (TC / T[i3])
    Sa[i4] = (S * ag * eta * 2.5) * (TC * TD) / (T[i4] ** 2)

    return Sa
```

4.2.2 Υπολογισμός του φάσματος απόκρισης χρονοϊστορίας επιταχυνσιογραφήματος

Η επίτευξη της συμβατότητας του παραγόμενου επιταχυνσιογραφήματος με το ελαστικό φάσμα στόχου απαιτεί τον υπολογισμό του φάσματος απόκρισης του επιταχυνσιογραφήματος ώστε να γίνει η σύγκρισή τους. Για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος του Newmark. Ο εν λόγω υπολογισμός απαιτεί την περισσότερη υπολογιστική ισχύ όπως διαπιστώθηκε,

αφενός λόγω του ότι περιλαμβάνει την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης της κίνησης και αφετέρου λόγω της επανάληψης της μέσα σε κάθε διορθωτική επανάληψη που εκτελείται. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος ως η πιο σύντομη μέθοδος από αυτές που εξετάστηκαν.

Η μέθοδος Newmark είναι μία αριθμητική μέθοδος ολοκλήρωσης και χρησιμοποιείται για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης της κίνησης για ένα γραμμικό σύστημα μονοβάθμιου ταλαντωτή (SDOF), Εξ. (4-5).

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = F(t) \quad (4-5)$$

Όπου m η μάζα του συστήματος, c ο συντελεστής απόσβεσης, k η δυσκαμψία, \ddot{u} η επιτάχυνση, \dot{u} η ταχύτητα, u η μετατόπιση και $F(t)$ η δύναμη του διεγέρτη που ασκείται στο σύστημα.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, οι μετακινήσεις και οι ταχύτητες σε ένα χρονικό βήμα προκύπτουν μέσω ολοκλήρωσης της χρονοϊστορίας των επιταχύνσεων για συγκεκριμένη μεταβολή αυτής. Στις Εξ. (4-6), (4-7), (4-8) αναπαρίστανται οι σχέσεις υπολογισμού τους. Οι παράμετροι β και γ είναι συντελεστές βάρους και περιγράφουν την μεταβολή της επιτάχυνσης μέσα στο βήμα ολοκλήρωσης. Για $\gamma = \frac{1}{2}$ και $\beta = \frac{1}{4}$, η επιτάχυνση θεωρείται σταθερή μέσα στο βήμα, ενώ για $\gamma = \frac{1}{2}$ και $\beta = \frac{1}{6}$, η επιτάχυνση θεωρείται γραμμικά μεταβαλλόμενη.

$$u_{t+1} = u_t + \Delta t \dot{u}_t + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - 2\beta)\ddot{u}_t + 2\beta\ddot{u}_{t+1}] \quad (4-6)$$

$$\dot{u}_{t+1} = \dot{u}_t + (1 - \gamma)\Delta t \ddot{u}_t + \gamma\Delta t \ddot{u}_{t+1} \quad (4-7)$$

$$\ddot{u}_{t+1} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}(u_{t+1} - u_t) - \frac{(1 - 2\beta)}{2\beta}\ddot{u}_t - \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\dot{u}_t \quad (4-8)$$

Στον κώδικα παρακάτω εμπεριέχεται η ρουτίνα υπολογισμού του φάσματος απόκρισης ενός επιταχυνσιογραφήματος που χρησιμοποιεί το λογισμικό σε κάθε μέθοδο.

```
import numpy as np
from numba import prange, jit

@jit(nopython=True)
def f(acc, dtacc, T, damp=0.05):
    # NEWMARK METHOD FOR SDOF SYSTEMS (LINEAR)
    # created by Michalis Fragiadakis, Dec 2013, mfrag@mail.ntua.gr

    # INPUT
    # T is the oscillator periods vector (s)
    # damp is the oscillator damping
    # acc is the input acceleration time history
    # dtacc is the time step of the acceleration time history
```

```

ts = T
t_points = len(ts)
nsteps = len(acc)

for j in range(t_points):
    td = ts[j]
    umax[j] = 0
    vmax[j] = 0
    amax[j] = 0
    uv = np.zeros(nsteps)
    ua = np.zeros(nsteps)
    ut = np.zeros(nsteps)
    atot = np.zeros(nsteps)

    kel = 1.
    mass = kel / omega[j] / omega[j]
    c1 = 2 * damp * mass * omega[j]

    kef = (kel + c1 * gamma / (beta * dtacc)
           + mass / (beta * dtacc * dtacc))

    a1 = mass / (beta * dtacc) + (gamma / beta) * c1
    a2 = mass / (beta * 2) + dtacc * c1 * (gamma / (2 * beta) - 1)

    for it in range(1, nsteps):
        dacc = acc[it] - acc[it - 1]

        ref = a1 * uv[it - 1] + a2 * ua[it - 1] - mass * dacc

        du = ref / kef

        ut[it] = ut[it - 1] + du

        dv = ((gamma / (dtacc * beta)) * du
              - (gamma / beta) * uv[it - 1]
              + dtacc * ua[it - 1] * (1 - (gamma / (2 * beta))))

        da = ((1. / (dtacc * dtacc * beta)) * du
              - (1. / (beta * dtacc)) * uv[it - 1]
              - ua[it - 1] * (1. / (2 * beta)))

        uv[it] = uv[it - 1] + dv
        ua[it] = ua[it - 1] + da
        atot[it] = ua[it] + acc[it]

        if abs(ut[it]) > umax[j]:
            umax[j] = abs(ut[it])

        if abs(uv[it]) > vmax[j]:
            vmax[j] = abs(uv[it])

        if abs(ua[it] + acc[it]) > amax[j]:
            amax[j] = abs(ua[it] + acc[it])

    response_spectrum = np.zeros((4, t_points))
    response_spectrum[0, :] = ts
    response_spectrum[1, :] = umax
    response_spectrum[2, :] = vmax
    response_spectrum[3, :] = amax

    return response_spectrum

```

4.2.3 Διόρθωση γραμμής βάσης (baseline correction)

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, κατά την παραγωγή ενός νέου επιταχυνσιογραφήματος απαιτείται η διόρθωση του με τη μέθοδο γραμμής βάσης των μετατοπίσεων. Με τον τρόπο αυτό, αφαιρείται η μετακίνηση της βάσης (baseline drift) που προκύπτει στην χρονοϊστορία των μετακινήσεων της παραγόμενης καταγραφής. Το λογισμικό εκτελεί τη διαδικασία αυτή της διόρθωσης μέσα σε κάθε επανάληψη και όχι μονάχα στο τέλος της σύγκλισης, ώστε να γίνεται ορθότερος υπολογισμός της απόκλισης του φάσματος απόκρισης από το φάσμα στόχου. Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας της ρουτίνας αυτής που χρησιμοποιείται από το λογισμικό και για τις τρεις μεθόδους παραγωγής επιταχυνσιογραφημάτων. Σημειώνεται πως σε όλες τις περιπτώσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η μέθοδος της πολυώνυμικης διόρθωσης τρίτου βαθμού (Cubic).

```
import numpy as np

def f(signal, opt):

    x = np.arange(len(signal))

    if opt == 'L': # Linear
        p = np.polyfit(x, signal, 1)
        baseline = np.polyval(p, x)
    elif opt == 'Q': # Quadratic
        p = np.polyfit(x, signal, 2)
        baseline = np.polyval(p, x)
    elif opt == 'C': # Cubic
        p = np.polyfit(x, signal, 3)
        baseline = np.polyval(p, x)
    else:
        raise ValueError("Invalid option. Please choose 'L' for linear, 'Q' for quadratic, or 'C' for cubic baseline correction.")

    corrected_signal = signal - baseline
    return corrected_signal
```

4.2.4 Μετασχηματισμός Φουριέ

Για τις ανάγκες του μετασχηματισμού μια χρονοϊστορίας από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων ακολουθείται η μέθοδος του Φουριέ (Fourier transformation) και συγκεκριμένα ο αλγόριθμος *Fast Fourier Transformation (FFT)*. Ομοίως για τον αντίστροφο μετασχηματισμό εφαρμόζεται ο αλγόριθμος *inverse Fast Fourier Transformation (iFFT)*. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι ο πιο ευρέως διαδεδομένος στην βιβλιογραφία καθώς θεωρείται αξιόπιστος και γρήγορος. Οι υπολογισμοί των μετασχηματισμών γίνονται με βάση τις Εξ. (4-9) και Εξ. (4-10), όπου $X(k)$ η τιμή του πλάτους του σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων για συχνότητα k ,

$x(n)$ η τιμή του πλάτους της χρονοϊστορίας στο πεδίο του χρόνου τη χρονική στιγμή n και N ο αριθμός των διακριτών χρονικών βημάτων της χρονοϊστορίας.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)} \quad (4-9)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{i\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)} \quad (4-10)$$

Για τον μετασχηματισμό αυτόν το λογισμικό αξιοποιεί τον συγκεκριμένο αλγόριθμο που παρέχεται μέσω της βιβλιοθήκης επιστημονικών διαδικασιών *SciPy*.

```
from scipy.fftpack import fft, ifft
```

4.2.5 Χρήση παράλληλου προγραμματισμού & JIT μεταγλώττισης

Για την επιτάχυνση χρονοβόρων επαναληπτικών διαδικασιών καθώς και για την συνολική επιτάχυνση των μαθηματικών διαδικασιών του αλγορίθμου, αξιοποιήθηκαν οι τεχνικές του παράλληλου προγραμματισμού καθώς και της «Just-in-time» μεταγλώττισης. Για την αξιοποίηση αυτών των τεχνικών χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη της *numba* και συγκεκριμένα η εντολή *jit*.

Με την χρήση της τεχνικής του παράλληλου προγραμματισμού αξιοποιούνται οι πολλαπλοί πυρήνες ενός σύγχρονου υπολογιστή και οι επαναλήψεις εντός του βρόγχου επιμερίζονται στους διαθέσιμους πυρήνες και εκτελούνται ταυτόχρονα.

Η Python παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει στην ευκολία της χρήσης της, αποτελεί μια high-level γλώσσα προγραμματισμού και για τον λόγο αυτό υστερεί σε επιδόσεις απαιτητικών μαθηματικών εφαρμογών σε σύγκριση με μία low-level γλώσσα όπως η C, C++ κλπ. Για τον λόγο αυτό, για τέτοιες εφαρμογές, εφαρμόζεται η τεχνική της just-in-time μεταγλώττισης, με την οποία επιτυγχάνεται η άμεση μεταγλώττιση του κώδικα σε γλώσσα μηχανής ακριβώς πριν την εκτέλεση του.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου hardware του υπολογιστικού συστήματος. Η επιτάχυνση της διαδικασίας μιας κρίσιμης ρουτίνας που επαναλαμβάνεται πολύ συχνά στον κώδικα, όπως για παράδειγμα ο υπολογισμός του φάσματος μέσω της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης ο οποίος γίνεται αρκετές φορές μέσα στην διαδικασία κάθε μεθόδου και είναι αρκετά χρονοβόρος, επιταχύνει ραγδαία την συνολική απαιτούμενη χρονική διάρκεια του κώδικα.

Παρατίθεται ένα σχετικό κομμάτι κώδικα, όπου χρησιμοποιείται η τεχνική του παράλληλου προγραμματισμού, αλλά και η άμεση μεταγλώττιση σε κώδικα μηχανής (JIT), κατά τον υπολογισμό της συνάρτησης φασματικής ισχύος, εντός της Μεθόδου 2.

```
@jit(parallel=True, nopython=True)
def compute_values(N, omega, G, Sa, Ts, p, zeta):
    lamda0 = np.zeros(N)
    lamda1 = np.zeros(N)
    lamda2 = np.zeros(N)
    delta_X_lamda = np.zeros(N)
    N_X_lamda = np.zeros(N)
    eta_X_lamda = np.zeros(N)
    Sa_stoch = np.zeros(N)

    for j in prange(N):
        omega_j = omega[j]

        lamda0[j] = SpectralMoments(0, zeta, omega_j, omega, G)
        lamda1[j] = SpectralMoments(1, zeta, omega_j, omega, G)
        lamda2[j] = SpectralMoments(2, zeta, omega_j, omega, G)

        delta_X_lamda[j] = np.sqrt(1 - lamda1[j] ** 2 / (lamda0[j] * lamda2[j]))

        N_X_lamda[j] = ((Ts / (2 * np.pi)) * np.sqrt(lamda2[j] / lamda0[j])
                       * (-np.log(p)) ** -1)

        eta_X_lamda[j] = np.sqrt(2 * np.log(2 * N_X_lamda[j] * (
            1 - np.exp((-delta_X_lamda[j] ** 1.2)
                       * np.sqrt(np.pi * np.log(2 * N_X_lamda[j]))))))

        Sa_stoch[j] = eta_X_lamda[j] * (omega_j ** 2) * np.sqrt(lamda0[j])
        G[j] = G[j] * (Sa[j] / Sa_stoch[j]) ** 2

    return lamda0, lamda1, lamda2, delta_X_lamda, N_X_lamda, eta_X_lamda, Sa_stoch, G
```

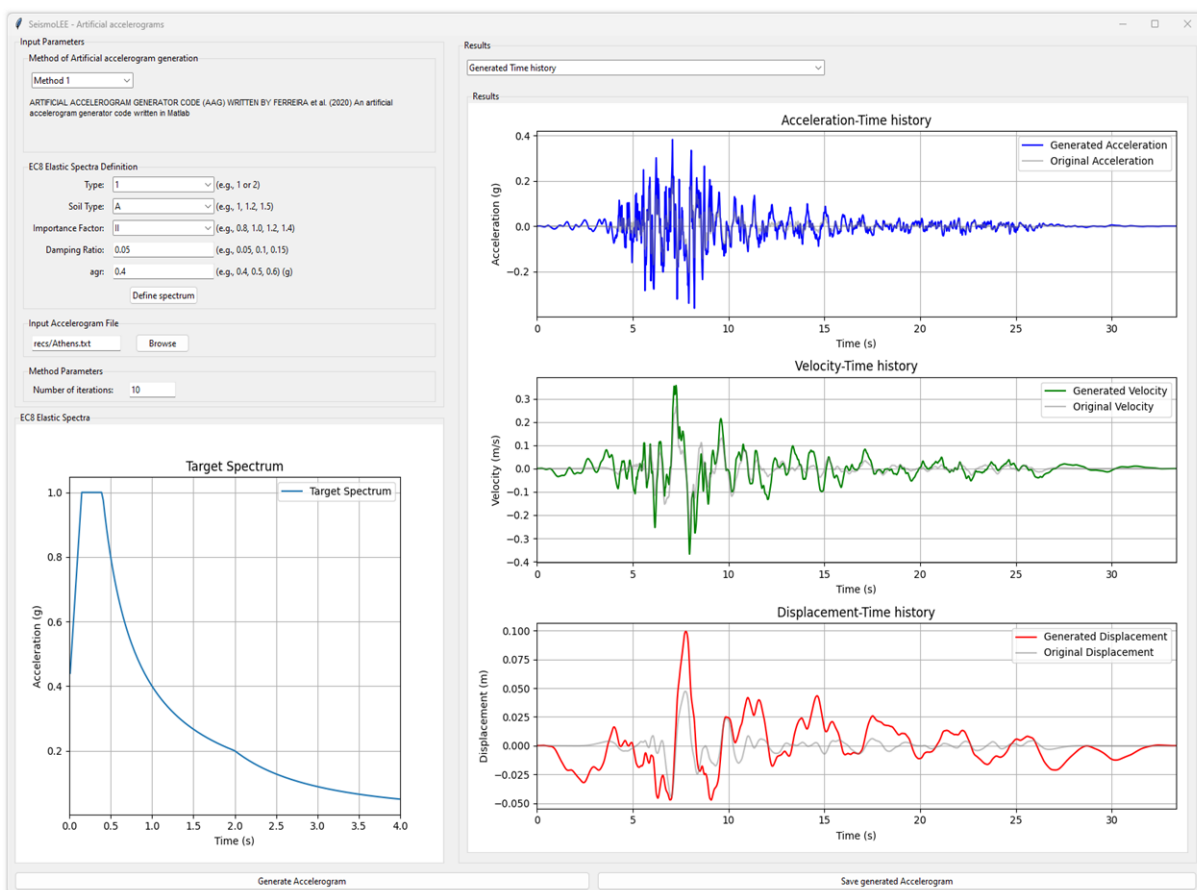
4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων (Post-processor)

Στην δεξιά καρτέλα του κυρίου παραθύρου, συγκεντρώνονται όλα τα αποτελέσματα (output) που προκύπτουν έπειτα από την παραγωγή του επιταχυνσιογραφήματος. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, έχουν ενσωματωθεί κάποια σημαντικά διαγράμματα και ποσοτικά χαρακτηριστικά, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων κάθε μεθόδου.

Ο χρήστης μπορεί μέσω επιλογής από ένα αναδυόμενο μενού (*combobox*), να επιλέξει τα ακόλουθα:

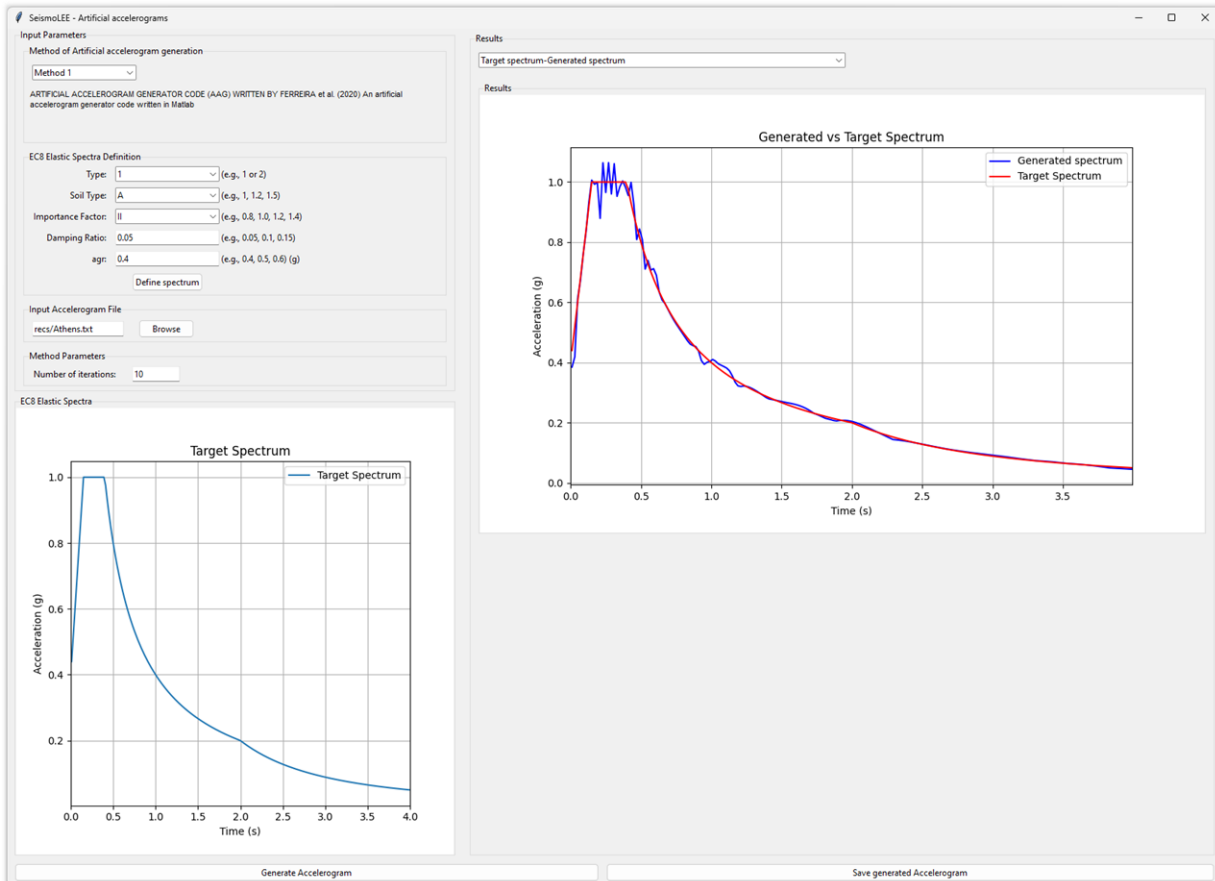
- Generated time histories
- Target spectrum vs Generated spectrum
- Husid plot
- Error per iteration
- Parameters

Με την επιλογή «Generated time histories», απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες σε όρους επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης του παραγόμενου επιταχυνσιογραφήματος. Στα ίδια διαγράμματα, σχεδιάζονται επίσης και οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες της μητρικής καταγραφής με ανοιχτό γκρι χρώμα. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Χρονοϊστορίες (επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετακίνησης) παραγόμενου επιταχυνσιογραφήματος

Στη συνέχεια, επιλέγοντας «Target spectrum vs Generated spectrum», είναι διαθέσιμα τα διαγράμματα των φασματικών επιταχύνσεων του παραγόμενου σήματος και του στοχευόμενου φάσματος (Εικόνα 4.8). Σχεδιάζονται στο ίδιο διάγραμμα, έτσι ώστε να μπορεί να υπάρχει μια ποιοτική εποπτεία του βαθμού συμβατότητας των δύο αυτών φασμάτων, το οποίο είναι και το κύριο ζητούμενο της κάθε μεθόδου.



Εικόνα 4.8: Διαγράμματα Φάσματος επιταχύνσεων (Φάσμα στόχου – Τεχνητό φάσμα)

Με την τρίτη επιλογή «*Husid plot*» εμφανίζεται το διάγραμμα έντασης (Arias Intensity I_A) - χρόνου, του παραγόμενου σήματος [Husid (1969)], (Εικόνα 4.9). Η συνάρτηση *Husid* ($H_{us}(t)$) αναπαριστά την αθροιστική ένταση Arias κατά τη διάρκεια του χρόνου, εκφρασμένη ως ποσοστό. Υπολογίζεται διαιρώντας την συνολική αθροιστική τιμή των τετραγωνισμένων επιταχύνσεων, μέχρι κάθε χρονικό σημείο ($H(t)$), με την συνολική αθροιστική τιμή της συνάρτησης ($H(T)$), όπου T η συνολική χρονική διάρκεια του σήματος. Αυτή η συνάρτηση παρέχει πολύτιμη πληροφορία για τη κατανομή της σεισμικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της κίνησης του εδάφους. Ο υπολογισμός της συνάρτησης γίνεται με βάση τις Εξ. (4-11), (4-12). Πάνω σε αυτό το διάγραμμα σημειώνονται επίσης με κόκκινες κατακόρυφες γραμμές οι χρονικές στιγμές t_5 , t_{95} (όπου $H_{us}(t_5) = 5\%$ και $H_{us}(t_{95}) = 95\%$.) οι οποίες οριοθετούν την σημαντική διάρκεια (significant duration) του νέου επιταχυνσιογραφήματος.

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις λειτουργεί ο κώδικας υπολογισμού της συνάρτησης *Husid*.

$$H(t) = \sum_{i=0}^n acc_i^2 \quad (4-11)$$

$$H_{us}(t) = \frac{H(t)}{H(T)} * 100\% \quad (4-12)$$

```
def Husid(t, acc):
    """
    Husid function computation

    Parameters:
        t (array-like): Time values
        acc (array-like): Acceleration values

    Returns:
        Hus (array): Husid values
        t1 (float): Time point t1 (beginning of the strong motion at 5%)
        t2 (float): Time point t2 (end of the strong motion at 95%)

    Hus = np.zeros(len(t))
    Ht = np.cumsum(acc ** 2)

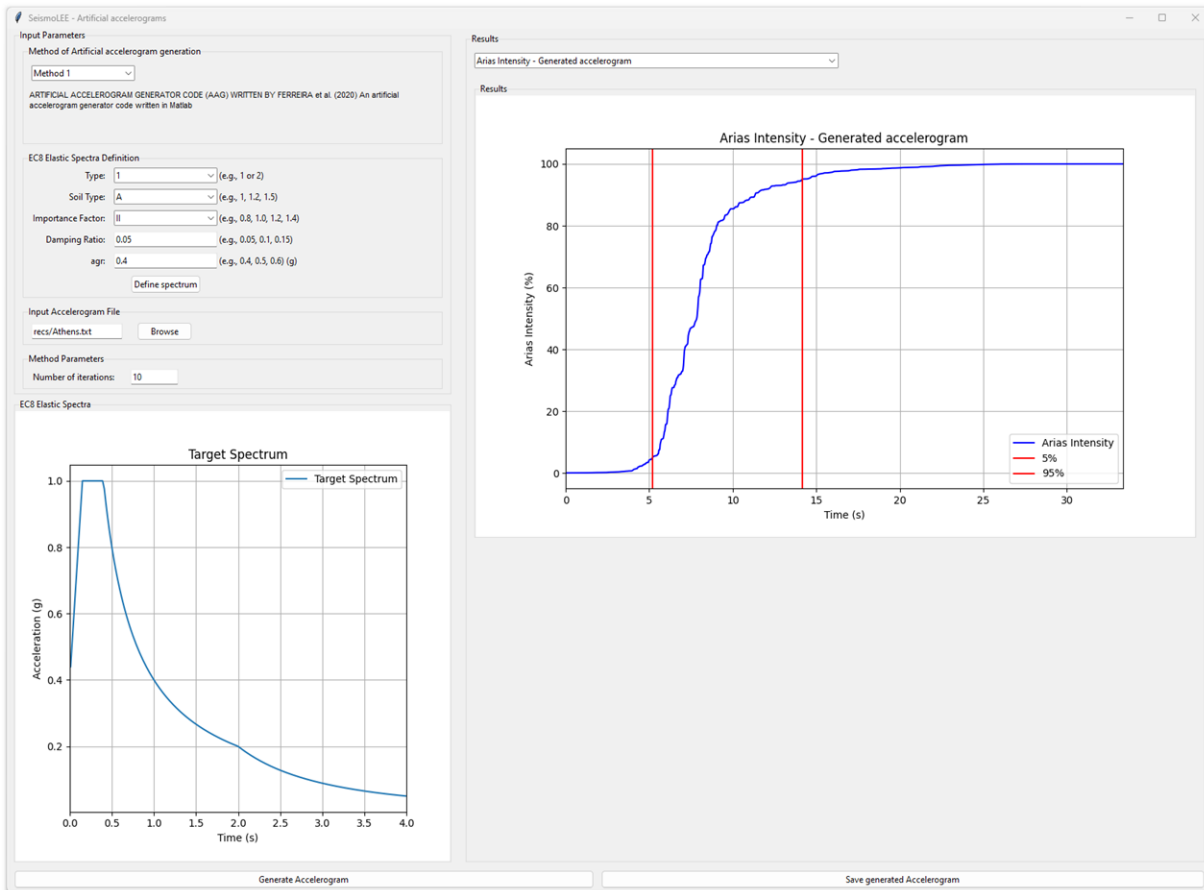
    for i in range(len(t)):
        Hus[i] = Ht[i] / Ht[-1]

    # Find time points where H(t1) = 5% and H(t2) = 95%
    h1 = np.abs(Hus - 0.05)
    h2 = np.abs(Hus - 0.95)

    i1 = np.argmin(h1)
    i2 = np.argmin(h2)

    t1 = t[i1]
    t2 = t[i2]

    return Hus, t1, t2
```



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα *Husid plot* και το διάστημα *significant duration*

Μια ακόμα σημαντική δυνατότητα του προγράμματος, είναι η εξαγωγή των διαγραμμάτων σφάλματος – επανάληψης με την επιλογή «*Error per iteration*», όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10. Τα διαγράμματα αυτά δίνουν στον χρήστη πολύτιμες πληροφορίες για την εξέλιξη του αλγορίθμου σύγκλισης, και συνεπώς είναι ένα βοηθητικό εργαλείο για την αξιολόγηση της εκάστοτε μεθόδου, καθώς και για την επιλογή του βέλτιστου αριθμού επαναλήψεων σε περίπτωση που ο αλγόριθμος από έναν αριθμό και έπειτα ξεκινάει να αποκλίνει. Φυσικά, αποτελεί και εποπτικό εργαλείο στο στάδιο προγραμματισμού μιας νέας μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα, είναι διαθέσιμο το μέτρο του «μέσου απόλυτου σφάλματος» (*Mean error*), το οποίο υπολογίζεται ως το εμβαδόν που εμπεριέχεται μεταξύ του στοχευόμενου φάσματος και του τελικού φάσματος απόκρισης. (Εξ.(4-13)), καθώς και το μέτρο του «Μέσου Απόλυτου Ποσοστιαίου Σφάλματος» (*MAPE*), το οποίο υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των απόλυτων ποσοστιαίων διαφορών. (Εξ.(4-14)).

$$\text{Mean error} = \left| \int_0^{T_{\text{tot}}} Sa_{\text{gen}}(T)dt - \int_0^{T_{\text{tot}}} Sa_{\text{targ}}(T)dt \right| \quad (4-13)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Sa_{\text{targ}}(T) - Sa_{\text{gen}}(T)}{Sa_{\text{targ}}(T)} \right| * 100\% \quad (4-14)$$

Ο υπολογισμός των δύο αυτών εξισώσεων γίνεται στις παρακάτω δύο ρουτίνες του κώδικα.

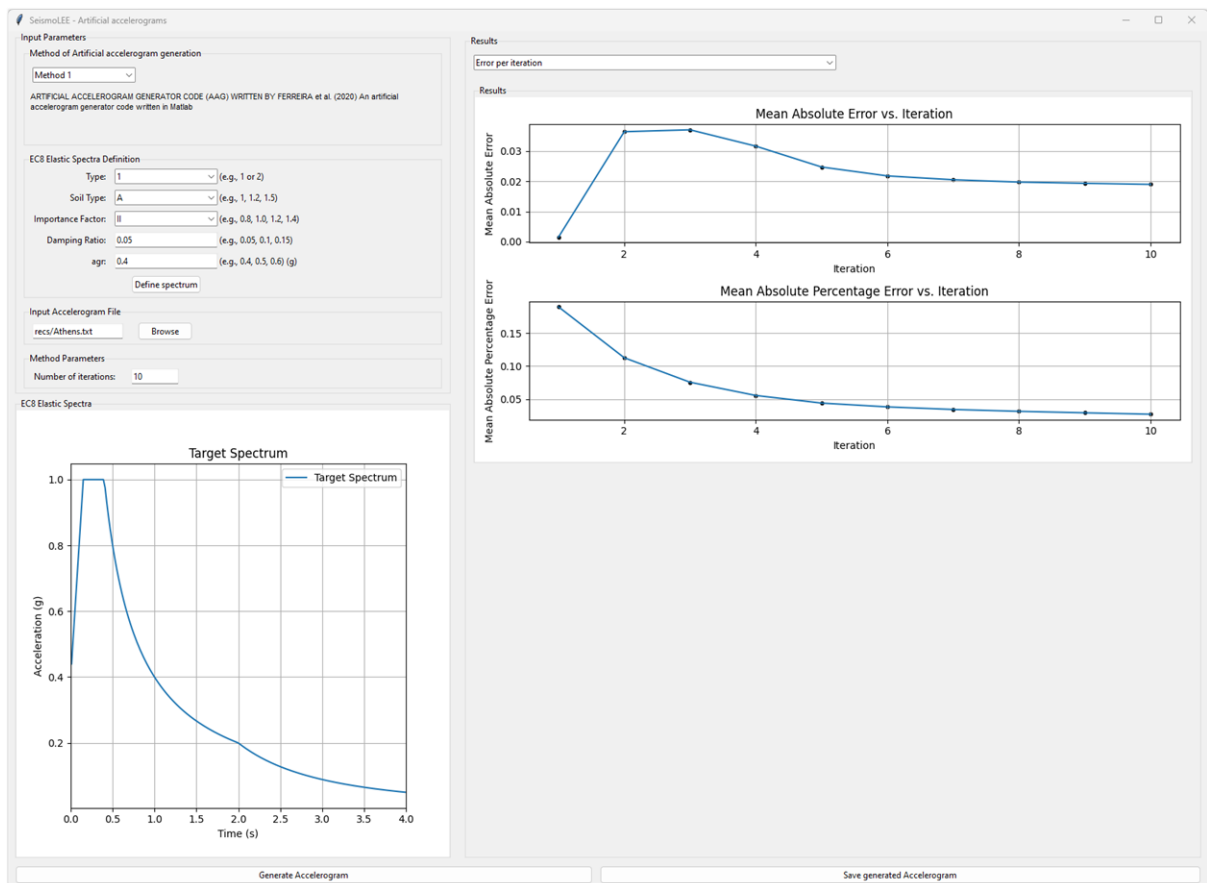
```
def spectrums_mean_error(Sa_targ, art_mean_spectrum):
```

```
    # mean error TARGET SPECTRUM - GENACC SPECTRUM
    mean_error = np.abs(np.trapz(art_mean_spectrum[0], art_mean_spectrum[1])
        - (np.trapz(Sa_targ[0], Sa_targ[1])))
```

```
    return mean_error
```

```
def calc_mape(actual, predic):
```

```
    return np.mean(np.abs((actual - predic) / actual))
```



Εικόνα 4.10: Διαγράμματα σφάλματος – επανάληψης

Ακόμα, το πρόγραμμα παρουσιάζει έναν πίνακα αποτελεσμάτων με διάφορες χρήσιμες παραμέτρους της εδαφικής διέγερσης, επιλογή «Parameters», που χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία για την αξιολόγηση ενός επιταχυνσιογραφήματος (Εικόνα 4.14). Οι διαθέσιμες παράμετροι είναι οι εξής:

- PGA, PGV, PGD

Οι παράμετροι PGA, PGV, PGD, αναφέρονται στην μέγιστη τιμή εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης αντίστοιχα. Εκφράζουν τις μέγιστες απόλυτες τιμές που εμφανίζονται στις χρονοϊστορίες του σεισμικού γεγονότος.

- PGV over PGA

Πρόκειται για τον λόγο της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας προς την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση. Χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει την ένταση αλλά και την επικεντρική απόσταση του σεισμικού γεγονότος. Έχει παρατηρηθεί στην βιβλιογραφία [12], πως ο λόγος $\frac{PGV}{PGA}$ παρουσιάζει ευθεία αναλογία με την απόσταση από τη σεισμική εστία.

- Maximum Arias Intensity (I_A)

Το μέγεθος *max Arias intensity* ορίζεται ως η συνολική ενέργεια ανά μονάδα βάρους που αποθηκεύεται σε ένα σύνολο μονοβάθμιων ταλαντωτών, χωρίς απόσβεση, καθ' όλη την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Εκφράζεται σε όρους ταχυτήτων. Τείνει να υπερεκτιμάει την ένταση σεισμικών γεγονότων με μεγάλη διάρκεια, καθώς λαμβάνει υπόψη του τη συνολική τους διάρκεια, καθώς και σεισμών με μεγάλη επιτάχυνση και ευρύ φάσμα συχνοτικού περιεχομένου. Στην Εξ. (4-15) παρουσιάζεται η εξίσωση υπολογισμού του μεγέθους, όπου T_{tot} , η συνολική χρονική διάρκεια του σεισμού, και $a_g^2(t)$, το τετράγωνο της χρονοϊστορίας των επιταχύνσεων, και στη συνέχεια παρατίθεται ο σχετικός κώδικας υπολογισμού.

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_{tot}} a_g^2(t) dt \quad (4-15)$$

```
def get_Arias_int(acc, dtacc):
    # Arias Intensity
    arias = (np.pi / 2) * (dtacc * it.cumtrapz(acc * acc, initial=0))

    max_arias = max(arias)
    max_arias_int = arias * 100 / max_arias

    return max_arias_int
```


- RMS Acc, RMS Vel, RMS Disp

Τα μεγέθη αυτά περιγράφουν τις μέσες τετραγωνικές ρίζες των χρονοϊστοριών της επιτάχυνσης $a_g(t)$, της ταχύτητας $v_g(t)$ και της μετατόπισης $u_g(t)$, Εξ. (4-16), (4-17), (4-18).

$$\text{RMS}_{\text{acc}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{tot}}} \int_0^{T_{\text{tot}}} a_g^2(t) dt} \quad (4-16)$$

$$\text{RMS}_{\text{vel}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{tot}}} \int_0^{T_{\text{tot}}} v_g^2(t) dt} \quad (4-17)$$

$$\text{RMS}_{\text{disp}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{tot}}} \int_0^{T_{\text{tot}}} u_g^2(t) dt} \quad (4-18)$$

- Characteristic Intensity (IC)

Η χαρακτηριστική ένταση πρόκειται για ένα μέτρο που προσπαθεί να ποσοτικοποιήσει την δυνητική καταστρεπτικότητα ενός σεισμικού γεγονότος Park(1987). Υπολογίζεται με βάση την Εξ. (4-19).

$$I_C = \text{RMS}_{\text{acc}}^{1,5} \sqrt{T_{\text{tot}}} \quad (4-19)$$

- Cumulative Absolute Velocity (CAV)

Είναι το μέτρο της απόλυτης αθροιστικής τιμής της ταχύτητας. Υπολογίζεται μέσω ολοκλήρωσης της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης Εξ. (4-20).

$$\text{CAV} = \int_0^{T_{\text{tot}}} |a_g(t)| dt \quad (4-20)$$

- Housner Intensity (I_H)

Το μέγεθος *Housner Intensity* ποσοτικοποιεί την σχετική φασματική ένταση ενός σεισμού και υπολογίζεται με βάση το εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την συνάρτηση του φάσματος της ψευδό-ταχύτητας, για το διάστημα περιόδων μεταξύ 0,1 και 2,5 sec. Ομοίως με το max Arias intensity, τείνει να υπερεκτιμάει εξίσου σεισμούς με μεγάλη χρονική διάρκεια. Ωστόσο, λαμβάνει υπόψη του μονάχα ένα συγκεκριμένο συχνοτικό φάσμα, αγνοώντας έτσι

συχνότητες που δεν έχουν σημαντική επίδραση στις συνήθεις κατασκευές του πολιτικού μηχανικού. Ο υπολογισμός του γίνεται με βάση την Εξ. (4-21), όπου S_{pv} το φάσμα ψευδοταχυτήτων.

$$I_H = \int_{0,1}^{2,5} S_{pv}(T, \xi) dT \quad (4-21)$$

- Mean Period (T_{MEAN})

Ο όρος μέση περίοδος, προκύπτει μέσω του Fourier φάσματος (Εξ. (4-22)), όπου C_i το εύρος Fourier για κάθε συχνότητα f_i μεταξύ του εύρους τιμών 0.25-20 Hz.

$$T_{MEAN} = \frac{\sum C_i^2 / f_i}{\sum C_i^2} \quad (4-22)$$

- Sustained Max Acc and Vel

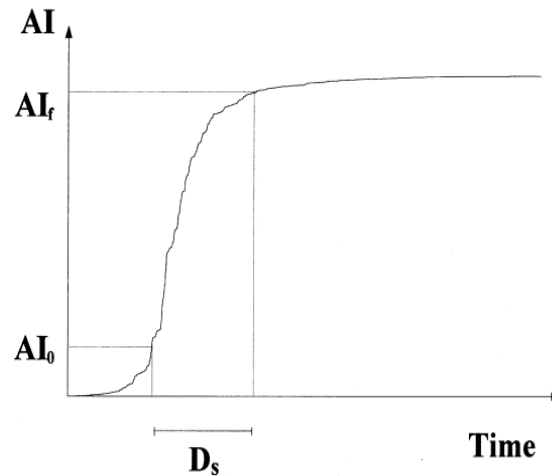
Πρόκειται για την τρίτη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης, όπως προτείνεται στο Nuttli (1979).

- Sustained Max Acc and Vel

Αναφέρεται στην μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης που προκύπτει έπειτα από την εφαρμογή χαμηλοπερατών φίλτρων στο εξεταζόμενο επιταχυνσιογράφημα, λαμβάνοντας συχνότητα διακοπής 9 Hz, σύμφωνα με το Benjamin and Associates(1988).

- Significant Duration

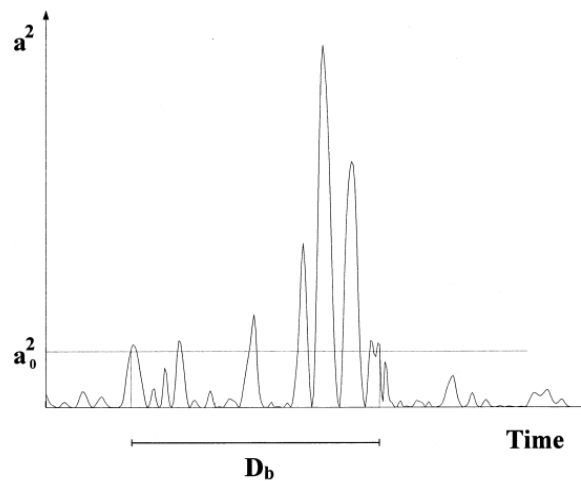
Όπως περιεγράφηκε και νωρίτερα, ο όρος της σημαντικής διάρκειας ενός σεισμικού γεγονότος αναφέρεται στην χρονική διάρκεια κατά την οποία εκλύεται το 90% της συνολικής σεισμικής ενέργειας και έχει ευθεία αναλογία με την καταστρεπτικότητα του σεισμού. Προκύπτει μέσω του διαγράμματος «Husid» και υπολογίζεται ως η διάρκεια που μεσολαβεί μεταξύ των τιμών t_5 , t_{95} , όπου $H_{us}(t_5) = 5\%$ και $H_{us}(t_{95}) = 95\%$. Στην Εικόνα 4.11 αναπαρίσταται και γραφικά το διάστημα της σημαντικής διάρκειας.



Εικόνα 4.11: Γενικό διάγραμμα ορισμού του significant duration [Bommer and Martinez (1999)]

- Bracketed Duration

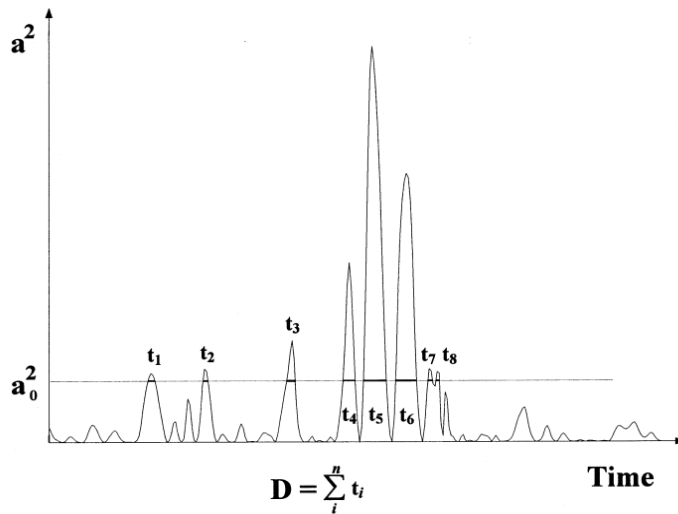
Εκφράζει το συνολικό χρονικό διάστημα που προκύπτει από την πρώτη έως και την τελευταία εμφάνιση μιας εξεταζόμενης τιμής της επιτάχυνσης της υπό μελέτη χρονοϊστορίας. Το λογισμικό λαμβάνει αυτόματα εξεταζόμενη τιμή ίση με το 5% της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης.



Εικόνα 4.12: Γενικό διάγραμμα ορισμού του bracketed duration [Bommer and Martinez (1999)]

- Uniform Duration

Εκφράζει την συνολική χρονική διάρκεια κατά την οποία η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης υπερβαίνει μία εξεταζόμενη τιμή. Στην Εικόνα 4.13, αναπαρίσταται σχηματικά ο ορισμός του μέτρου αυτού. Το λογισμικό λαμβάνει και πάλι αυτόματα εξεταζόμενη τιμή ίση με το 5% της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης.



Εικόνα 4.13: Γενικό διάγραμμα ορισμού του uniform duration [Bommer and Martinez (1999)]

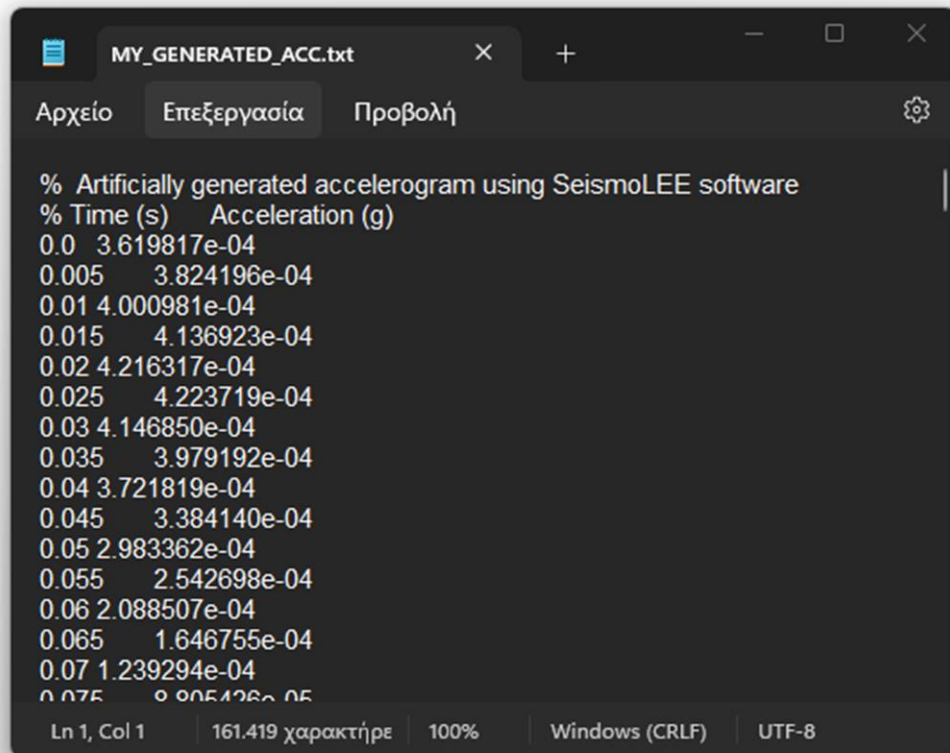
- Total Duration

Αναφέρεται στην συνολική διάρκεια του εξεταζόμενου σήματος.

Results		
Parameters		
Results		
Parameter	Value	
PGA	0.3821	
PGV	0.3678	
PGD	0.0994	
PGV over PGA	0.9625	
Max Arias Intensity	0.1697	
Max Arias Velocity	0.1934	
Max Arias Displacement	0.0222	
RMS Acc	0.0569	
RMS Vel	0.0608	
RMS Disp	0.0206	
Characteristic Intensity	0.0784	
Cumulative Abs Vel	0.9937	
Housner Intensity	6.4369	
Mean Period	0.5071	
Sustained Max Acc	0.3402	
Sustained Max Vel	0.2771	
Effective Design Acc	0.3237	
Significant Duration	8.965	
Bracketed Duration	10.78	
Uniform Duration	3.705	
Total Duration	33.36	
Mean Absolute Error	0.019	
Mean Absolute Percentage Error	0.0269	

Εικόνα 4.14: Πίνακας ποσοτικών χαρακτηριστικών τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος

Τέλος, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να αποθηκεύσει το παραγόμενο επιταχυνσιογράφημα σε αρχείο κειμένου με μορφή *.txt* (Εικόνα 4.15). Το εξαγόμενο αρχείο κειμένου έχει δομή τέτοια ώστε να είναι αναγνωρίσιμο από την πλειοψηφία των λογισμικών που δέχονται αρχεία τέτοιας μορφής ως καταγραφές επιταχυνσιογραφημάτων, για περαιτέρω επεξεργασία. Σε αυτό σημειώνονται και πληροφορίες για τις στήλες του χρόνου και των επιταχύνσεων, όπως επίσης και οι μονάδες μέτρησης αυτών.



The image shows a text editor window titled "MY_GENERATED_ACC.txt". The window has a menu bar with "Αρχείο", "Επεξεργασία", and "Προβολή" options. The main content area displays the following text:

```
% Artificially generated accelerogram using SeismoLEE software
% Time (s)   Acceleration (g)
0.0 3.619817e-04
0.005 3.824196e-04
0.01 4.000981e-04
0.015 4.136923e-04
0.02 4.216317e-04
0.025 4.223719e-04
0.03 4.146850e-04
0.035 3.979192e-04
0.04 3.721819e-04
0.045 3.384140e-04
0.05 2.983362e-04
0.055 2.542698e-04
0.06 2.088507e-04
0.065 1.646755e-04
0.07 1.239294e-04
0.075 0.905126e-04
```

The status bar at the bottom indicates "Ln 1, Col 1", "161.419 χαρακτήρες", "100%", "Windows (CRLF)", and "UTF-8".

Εικόνα 4.15: Εξαγωγή χρονοϊστορίας τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος σε αρχείο *.txt*

5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

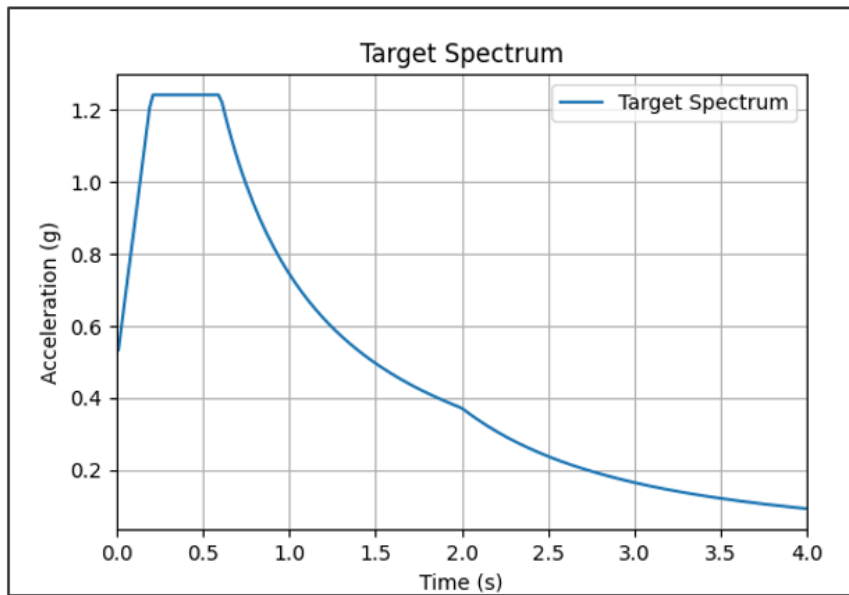
Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών μεθόδων που μελετώνται, μέσω ενός κοινού παραδείγματος. Όλες οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν καθώς και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγιναν με τη χρήση του λογισμικού που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στην συνέχεια λοιπόν του κεφαλαίου αυτού θα παρουσιαστούν τα δεδομένα του παραδείγματος που εξετάστηκαν, και έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε μέθοδο ξεχωριστά.

5.1 Δεδομένα Παραδείγματος

Αρχικά καθορίζεται το κοινό ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων του EC8 από το οποίο θα προκύψουν και τα συμβατά παραγόμενα επιταχυνσιογραφήματα. Επιλέχθηκε το φάσμα με τις παραμέτρους που παρατίθενται παρακάτω, Πίνακας 5-1.

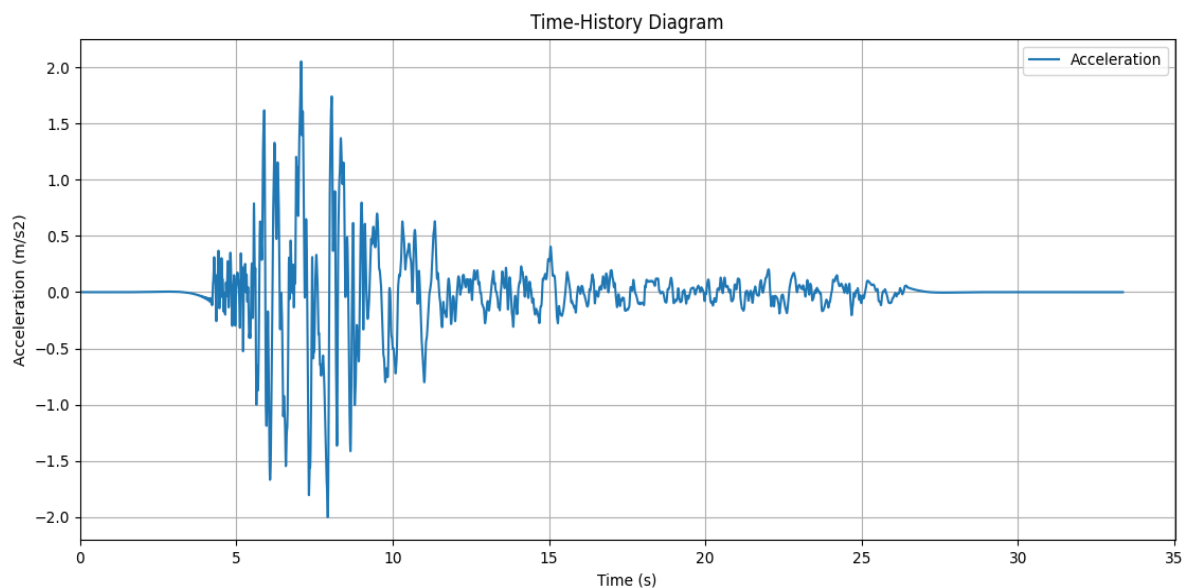
Πίνακας 5-1: Παράμετροι κοινού φάσματος στόχου

Ελαστικό Φάσμα EC8	
T	1
Soil type	C
γ	II
Damping	0.05
<u>agr</u>	0.36



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα φάσματος στόχου

Για την εφαρμογή των μεθόδων 1 και 3, ορίζεται ακόμα ένα μητρικό σήμα (seed record) το οποίο απαιτείται για την λειτουργία τους. Έτσι επιλέχθηκε μια πραγματική καταγραφή, από τον σεισμό της Αθήνας στις 13/9/1986. Η διάρκεια της καταγραφής του σεισμικού γεγονότος ήταν 33 sec, με σημαντική διάρκεια (significant duration) 5,4 sec, ενώ η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) που σημειώθηκε ήταν 0,22 g. Στην Εικόνα 5.2, φαίνεται η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων του σεισμού που επιλέχθηκε. Στην καταγραφή αυτή, έχει εφαρμοσθεί διόρθωση γραμμής βάσης.

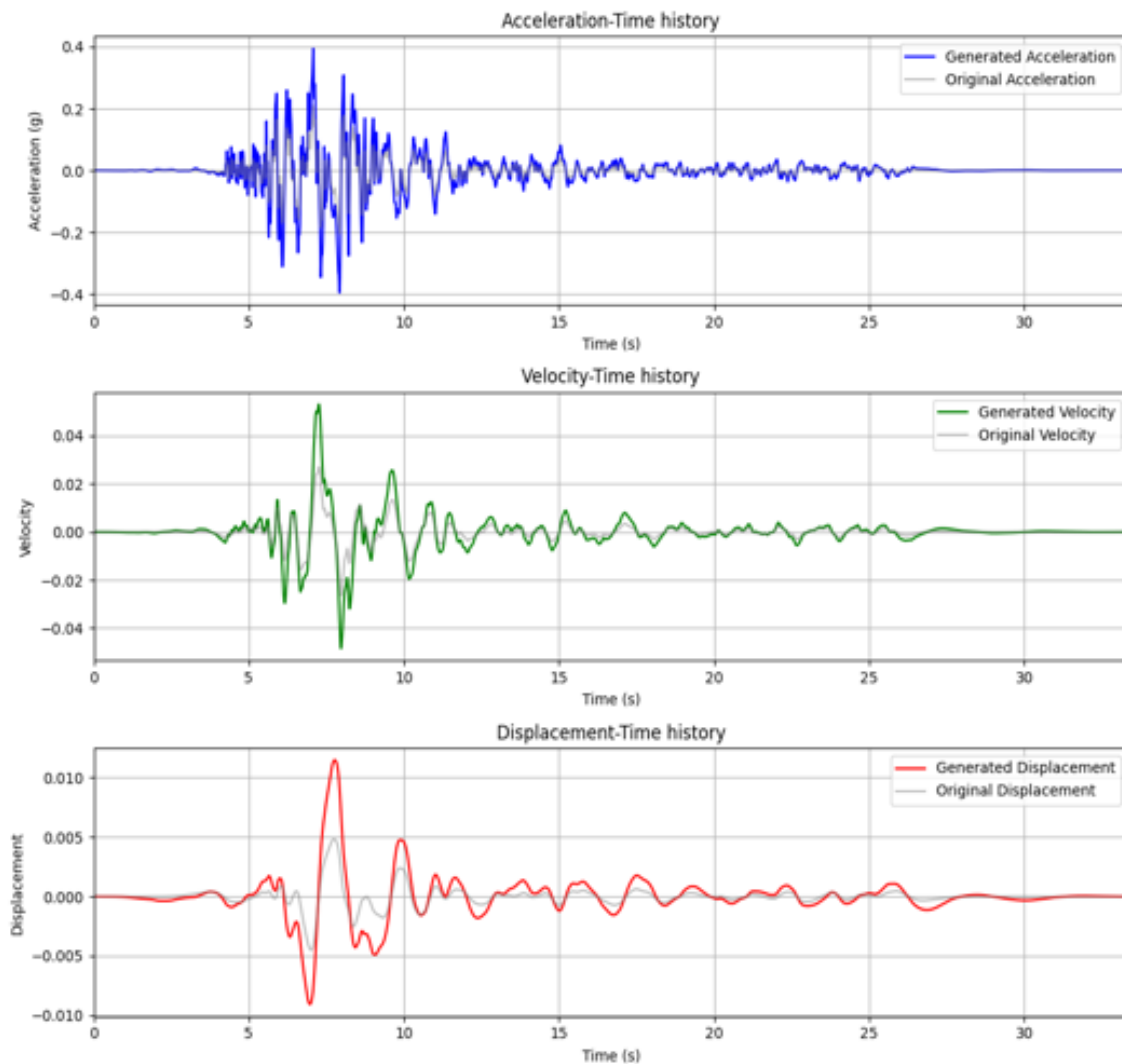


Εικόνα 5.2: Σεισμική καταγραφή του σεισμού της Αθήνας 13.9.1986

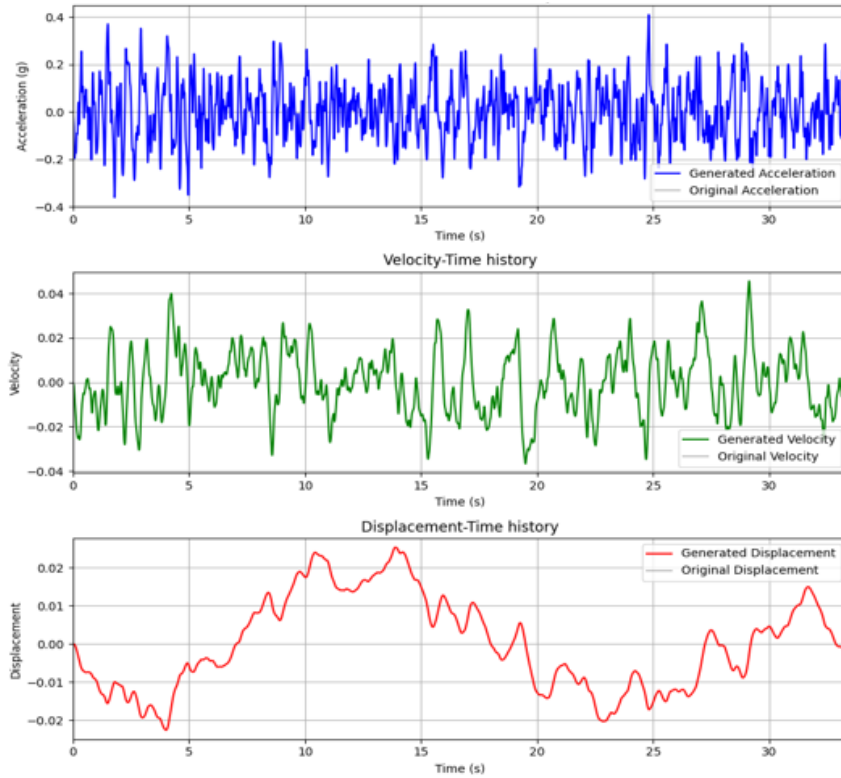
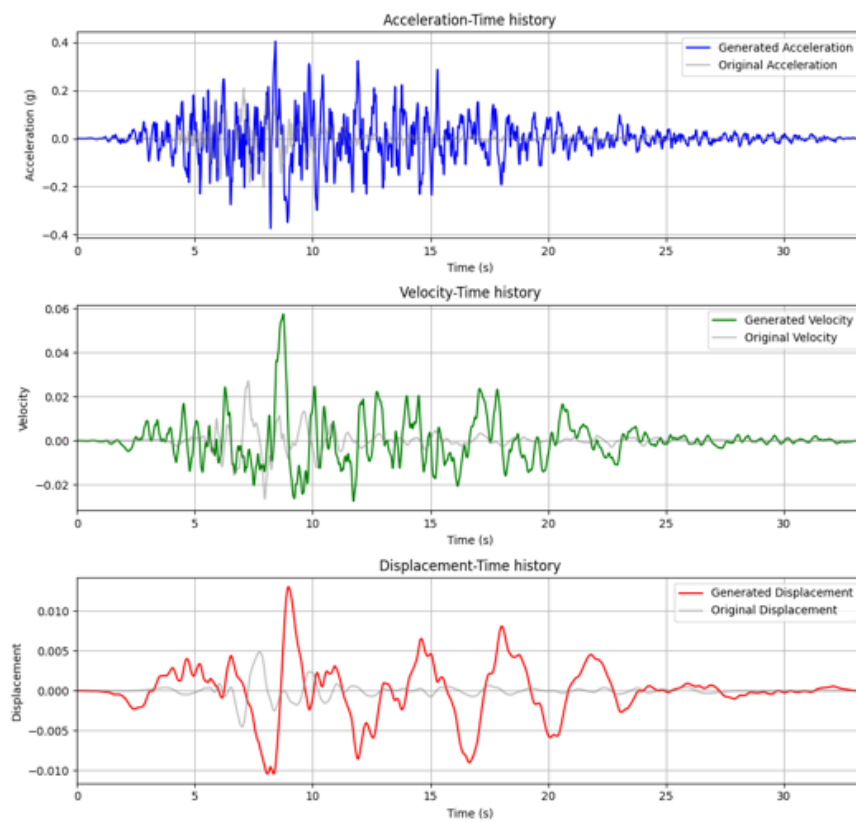
Ακόμα θα εξεταστούν τα αποτελέσματα για 1, 5 και 20 βήματα επαναλήψεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για κάθε επανάληψη ξεχωριστά παρακάτω.

5.1.1 1^η επανάληψη

Τα αποτελέσματα που παράγονται για μία μόνο διορθωτική επανάληψη περιμένουμε να μην έχουν ικανοποιητικό βαθμό σύγκλισης με το φάσμα στόχου που έχουμε ορίσει. Παρ' όλα αυτά, έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η κάθε μέθοδος.



Εικόνα 5.3: Χρονοϊστορίες **Μεθόδου 1**, 1^η επανάληψη

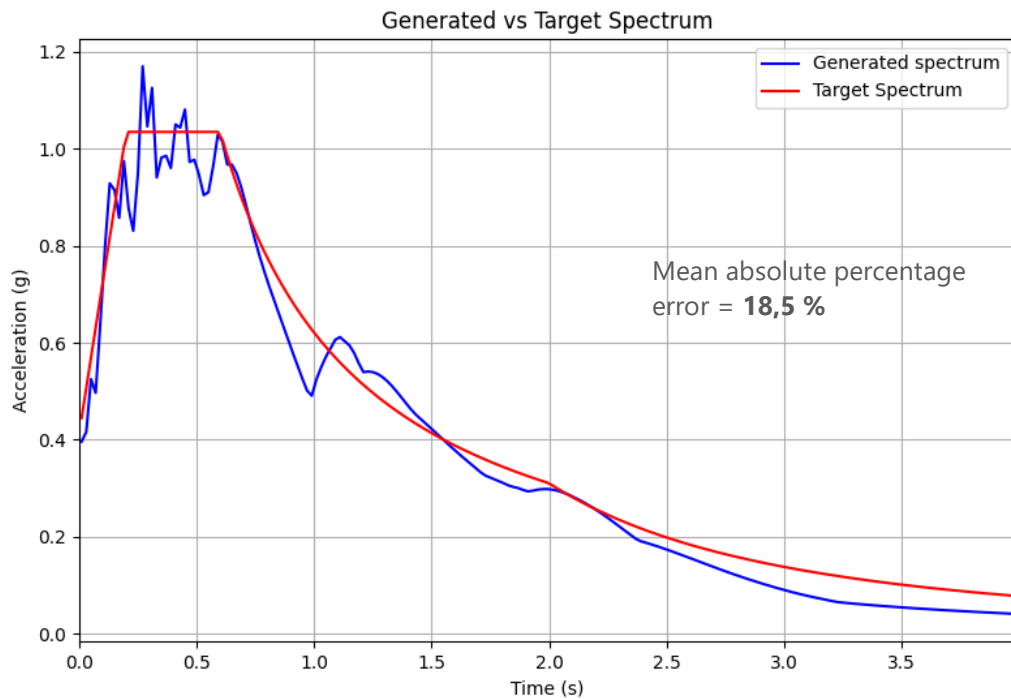
Εικόνα 5.4: Χρονοϊστορίες **Μεθόδου 2**, 1^η επανάληψηΕικόνα 5.5: Χρονοϊστορίες **Μεθόδου 3**, 1^η επανάληψη

Στις Εικόνα 5.3, Εικόνα 5.4 και Εικόνα 5.5, παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες σε όρους επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης, για κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Στο στάδιο αυτό, η κάθε μέθοδος έχει εφαρμόσει μία μονάχα διορθωτική επανάληψη. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η Εικόνα 5.3, όπου παρατηρείται ένας μεγάλος βαθμός ταύτισης της αρχικής καταγραφής που έχουμε εισάγει με το παραγόμενο επιταχυνσιογράφημα. Υπάρχει μονάχα μία μικρή απόκλιση στο πλάτος των τιμών των δύο σημάτων, η οποία οφείλεται στον συντελεστή μεγέθυνσης που εφαρμόζει η Μέθοδος 1. Αυτό φαίνεται και από τη χρονοϊστορία των μετακινήσεων, όπου παρατηρείται αντίστοιχη μεγέθυνση των τιμών, ενώ η μορφή παραμένει ίδια. Ωστόσο, είναι εμφανές πως ουδεμία τροποποίηση γίνεται στο συχνοτικό περιεχόμενο του αρχικού σήματος.

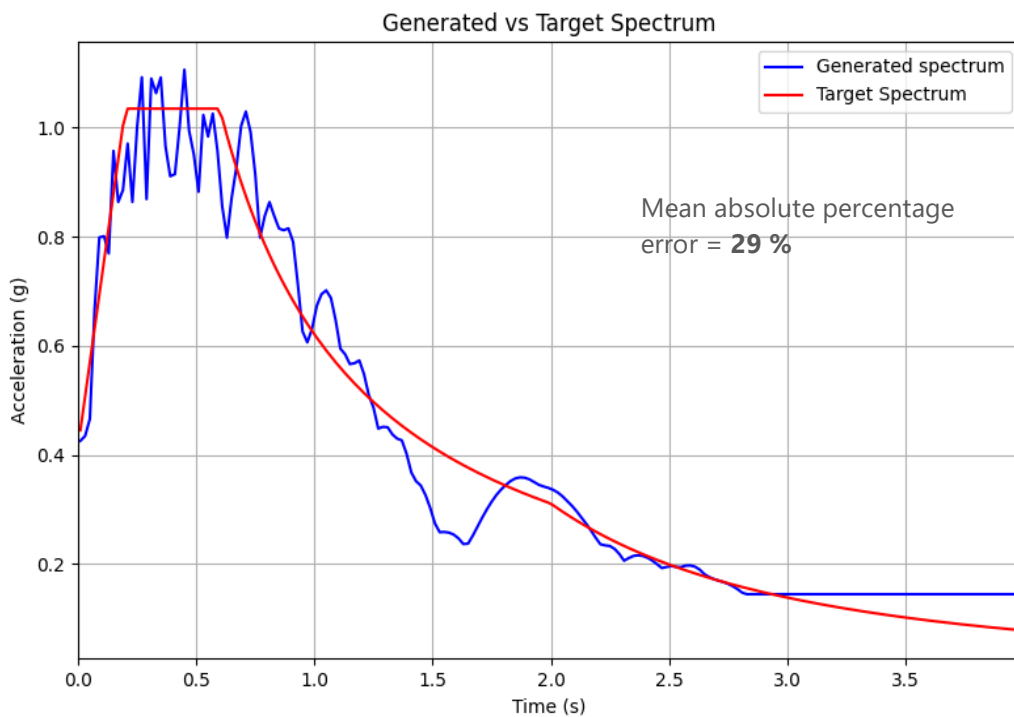
Αντίθετα, στην Μέθοδο 2 βλέπουμε πως το μόνο εμφανές κοινό στοιχείο μεταξύ παραγόμενου και αρχικού σήματος, είναι η εξέλιξη του πλάτους στο πεδίο του χρόνου, πράγμα το οποίο περιμέναμε, καθώς σε αυτή τη μέθοδο εφαρμόζεται η συνάρτηση envelope function η οποία καθορίζεται από το μητρικό σήμα. Εντούτοις, η χρήση του στοχαστικού σήματος που εισάγει αυτή η μέθοδος, αλλοιώνει αρκετά το μητρικό σήμα, και ήδη από την πρώτη επανάληψη έχει δημιουργηθεί ένα νέο τεχνητό σήμα.

Όσον αφορά την Μέθοδο 2, βλέπουμε πως στα διαγράμματα χρονοϊστορίας δεν περιλαμβάνεται το μητρικό σήμα καθώς αυτό δεν εισάγεται στην μέθοδο, και ως εκ τούτου δεν έχει νόημα η σύγκρισή τους. Πάρα μόνο έχει καθοριστεί το ίδιο χρονικό διάστημα εξέλιξης, δηλαδή τα 33 sec. Είναι εμφανές ακόμα πως στην μέθοδο αυτή δεν εφαρμόζεται κάποιο envelope function που θα επέβαλε στο τεχνητό επιταχυνσιογράφημα τροποποίηση του πλάτους των επιταχύνσεων στο πεδίο του χρόνου. Αν μία τέτοια συνάρτηση εφαρμοζόταν, τότε το παραγόμενο σήμα θα είχε χαρακτηριστικά ημι-στάσιμου σήματος (quasi-stationary).

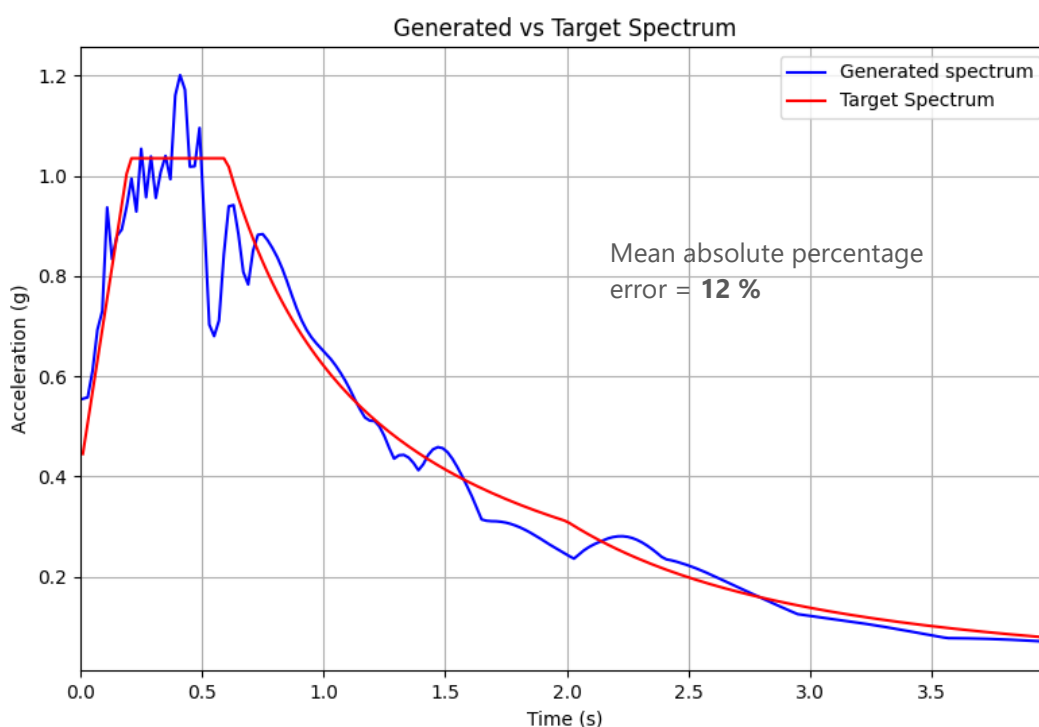
Στη συνέχεια παρατηρούμε τα διαγράμματα των φασματικών επιταχύνσεων Εικόνα 5.6, Εικόνα 5.7 και Εικόνα 5.8. Σε κάθε διάγραμμα αποτυπώνεται και το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα, ούτως ώστε να τα συγκρίνουμε με τα επόμενα βήματα.



Εικόνα 5.6: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης (Φάσμα στόχου - Παραγόμενο φάσμα) **Μέθοδος 1**, 1^η επανάληψη



Εικόνα 5.7: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης (Φάσμα στόχου - Παραγόμενο φάσμα) **Μέθοδος 2**, 1^η επανάληψη

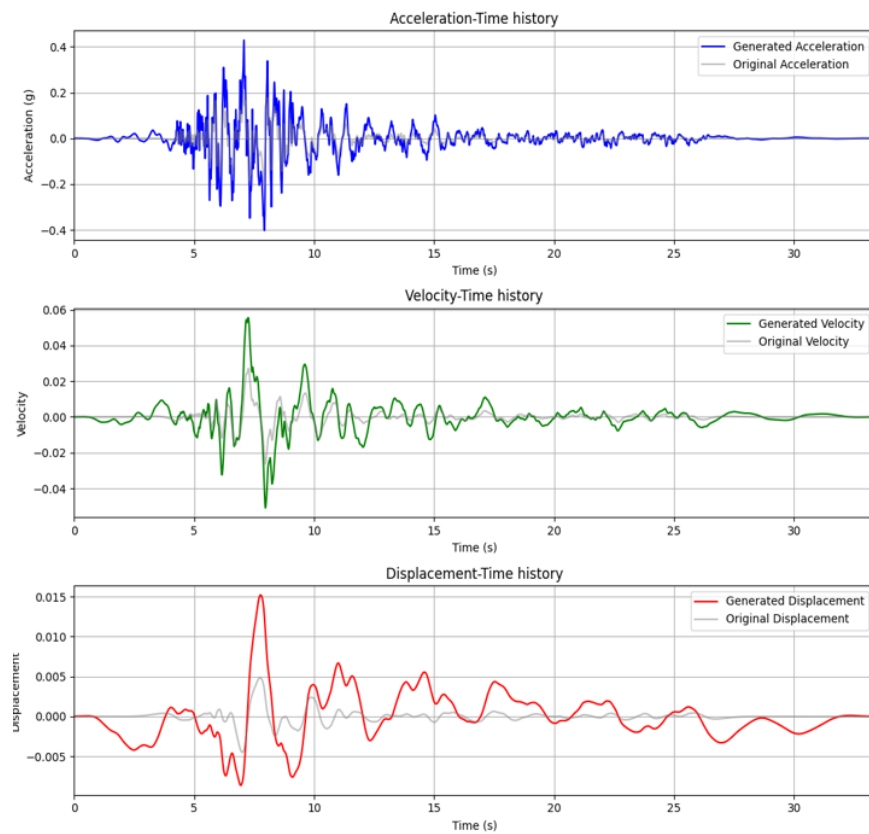
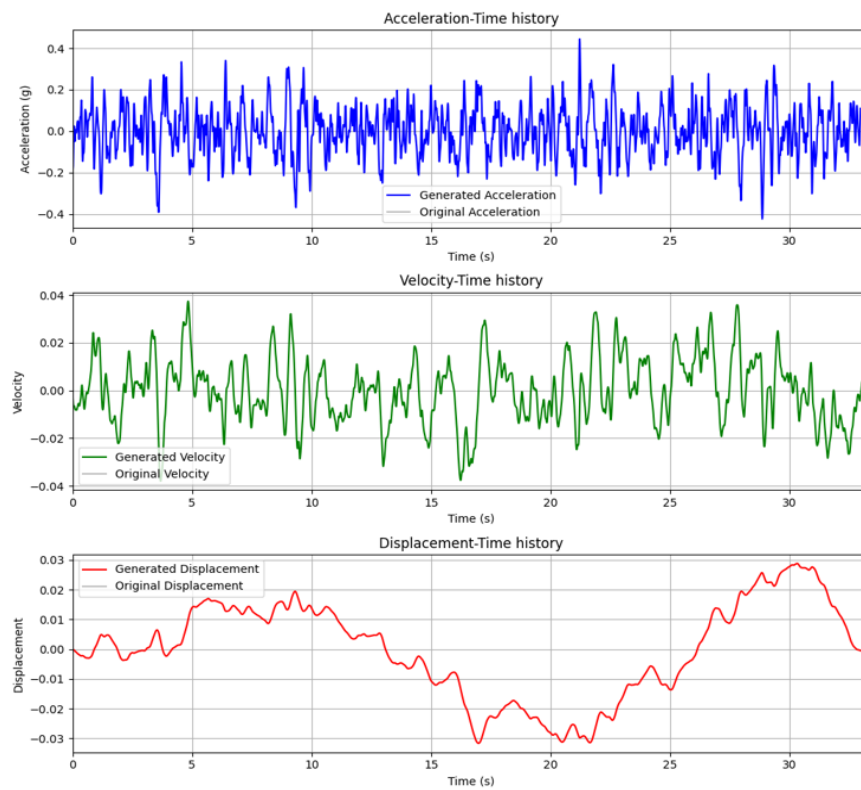


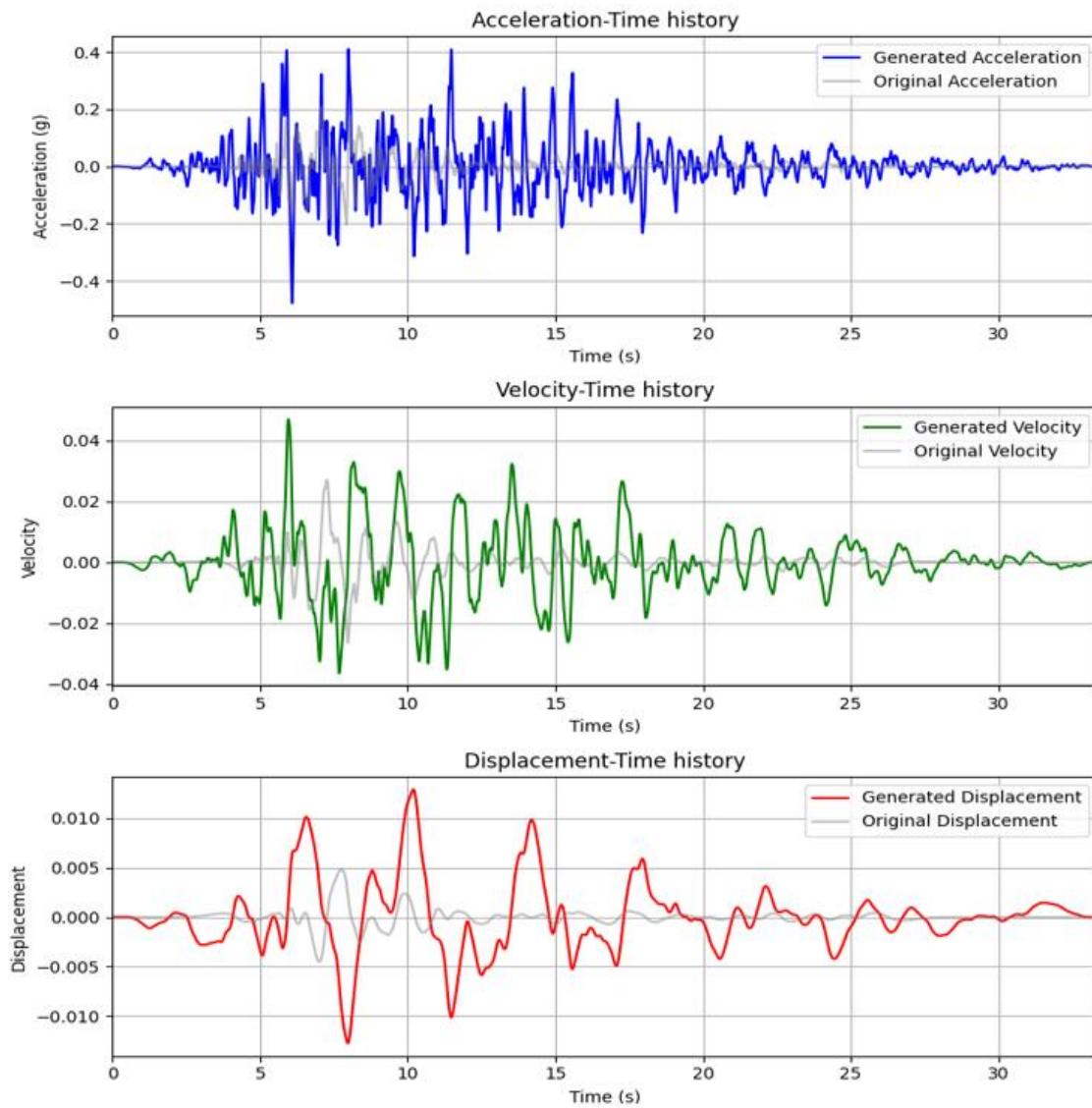
Εικόνα 5.8: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης (Φάσμα στόχου - Παραγόμενο φάσμα) **Μέθοδος 3**, 1^η επανάληψη

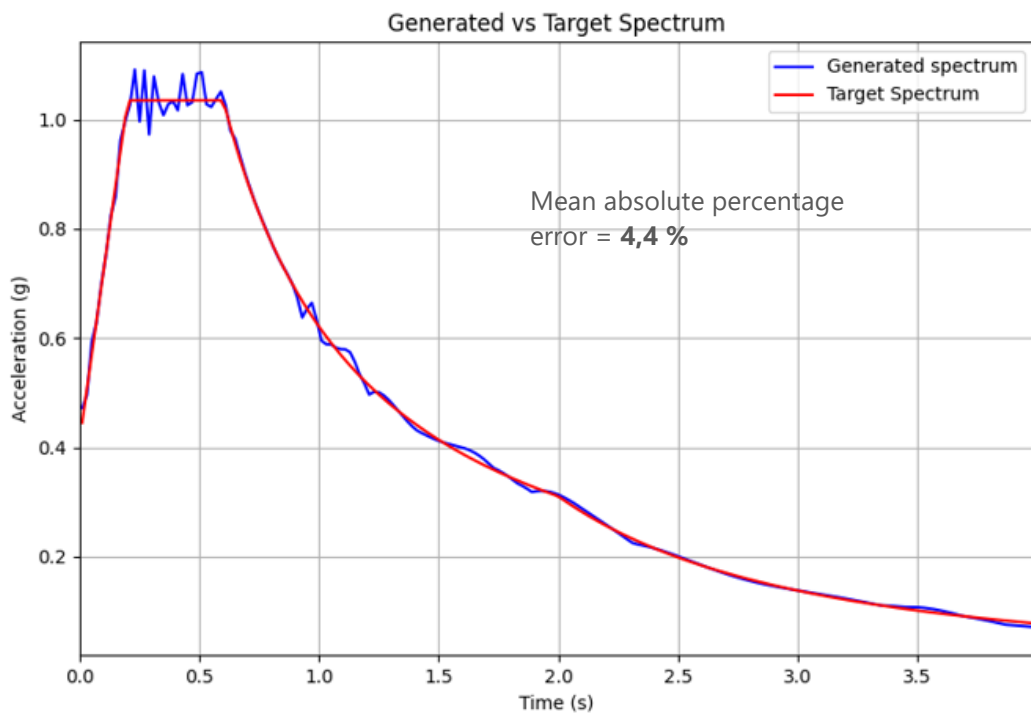
5.1.2 5^η επανάληψη

Για την πέμπτη επανάληψη παρατίθενται οι χρονοϊστορίες των τριών παραγόμενων επιταχυνσιογραφημάτων (Εικόνα 5.9, Εικόνα 5.10 και Εικόνα 5.11). Σημαντικό ενδιαφέρον όμως έχει να παρατηρήσουμε την εξέλιξη της συμβατότητας των διαγραμμάτων φασματικής επιτάχυνσης των παραγόμενων επιταχυνσιογραφημάτων με το αντίστοιχο του φάσματος στόχου. Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις εικόνες Εικόνα 5.12, Εικόνα 5.13 και Εικόνα 5.14, παρατηρούμε ότι το σφάλμα απόκλισης από το φάσμα στόχου έχει μειωθεί αρκετά και για τις τρεις εξεταζόμενες μεθόδους.

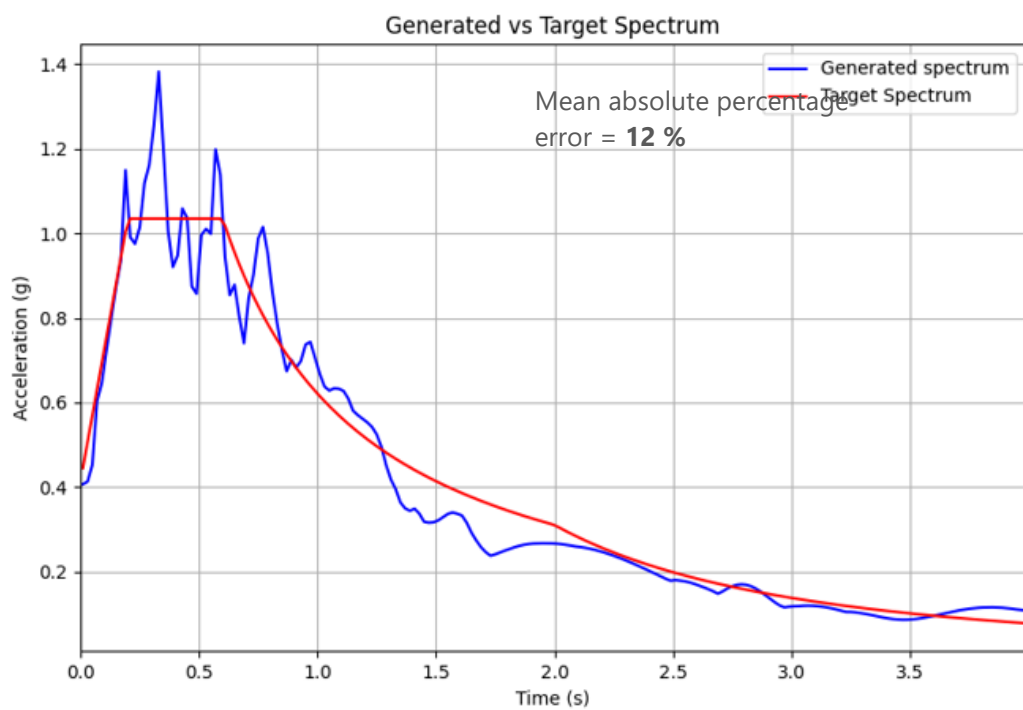
Συγκεκριμένα, το σφάλμα για την μέθοδο 1 έχει μειωθεί από 18,5% στην πρώτη επανάληψη σε 4,4% στην πέμπτη επανάληψη, για την μέθοδο 2 έχει μειωθεί από 29% στην σε 12% και για την μέθοδο 3 έχει μειωθεί από 12% στην πρώτη επανάληψη σε 6%. Βλέπουμε λοιπόν ότι και οι τρεις μέθοδοι καταφέρνουν να βελτιώσουν στις αρχικές διορθωτικές επαναλήψεις την συμβατότητα με το φάσμα επιλογής που έχει καθοριστεί.

Εικόνα 5.9: Χρονοϊστορίες **Μεθόδου 1**, 5^η επανάληψηΕικόνα 5.10: Χρονοϊστορίες **Μεθόδου 2**, 5^η επανάληψη

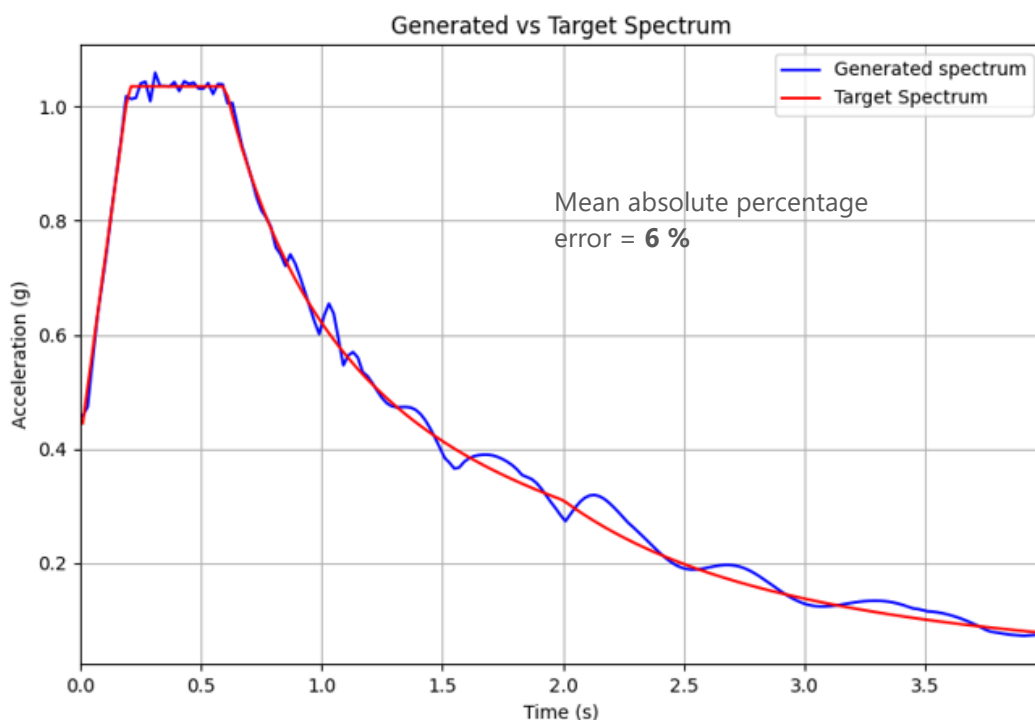
Εικόνα 5.11: Χρονοϊστορίες **Μεθόδου 3**, 5^η επανάληψη



Εικόνα 5.12: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης (Φάσμα στόχου - Παραγόμενο φάσμα) **Μέθοδος 1**, 5^η επανάληψη



Εικόνα 5.13: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης (Φάσμα στόχου - Παραγόμενο φάσμα) **Μέθοδος 2**, 5^η επανάληψη



Εικόνα 5.14: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης (Φάσμα στόχου - Παραγόμενο φάσμα) **Μέθοδος 3**, 5^η επανάληψη

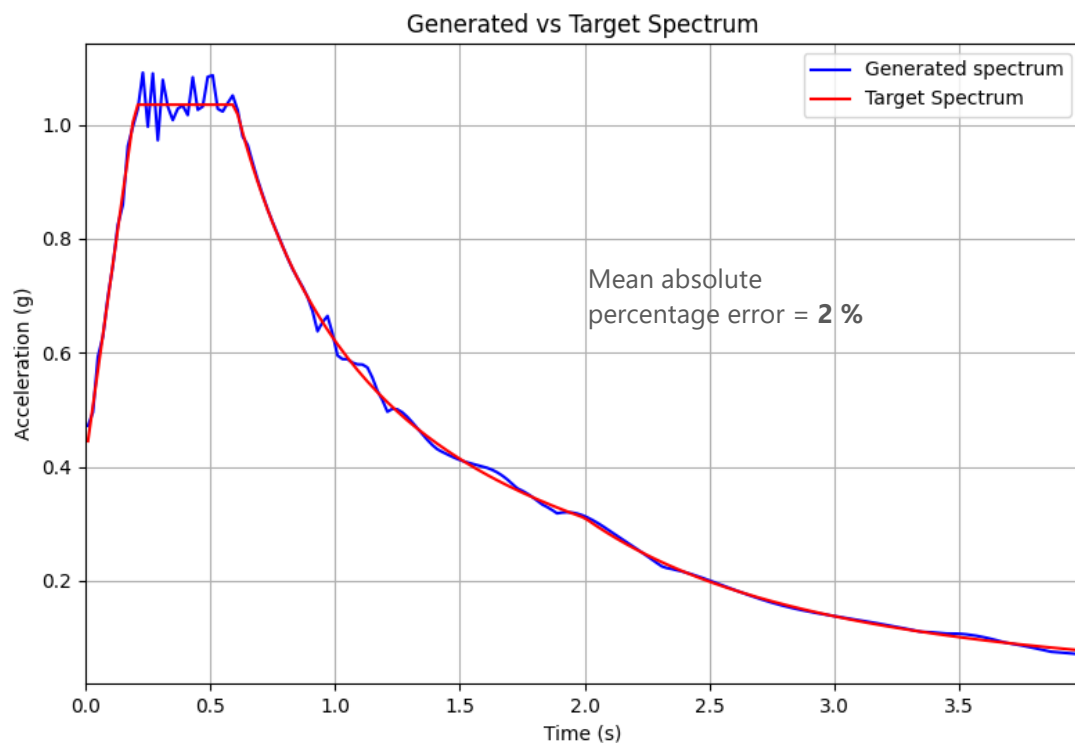
5.1.3 20^η επανάληψη

Παρατηρώντας τα συγκριτικά διαγράμματα των φασματικών επιταχύνσεων, στην εικοστή επανάληψη (Εικόνα 5.15, Εικόνα 5.16, Εικόνα 5.17), βλέπουμε πως η εφαρμογή των παραγόμενων φασμάτων και του φάσματος στόχου, έχει βελτιωθεί ικανοποιητικά για τις Μεθόδους 1 και 3. Ωστόσο, στην περίπτωση της Μεθόδου 2, βλέπουμε πως το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα έχει αυξηθεί, κάτι το οποίο αποτυπώνεται και ποιοτικά στην εικόνα του διαγράμματος. Η μέθοδος φαίνεται να παρουσιάζει αστάθειες στην σύγκλιση μετά από ορισμένο αριθμό επαναλήψεων.

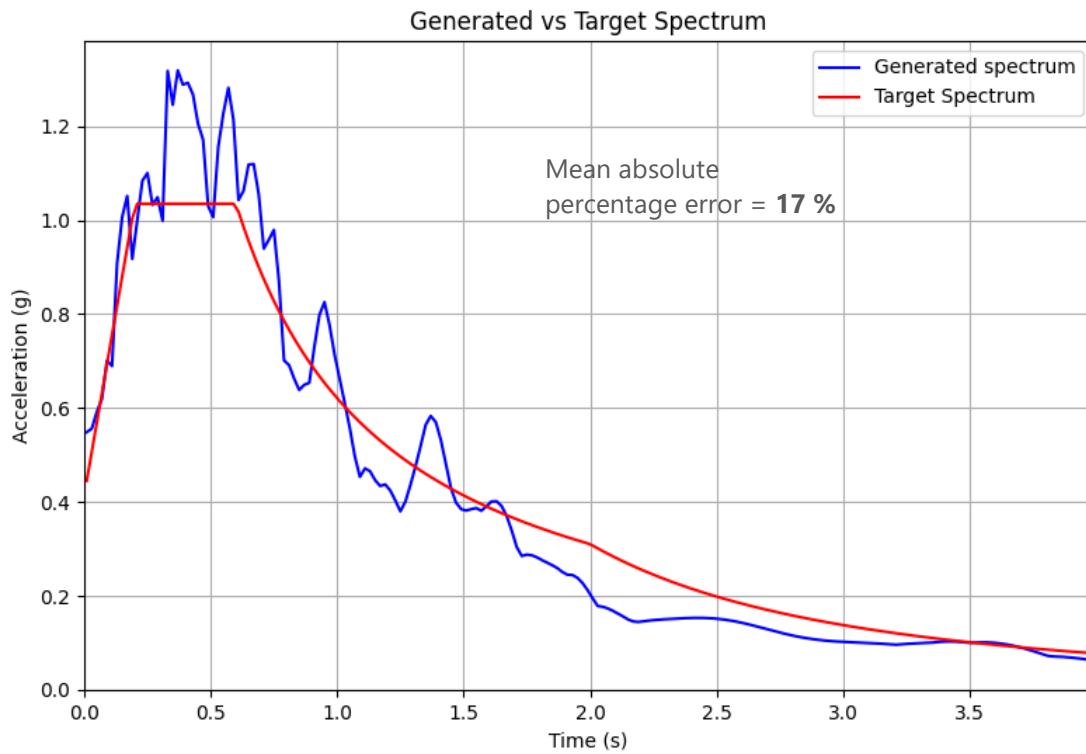
Αξιοσημείωτο αποτελεί το γεγονός ότι οι μέθοδοι 2 και 3 λόγω της στοχαστικής τους προσέγγισης σε κάθε εκ νέου επανάληψη του αλγορίθμου, παράγουν και ένα νέο διαφορετικό επιταχυνσιογράφημα, ακόμα και για τις ίδιες καθορισμένες αρχικές παραμέτρους, γεγονός που κάθε φορά επηρεάζει το τελικό σφάλμα. Ωστόσο, συγκεκριμένα για την Μέθοδο 2, η οποία ακολουθεί διαφορετική μέθοδο σύγκλισης από ότι οι άλλες δύο, διαπιστώθηκε πως επηρεάζεται και η πορεία σύγκλισης του αλγορίθμου. Δηλαδή, για το ίδιο ακριβώς παράδειγμα, μια επανέναρξη του αλγορίθμου της, δύναται να δώσει μια συγκλίνουσα συμπεριφορά συμβατότητας με το καθορισμένο φάσμα, σε αντίθεση με την αποκλίνουσα συμπεριφορά που παρατηρείται εδώ. Ωστόσο, για την παρούσα εργασία κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί αυτό το σενάριο που οδηγεί σε απόκλιση του σφάλματος. Άλλωστε όπως διαπιστώθηκε, αυτό ήταν

και το πιο σύνηθες σενάριο, ύστερα από αρκετές εκδοχές του ίδιου παραδείγματος που εξετάστηκαν.

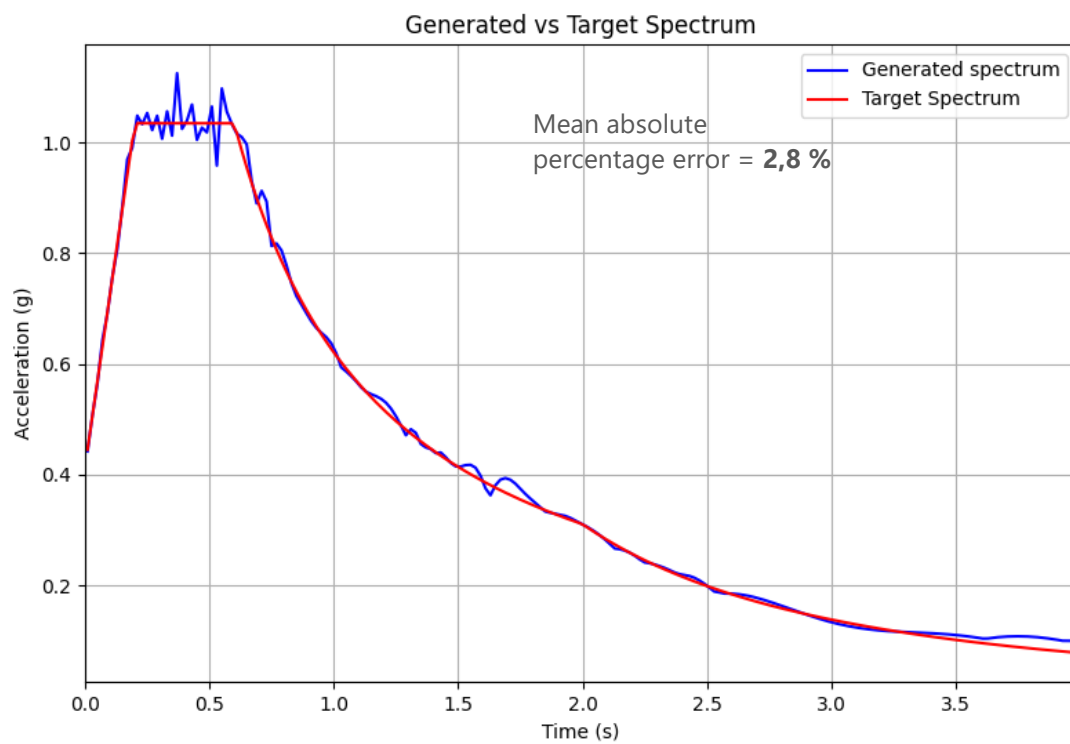
Ακόμα, ίσως θα ήταν πιο δόκιμο να μιλούσαμε σε διασπορά σφάλματος για τις στοχαστικές μεθόδους και όχι σε μεμονωμένες τιμές, όπως γίνεται σε αυτό το κεφάλαιο, ωστόσο αυτό θα δυσχέραινε αρκετά την όλη διαδικασία παρουσίασης των αποτελεσμάτων στα πλαίσια της παρούσης.



Εικόνα 5.15: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης (Φάσμα στόχου - Παραγόμενο φάσμα) **Μέθοδος 1**, 20^η επανάληψη+



Εικόνα 5.16: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης (Φάσμα στόχου - Παραγόμενο φάσμα) **Μέθοδος 2**, 20^η επανάληψη

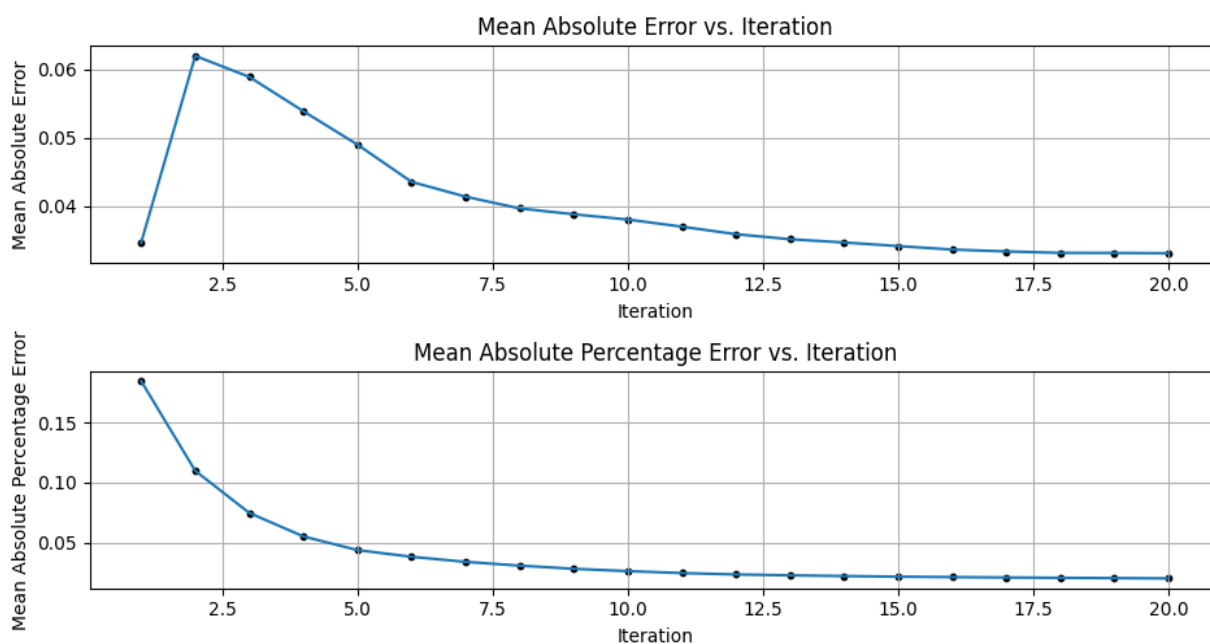


Εικόνα 5.17: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης (Φάσμα στόχου - Παραγόμενο φάσμα) **Μέθοδος 3**, 20^η επανάληψη

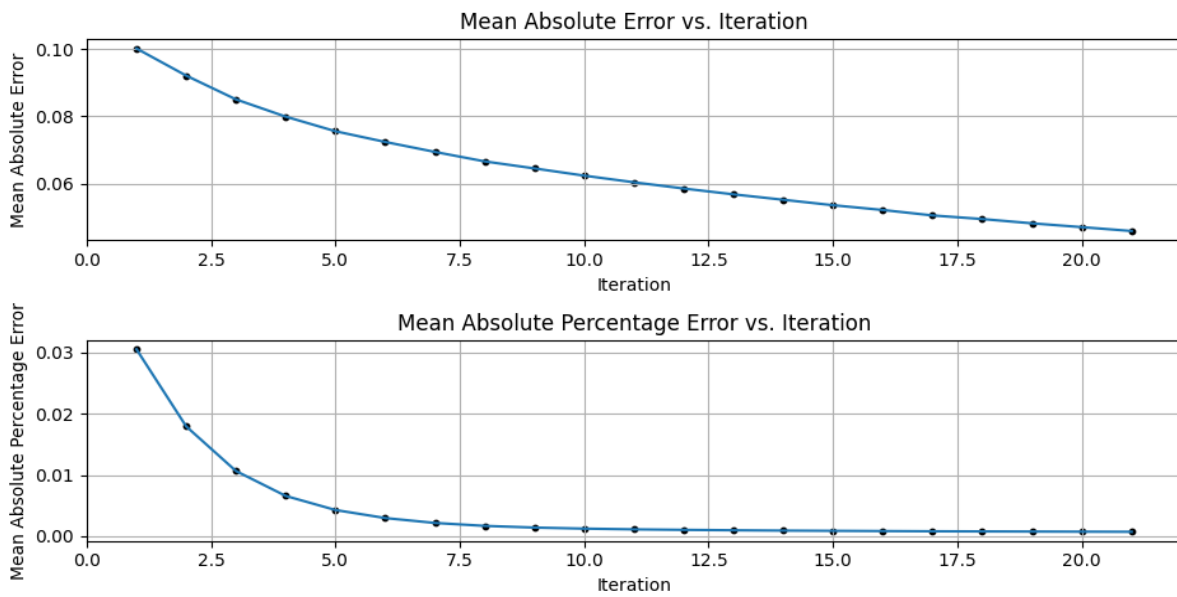
Τέλος, παρατηρούμε την πορεία της σύγκλισης κάθε αλγορίθμου ως την τιμή του ποσοστιαίου σφάλματος σε συνάρτηση με τον αριθμό της επανάληψης. Συγκεκριμένα, προβάλλονται οι τιμές του μέσου απόλυτου λάθους (Mean absolute error) καθώς και του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου λάθους (Mean absolute percentage error). Παρατηρούμε ότι όλες οι μέθοδοι φαίνονται να συγκλίνουν συνεχόμενα.

Στο σημείο αυτό, οφείλουμε να τονίσουμε ότι για την δεύτερη μέθοδο το μετρούμενο λάθος σε κάθε επανάληψη αφορά τη σύγκριση του φάσματος στόχου με το παραγόμενο φάσμα που προκύπτει από την συνάρτηση φασματικής ισχύος (Power spectral density). Μετά την μέθοδο της φασματικής αναπαράστασης που ακολουθεί για την παραγωγή της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης, το τελικό παραγόμενο φάσμα "παραμορφώνεται" και το σφάλμα μεγαλώνει.

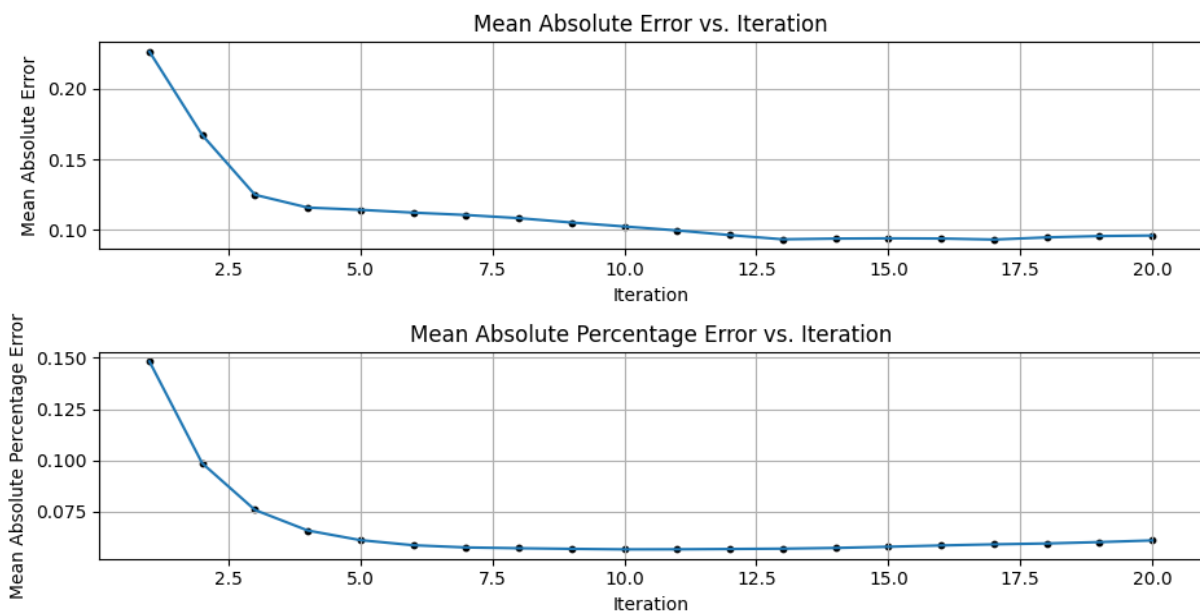
Θα μπορούσαμε έτσι να ισχυριστούμε πως αυτό αποτελεί μία αδυναμία της μεθόδου, καθώς ενώ η σύγκλιση επιτυγχάνεται επιτυχώς μέσα σε κάθε επανάληψη, η δομή της μεθόδου αποτυγχάνει να επιτύχει τελικώς την απαιτούμενη σύγκλιση του παραγόμενου φάσματος.



Εικόνα 5.18: Διάγραμμα σφάλματος – επανάληψης, **Μέθοδος 1**, 20η επανάληψη



Εικόνα 5.19: Διάγραμμα σφάλματος – επανάληψης, **Μέθοδος 2**, 20η επανάληψη



Εικόνα 5.20: Διάγραμμα σφάλματος – επανάληψης, **Μέθοδος 3**, 20η επανάληψη

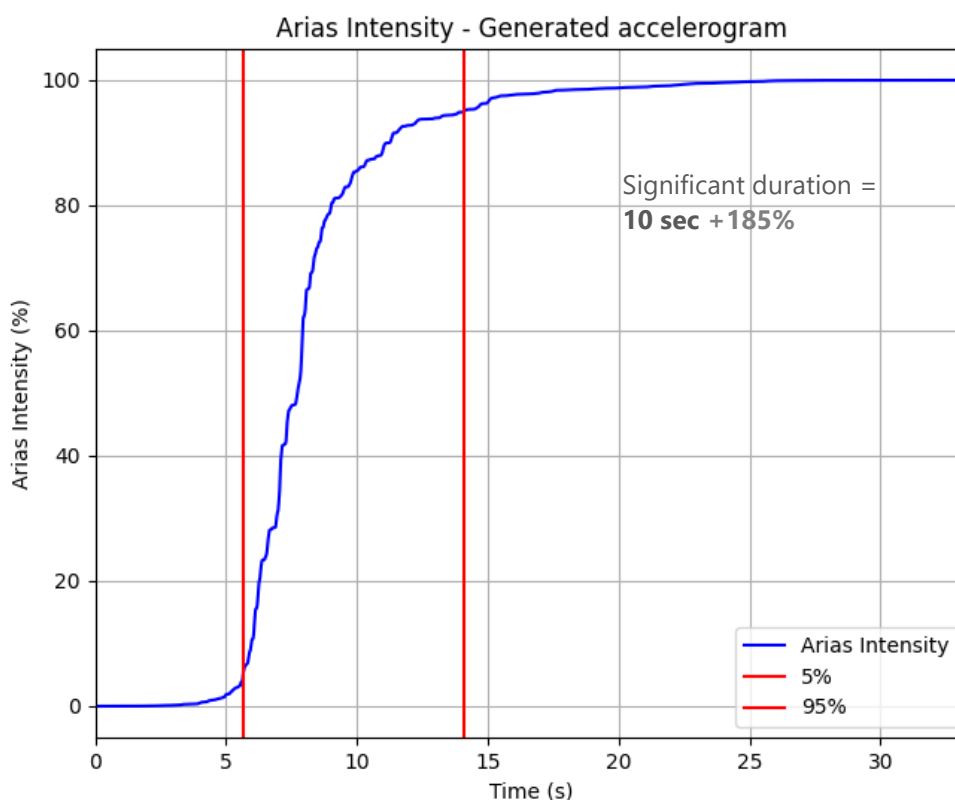
5.1.4 Κατανομή ενέργειας στον χρόνο & καταστρεπτικότητα

Στο σημείο αυτό, παρατηρείται η έκλυση της σεισμικής ενέργειας στην διάρκεια του χρόνου, μέσω των διαγραμμάτων Arias intensity(%) – χρόνου (Εικόνα 5.21, Εικόνα 5.22 και Εικόνα 5.23). Μέσω αυτών των διαγραμμάτων, μπορούμε να διαπιστώσουμε και το μέτρο της σημαντικής διάρκειας (significant duration). Γνωρίζουμε πως το αρχικό επιταχυνσιογράφημα που χρησιμοποιήσαμε ως μητρικό σήμα, είχε σημαντική διάρκεια **5,4 sec**. Μπορούμε συνεπώς να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητα κάθε μεθόδου μέσω του ποσοτικού αυτού μέτρου.

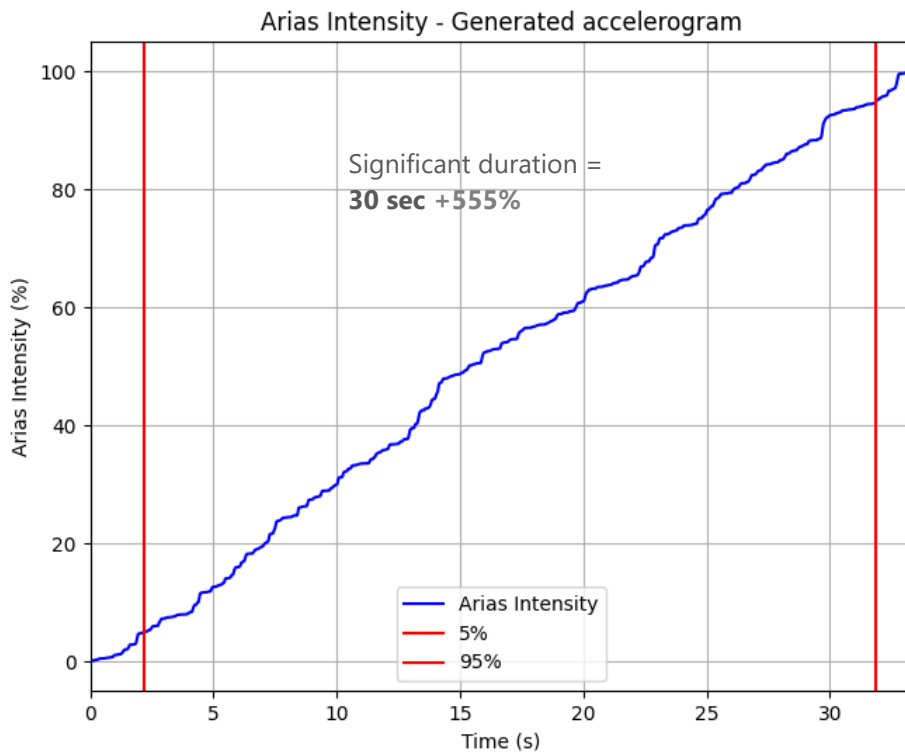
Άλλωστε, η κατανομή της ενέργειας ενός επιταχυνσιογραφήματος και συνεπώς και του μέτρου της σημαντικής διάρκειας, είναι άμεσα συνδεδεμένο με την καταστρεπτικότητα του σεισμικού γεγονότος που είναι και το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός επιταχυνσιογραφήματος.

Βλέπουμε λοιπόν πώς και οι τρεις μέθοδοι, έχουν μεγαλύτερη σημαντική διάρκεια από το αρχικό εισαχθέν επιταχυνσιογράφημα. Η Μέθοδος 2 ωστόσο, αναμέναμε να έχει αυτή τη κατανομή ενέργειας με τον χρόνο - σχεδόν γραμμική - καθώς δεν αξιοποιεί το αρχικό επιταχυνσιογράφημα όπως οι άλλες δύο μέθοδοι.

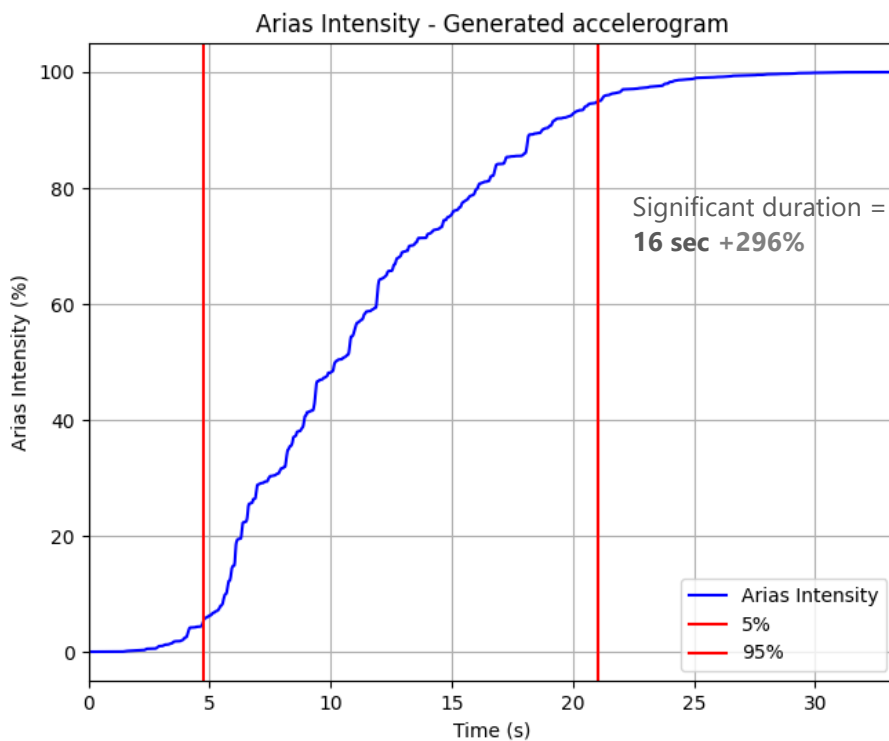
Κατά συνέπεια, βλέπουμε και πως αυτή η μέθοδος έχει και την μεγαλύτερη απόκλιση. Παρατηρούμε πως η Μέθοδος 1 έχει την μικρότερη απόκλιση από το μητρικό σήμα **10 sec (+185%)**. Ακολουθεί η Μέθοδος 3 με **16 sec (+296%)** και την μεγαλύτερη η Μέθοδος 2 με **30 sec (+555%)**.



Εικόνα 5.21: Διάγραμμα Arias intensity(%) – χρόνου, **Μέθοδος 1**



Εικόνα 5.22: Διάγραμμα Arias intensity(%) – χρόνου, **Μέθοδος 2**



Εικόνα 5.23: Διάγραμμα Arias intensity(%) – χρόνου, **Μέθοδος 3**

Ένα ακόμα στοιχείο που έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε είναι αυτό τις καταστρεπτικότητας των παραγόμενων επιταχυνσιογραφήματων. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η καταστρεπτικότητα ενός επιταχυνσιογραφήματος συνδέεται άμεσα με την σημαντική διάρκεια του σήματος. Έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες ποσοτικοποίησής της στην βιβλιογραφία. Εδώ παρουσιάζονται δύο από τους πιο συνήθεις δείκτες που συναντά κανείς για αυτό τον σκοπό, το *max Arias intensity* και το *Housner intensity*.

Παρακάτω βλέπουμε τις τιμές των δεικτών αυτών για τα επιταχυνσιογραφήματα που παράχθηκαν για τις τρεις μεθόδους (Πίνακας 5-2). Παρατηρούμε πως για το μέτρο *max Arias intensity*, η καταστρεπτικότητα παρουσιάζει ευθεία αναλογία με την σημαντική διάρκεια που αναφέρθηκε παραπάνω, και συνεπώς η Μέθοδος 1 καταγραφεί την μικρότερη τιμή **0,24 m/s**. Ακολουθεί η Μέθοδος 3 με **0,45 m/s** και τέλος την μεγαλύτερη τιμή εμφανίζει η Μέθοδος 2 με **0,80 m/s**.

Ωστόσο, ενδιαφέρον εμφανίζει το μέτρο *Housner intensity* όπου παρόλο που παρατηρείται μια παρόμοια αναλογία στις τιμές κάθε μεθόδου, οι στοχαστικές Μέθοδοι 2 και 3 παρουσιάζουν μια ευρεία διασπορά στις τιμές τους, **0,4 – 3,4 g** για την Μέθοδο 2 και **0,4 – 2 g** για την Μέθοδο 3. Η διασπορά αυτή των τιμών παρατηρείται μετά από ένα δείγμα 10 τυχαίων στοχαστικών γεγονότων που κατεγράφησαν για τον ίδιο αριθμό επαναλήψεων.

Πίνακας 5-2: Τιμές καταστρεπτικότητας παραγόμενων επιταχυνσιογραφήματων

	Μέθοδος 1	Μέθοδος 2	Μέθοδος 3
Max Arias Intensity	0,24 m/s	~0,80 m/s	~0,45 m/s
Housner Intensity	1,19 g	0,4 – 3,4 g	0,4 - 2 g

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΞΕΛΙΞΗ

Σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και με βάση και τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 5, μπορούμε να διαπιστώσουμε τα εξής.

Αρχικά, παρατηρούμε πώς ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται στις περιπτώσεις των μεθόδων 1 (προσαρμογή πραγματικών επιταχυνσιογραφήματων) και 2 (στοχαστικά, μη-στάσιμα, τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα), πετυχαίνει εξαιρετικά καλή σύγκλιση με το στοχευόμενο φάσμα απόκρισης, σε σύντομο αριθμό επαναλήψεων. Αντιθέτως, στην περίπτωση της μεθόδου 2, εμφανίζονται αστάθειες στην σύγκλιση όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 5 στην 20^η επανάληψη. Συγκεκριμένα, η συμβατότητα του ισοδύναμου φάσματος που προκύπτει από τη συνάρτηση φασματικής ισχύος, δεν φαίνεται να εξασφαλίζει και την τελική συμβατότητα του παραγόμενου επιταχυνσιογραφήματος.

Ακόμα, συμπεραίνεται πως η μέθοδος προσαρμογής πραγματικών καταγραφών (μέθοδος 1), φαίνεται να είναι η καταλληλότερη συνολικά, για όλα τα σημεία σύγκρισης που εξετάστηκαν, για την προσομοίωση πραγματικών σεισμικών γεγονότων. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να βρεθούν κατάλληλες υπάρχουσες καταγραφές, όπως για παράδειγμα περιοχές με εδαφικές ιδιαιτερότητες κλπ., ή ακόμα περιπτώσεις όπου απαιτούνται αναλύσεις τύπου Monte Carlo, τα στοχαστικά τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα είναι απαραίτητα.

Η χρήση της συνάρτησης envelope function επηρεάζει άμεσα τη σημαντική διάρκεια, και συνεπώς την καταστρεπτικότητα ενός παραγόμενου επιταχυνσιογραφήματος.

Οι στοχαστικές μέθοδοι τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων που εξετάστηκαν φαίνεται να παράγουν επιταχυνσιογραφήματα με μεγάλη διακύμανση στην καταστρεπτικότητα, γεγονός που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους.

Οι μέθοδοι παραγωγής στάσιμων τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, δεν φαίνεται να έχουν άμεση εφαρμογή στην ανάλυση των κατασκευών, καθώς όπως διαπιστώθηκε παράγουν επιταχυνσιογραφήματα με μη ρεαλιστική κατανομή ενέργειας, γεγονός που θα οδηγούσε σε υπερδιαστασιολόγηση μιας πραγματικής κατασκευής.

Ένα σημείο που έχει μεγάλο ενδιαφέρον να αναφερθεί ως πρόταση για περαιτέρω έρευνα, αποτελεί η χρήση των παραγόμενων επιταχυνσιογραφημάτων σε εφαρμογές μη γραμμικής ανάλυσης κατασκευών. Συγκεκριμένα, έχει αξία να μελετηθεί η σχέση των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών που εμφανίζει ένα τεχνητό επιταχυνσιογράφημα στην απόκριση των κατασκευών. Ιδιαίτερα, σημαντικό είναι να γίνει μία συσχέτιση των διαφόρων παραμέτρων καταστρεπτικότητας που συναντώνται στην βιβλιογραφία και χαρακτηρίζουν ένα επιταχυνσιογράφημα, με τις βλάβες που αυτά επιφέρουν στις κατασκευές.

Ακόμα, προτείνεται η ανάπτυξη νέων μεθόδων παραγωγής επιταχυνσιογραφημάτων, οι οποίες χρησιμοποιούν την *Continuous Wavelet Transformation* (CWT) καθώς στην βιβλιογραφία φαίνεται πως κερδίζει έδαφος έναντι των μεθόδων που χρησιμοποιούν τον μετασχηματισμό Fourier.

Ενδιαφέρον επίσης θα είχε και η αξιοποίηση της ρουτίνας AutoRead για την εκπαίδευση και δημιουργία μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης, ικανών να παράγουν τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα.

Όσον αφορά την διαδικασία ανάπτυξης του λογισμικού που δημιουργήθηκε, διαπιστώθηκε πως η χρήση της γλώσσας προγραμματισμού **Python** επιφέρει μειωμένη υπολογιστική ταχύτητα, λόγω του ότι αποτελεί γλώσσα υψηλού επιπέδου. Για την δημιουργία μιας σύγχρονης και αποδοτικής υπολογιστικής εφαρμογής με σκοπό την παραγωγή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων με την γλώσσα αυτή, προτείνεται η χρήση τεχνικών προγραμματισμού που επιταχύνουν ορισμένες διαδικασίες. Συγκεκριμένα, σημαντική επιτάχυνση επιφέρει η χρήση παράλληλου προγραμματισμού σε ρουτίνες επανάληψης όπου διενεργούνται απαιτητικές μαθηματικές εξισώσεις, έτσι ώστε ο συνολικός όγκος των διεργασιών του επεξεργαστή να επιμεριστεί σε πολλαπλούς πυρήνες. Παρόμοια πλεονεκτήματα διαπιστώθηκαν και μέσω της άμεσης μεταγλώττισης του κώδικα (*JIT*).

Ακόμα, η διαδικασία προγραμματισμού του γραφικού περιβάλλοντος του χρήστη (GUI) μέσω της βιβλιοθήκης **tkinter** δεν προτείνεται καθώς εξελίχθηκε σε μία αρκετά επίμονη διαδικασία,

και ο τελικός εκτεταμένος κώδικας που προέκυψε δεν επιτρέπει την συντήρηση και επέκταση του, αλλά το αντίθετο. Αντ' αυτού, συστήνεται η επιλογή άλλων πακέτων προγραμματισμού όπως για παράδειγμα αυτά που παρέχονται στο *.Net Framework* του **Visual Studio** και συγκεκριμένα στο περιβάλλον του *Windows Form* ή του *Windows Presentation Form*.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bommer J J and Acevedo A B 2004 THE USE OF REAL EARTHQUAKE ACCELEROGRAMS AS INPUT TO DYNAMIC ANALYSIS *J. Earthq. Eng.* **8** 43–91
- [2] Iervolino I, Maddaloni G and Cosenza E 2008 Eurocode 8 Compliant Real Record Sets for Seismic Analysis of Structures *J. Earthq. Eng.* **12** 54–90
- [3] Ferreira F, Moutinho C, Cunha Á and Caetano E 2020 An artificial accelerogram generator code written in Matlab *Eng. Rep.* **2** e12129
- [4] Shinozuka M and Deodatis G 1991 Simulation of Stochastic Processes by Spectral Representation *Appl. Mech. Rev.* **44** 191–204
- [5] Cacciola P, Colajanni P and Muscolino G 2004 Combination of Modal Responses Consistent with Seismic Input Representation *J. Struct. Eng.* **130** 47–55
- [6] Cacciola P 2010 A stochastic approach for generating spectrum compatible fully nonstationary earthquakes *Comput. Struct.* **88** 889–901
- [7] Jennings, P. C., Housner, G. W., Tsai and N. C. 1968 Simulated Earthquake Motions *Calif. Inst. Technol. Earthq. Eng. Res. Lab.*
- [8] Γιαννή Ή, Φραγκιαδάκης Μ and Μητσάας Ι 2022 Σύγχρονες στοχαστικές μέθοδοι για την γένεση τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων *5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής Τεχνικής Σεισμολογίας*
- [9] EN 1998-1:2004 §3.2.3 2004 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings.
- [10] Boore D M 2003 Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method *Pure Appl Geophys* **160**

-
- [11] Beresnev I A and Atkinson G M 1998 FINSIM--a FORTRAN Program for Simulating Stochastic Acceleration Time Histories from Finite Faults *Seismol. Res. Lett.* **69** 27–32
- [12] McGuire R K Faults as Earthquake Sources
- [13] Yanni H, Fragiadakis M and Mitseas I P 2023 STOCHASTIC GENERATION OF ARTIFICIAL ACCELEROGRAMS USING THE CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM METHOD 9th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (Athens, Greece) pp 5143–54