



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΙΧΑΛΗΣ ΒΑΦΕΙΑΔΑΚΗΣ

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΟΔΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΕΝΑΝΤΙ
ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2025

© 2025 Μιχάλης Βαφειαδάκης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόριος Τσινίδης
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου
 Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης
 Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΟΔΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Μιχάλης Βαφειαδάκης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2025

Επιβλέπων Καθηγητής: Γρηγόριος Τσινίδης, Επίκουρος Καθηγητής ΠΘ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη σεισμική τρωτότητα πρανών μέσω δυναμικών αναλύσεων με τη χρήση του λογισμικού FLAC 2D. Στόχος της μελέτης είναι η εκτίμηση της συμπεριφοράς τριών πρανών με διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που υπόκεινται σε ένα σύνολο σεισμικών διεγέρσεων. Για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις ελαστοπλαστικές παραμέτρους των υλικών και την αλληλεπίδραση εδάφους–σεισμικής φόρτισης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα πρανά με χαμηλότερες τιμές αντοχής και δυσκαμψίας (όπως μειωμένο μέτρο ελαστικότητας, γωνία εσωτερικής τριβής και συνοχή) παρουσιάζουν αυξημένες μετακινήσεις και μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας, επομένως υψηλότερη σεισμική τρωτότητα. Αντίθετα, τα πρανά με βελτιωμένες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες εμφανίζουν πιο σταθερή συμπεριφορά και μικρότερες αποκρίσεις. Η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της ακριβούς εκτίμησης των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών για την αξιόπιστη ανάλυση και αξιολόγηση της σεισμικής ευπάθειας πρανών.

Λέξεις κλειδιά: πρανά, σεισμική συμπεριφορά, σεισμική τρωτότητα, καμπύλες τρωτότητας

SEISMIC BEHAVIOR AND VULNERABILITY OF SLOPES OF ROAD NETWORKS

Michalis Vafeiadakis

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2025

Supervisor: Grigorios Tsinidis, Assistant Professor

Abstract

This diploma thesis investigates the seismic vulnerability of slopes through dynamic analyses using the FLAC 2D software. The main objective is to assess the behavior of three slopes with different sets of physical and mechanical properties under a variety of seismic excitations. For each case, nonlinear dynamic analyses were performed, considering the elastoplastic parameters of the materials and the soil–seismic load interaction. The results indicate that slopes with lower strength and stiffness values (such as reduced elastic modulus, internal friction angle, and cohesion) exhibit increased displacements and a higher probability of failure, and therefore greater seismic vulnerability. In contrast, slopes with improved mechanical properties show more stable behavior and smaller responses. The study highlights the importance of accurately determining geotechnical properties for the reliable analysis and evaluation of the seismic susceptibility of slopes.

Keywords: slopes, seismic behavior, seismic vulnerability, fragility curves

1. Εισαγωγή

1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Κατά τη διάρκεια πρόσφατων σεισμών έχουν παρατηρηθεί αστοχίες πρανών (π.χ. οδικών δικτύων) εξαιτίας σεισμικής ταλάντωσης ή εξαιτίας των καθιζήσεων που προκλήθηκαν από αυτή. Υπό δεδομένες συνθήκες τα πρανή μπορεί να εμφανίσουν μεγάλη τρωτότητα στον σεισμικό κίνδυνο. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίο να ληφθούν σημαντικά μέτρα για τον μετριασμό των φαινομένων που προκαλούνται στα πρανή από σεισμό. Για να συμβεί όμως κάτι τέτοιο, κρίνεται απαραίτητο να έχουμε γνώση για τους κινδύνους που μπορεί να αντιμετωπίζει ένα πρανές, όπως και επίσης και την ανθεκτικότητα του υπό διάφορες συνθήκες.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη σεισμική τρωτότητα πρανών μέσω δυναμικών αναλύσεων με τη χρήση του λογισμικού FLAC 2D. Στόχος της μελέτης είναι η εκτίμηση της συμπεριφοράς τριών πρανών με διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που υπόκεινται σε ένα σύνολο σεισμικών διεγέρσεων. Παράμετροι που θα ληφθούν υπόψιν είναι ο τύπος του εδάφους και οι μηχανικές του ιδιότητες, η κλίση του πρανούς, όπως επίσης και οι διάφορες σεισμικές επιταχύνσεις του εδάφους.

1.3 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η οργάνωση της εργασίας έχει ως εξής:

Στη 2η ενότητα γίνεται μια παρουσίαση ορισμένων περιπτώσεων αστοχιών πρανών από διάφορους σεισμούς ανά τον κόσμο, ενώ παρουσιάζονται οι μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών, όπως επίσης και οι μέθοδοι ανάλυσης τρωτότητας πρανών.

Στην 3η ενότητα παρουσιάζονται οι εξεταζόμενες περιπτώσεις πρανών καθώς και οι αριθμητική τους προσομοίωση στο κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D.

Στην 4η ενότητα παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης, καθώς επίσης και οι καμπύλες τρωτότητας που προέκυψαν από την ανάλυση.

Στην 5η ενότητα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΡΟΣΦΑΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται βλάβες σε πρανή που προκλήθηκαν από σεισμούς υπολογίσιμης έντασης σε διάφορα μέρη του κόσμου. Όπως εύκολα διακρίνεται οι βλάβες δεν ήταν ίδιου τύπου σε όλες τις περιπτώσεις. Παραδείγματος χάρη, στις εικόνες 2.2 και 2.4 φαίνεται κατάρρευση-ολίσθηση του ανώτερου μέρους του πρανούς αλλά χωρίς βλάβη στον δρόμο. Αντίθετα, στις εικόνες 2.1 και 2.3 υπάρχει καθαρή ζημιά σε τμήμα του δρόμου. Τέλος μια άλλη περίπτωση που εύκολα διακρίνεται στις εικόνες 2.5 και 2.6 είναι η πλήρης ολίσθηση μέρους του οδικού πρανούς.



Εικόνα 2.1. Αστοχία οδικού πρανούς από σεισμό στην Κεφαλονιά το 2014 (μέγεθος 5.8 R). Πηγή: lodeproject.polimi.it



Εικόνα 2.2. Αστοχία πρανούς κατά τον σεισμό στην Κεφαλονιά το 2014 (μέγεθος 5.8 R) Πηγή: researchgate.net/fig4



Εικόνα 2.3. Αστοχία πρανούς λόγω σεισμού στην Ταιβάν το 2018. Σεισμός μεγέθους 6,4 R με επίκεντρο κοντά στην γραμμή Χουαλιέν και βάθος 10,6 χιλιόμετρα. Πηγή alamy.com



Εικόνα 2.4. Αστοχία πρανούς λόγω σεισμού στη Νέα Ζηλανδία το 2016 (Μέγεθος 7,8 R), Πηγή: ABC News



Εικόνα 2.5. Αστοχία πρανούς στην Ιαπωνία λόγω σεισμού το 2018 (μέγεθος 5,6 R, βάθος 13 χιλιομέτρων με επίκεντρο κοντά στην πόλη Τακατσούκι).Πηγή:news.sky.com



Εικόνα 2.6. Αστοχία πρανούς που σημειώθηκε λόγω σεισμού στην επαρχία Σιτσουάν της Κίνας το 2008.Πηγή:yicaiglobal.com

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

Η ανάλυση πρανών είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με την μέθοδο της οριακής ισορροπίας πρανών, όπου η ανάλυση γίνεται με την μέθοδο λωρίδων και με την υιοθέτηση της γραμμικής συμπεριφοράς. Οι λωρίδες ουσιαστικά είναι διακριτές περιοχές όπου όταν η διακριτοποίηση είναι πιο μεγάλη σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς, κάτι που απαιτεί περισσότερο χρόνο και κόστος στο θέμα της ανάλυσης. Γενικά ένα πρόβλημα μέσω της διακριτοποίησης μετατρέπεται από ένα συνεχές και εκτενές σε ένα πρόβλημα με μικρότερα τμήματα που μπορούν να επιλυθούν με συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων και στο τέλος να προκύψει μια γενική λύση του προβλήματος. Εναλλακτικά, για τις αναλύσεις ευστάθειας χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι με ορισμένα από αυτά τα εργαλεία επίλυσης να είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, μέθοδος των συνοριακών συνθηκών και των διακριτών στοιχείων.

Όπως προαναφέρθηκε, ο προσδιορισμός της ευστάθειας πρανών γίνεται με χρήση συμβατικών μεθοδολογιών που βασίζονται στην αρχή της οριακής ισορροπίας. Οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας οδηγούν στον προσδιορισμό κρισιμότερων επιφανειών ολίσθησης και των αντίστοιχων συντελεστών ασφαλείας με στόχο την διερεύνηση της ευστάθειας πρανών. Στις διακριτές περιοχές όπου χωρίζεται το πρόβλημα εξετάζεται η συνεισφορά της λωρίδας στην γενική ευστάθεια του προβλήματος. Το πρόβλημα εντάσσεται σε κώδικες με αυτόματες γεννήτριες παραγωγής επιφανειών ολίσθησης με δυνατότητα συνεχούς σύγκλισης προς την δυσμενέστερη περίπτωση. Το πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής είναι ότι μπορεί να δώσει μια καλή εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας με σκοπό στην συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για την τοποθέτηση μέτρων αντιστήριξης. Το μειονέκτημα είναι ότι λόγω της οριακής ισορροπίας υπάρχει αποσύζευξη κινηματικών και εντατικών μεγεθών. Δεν είναι μάλιστα λίγες οι περιπτώσεις που τα διαφορετικά τμήματα του πρανού εμφανίζουν την μέγιστη διατμητική αντοχή τους σε διαφορετική φάση το ένα με το άλλο. Για τον λόγο αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ανάλυσης με αριθμητικές μεθόδους και ταυτόχρονα με γραμμική συμπεριφορά γενικότερα στο θέμα της ανάλυσης ευστάθειας, αλλά μόνο σε περιπτώσεις όπου το πρανές βρίσκεται μακριά από την αστοχία και χωρίς την ύπαρξη κάποιας τοπικής θραύσης.

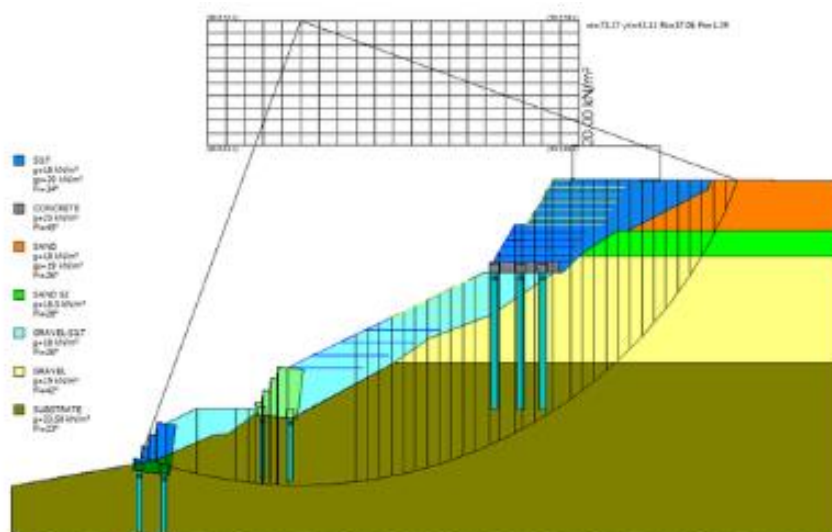
Ο προσδιορισμός της ευστάθειας μπορεί να εκφραστεί και με την μέθοδο της πλήρους δυναμικής ανάλυσης πρανού όπου είναι μια μεθοδολογία που εξετάζει την ευστάθεια κάνοντας χρήση στατικών ή δυναμικών μεθόδων ανάλυσης. Η δυναμική ανάλυση για παράδειγμα (ανάλυση για περιπτώσεις που λαμβάνουμε υπόψη τον σεισμό), λαμβάνει υπόψιν και τις μεταβαλλόμενες επιταχύνσεις, τις αδρανειακές δυνάμεις και τις χρονικά εξαρτώμενες παραμορφώσεις. Η πλήρης δυναμική ανάλυση ακολουθεί την εξής δομή:

- α) Επιλογή γεωμετρίας όπως ύψος και κλίση πρανού και γεωλογικών χαρακτηριστικών (π.χ. στρωματογραφία και μηχανικές ιδιότητες).
- β) Καθορισμός δυναμικής διέγερσης, επιλογή δηλαδή κατάλληλου σεισμικού γεγονότος και άλλων φορτίσεων.
- γ) Ανάλυση θεωρώντας μη γραμμική την συμπεριφορά του εδάφους και εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης μέσω των δεικτών μετακίνησης, τάσης, παραμόρφωσης κλπ.
- δ) Αξιολόγηση παραμέτρων αστοχίας μέσω του συντελεστή ασφαλείας κάτω από δυναμικές συνθήκες, δυναμική μετακίνηση πρανού όπως και η πιθανότητα ρευστοποίησης για κορεσμένα εδάφη.

ε)Ανάλυση ευαισθησίας – διερεύνηση επιλογής παραμέτρων (συνοχή, γωνία τριβής κλπ).

στ) Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση, πραγματοποιείται ανάλυση για την πιθανή αποκατάσταση κάποιας ευαισθησίας με σκοπό την ανάσχεση κάποιου πιθανού κινδύνου. Εναλλακτικά είναι δυνατή η εκτίμηση της τρωτότητας των εξεταζόμενων πρानών μέσω σχετικών μεθόδων που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Για την εκτέλεση των αναλύσεων χρησιμοποιούνται κώδικες πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων όπως στο FLAC ή το PLAXIS.



Εικόνα 2.7. Προσομοίωση πρανούς για ανάλυση ευστάθειας του. Εικόνα 2.1. Πηγή: Ergocad)

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Η τρωτότητα πρानών έναντι σεισμικών φορτίσεων μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής: αρχικά, πρέπει να καθοριστούν τα επίπεδα βλαβών που θα εξεταστούν, παραδείγματος χάρι μικρές, μέτριες ή και ολικές/εκτεταμένες βλάβες. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να γίνει χρήση ενός κατάλληλου δείκτη βλάβης, π.χ. μια μετατόπιση ή μια καθίζηση. Σε δεύτερη φάση πρέπει να προσδιοριστεί η γεωμετρία των πρानών, ο τύπος του εδάφους αλλά και η κατάσταση του εδάφους (πχ να μην είναι σε ρευστοποιήσιμη κατάσταση). Εφόσον η ανάλυση της τρωτότητας γίνει μέσω δυναμικών αναλύσεων είναι απαραίτητο να επιλεγούν τα σεισμικά σήματα εισόδου που καλύπτουν ένα φάσμα PGA για παράδειγμα από 0,1 g έως 0,8 g. Συνήθως η επιλογή γίνεται έτσι ώστε να υπάρχει συμβατότητα των φασμάτων τους με το μέσο φάσμα που προδιαγράφουν κανονισμοί. Έπειτα γίνεται μοντελοποίηση του προβλήματος σε κάποιον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο ελαστοπλαστικό καταστατικών προσομοίωμα για το έδαφος, όπως για παράδειγμα το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα Mohr Coulomb. Μέσω των αναλύσεων θα υπολογισθούν και θα καταγραφούν οι τιμές του επιλεγμένου δείκτη βλάβης και θα συσχετιστούν με την ένταση της σεισμικής διέγερσης, π.χ., μόνιμες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του πρανούς για κάθε επίπεδο σεισμικής διέγερσης. Οι συσχετίσεις θα οδηγήσουν στον υπολογισμό των πιθανοτικών μοντέλων σεισμικής απαίτησης και βάσει αυτών θα

κατασκευαστούν οι καμπύλες τρωτότητας. Στο πλαίσιο της ανάλυσης λαμβάνονται υπόψη και όποιες αβεβαιότητες στην εκτίμηση της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων συστημάτων, στην επιλογή των σεισμικών διεγέρσεων καθώς και στην επιλογή των σταθμών βλάβης. Εναλλακτικά, η εκτίμηση της τρωτότητας μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την μέθοδο IDA (ανάλυση βαθμιαίας αύξησης της δυναμικής φόρτισης). Η βασική διαφορά από τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως είναι ότι οι επιλεγόμενες καταγραφές κλιμακώνονται σταδιακά από μικρά πλάτη σε μεγάλα πλάτη ταλάντωσης, ώστε να καλυφθούν πολλαπλά επίπεδα έντασης για την εκτέλεση των δυναμικών αναλύσεων των επιλεγόμενων πρηνών. Αποτέλεσμα των παραπάνω αναλύσεων αποτελούν οι καμπύλες τρωτότητας που εκφράζουν την πιθανότητα να προκύψουν βλάβες συγκεκριμένου επιπέδου (συγκεκριμένες στάθμες βλάβης) για δεδομένο επίπεδο σεισμικής έντασης. Οι περισσότερες καμπύλες τρωτότητας περιγράφονται μαθηματικά από μια λογαριθμοκανονική κατανομή (lognormal probability distribution function) της μορφής:

$$P_f(d_s \geq d_{s_i} | S) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{tot}} \ln \left(\frac{s}{s_{mi}} \right) \right]$$

όπου ,

P_f η πιθανότητα η κατασκευή να υπερβεί ένα συγκεκριμένο δείκτη βλάβης (d_s) για μια συγκεκριμένη σεισμική διέγερση, η οποία καθορίζεται από τον σεισμικό ένταση S .

s_{mi} , η ελάχιστη τιμή του S που απαιτείται για την πρόκληση της i th στάθμης βλάβης.

β_{tot} , η συνολική αβεβαιότητα που σχετίζεται με τη χάραξη των καμπυλών τρωτότητας.

Για να οριστούν οι καμπύλες τρωτότητας πρέπει πρώτα να προσδιοριστούν δύο βασικές παράμετροι (s_{mi} και β_{tot}). Ο δείκτης β_{tot} υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta_{tot} = \sqrt{\beta_{d_s}^2 + \beta_c^2 + \beta_D^2}$$

Η παράμετρος β_{tot} βασίζεται στις παρακάτω τρεις πηγές αβεβαιότητας:

1. την αβεβαιότητα στον ορισμό του DS (β_{ds})
2. την αβεβαιότητα στην απόκριση και την αντίσταση του εξεταζόμενου στοιχείου (π.χ. πρηνές) (β_c)
3. την αβεβαιότητα στην επιλογή των σεισμικών διεγέρσεων (β_d).

Λόγω της έλλειψης αυστηρότερων εκτιμήσεων , οι παράμετροι β_{ds} και β_c λαμβάνονται 0,4 και 0,3 αντίστοιχα βάσει της βιβλιογραφίας (HAZUS 2020). Η τελευταία παράμετρος αβεβαιότητας β_d που σχετίζεται με την σεισμική απαίτηση περιγράφεται από την τυπική απόκλιση του δείκτη βλάβης , που υπολογίζεται για διάφορες διεγέρσεις.

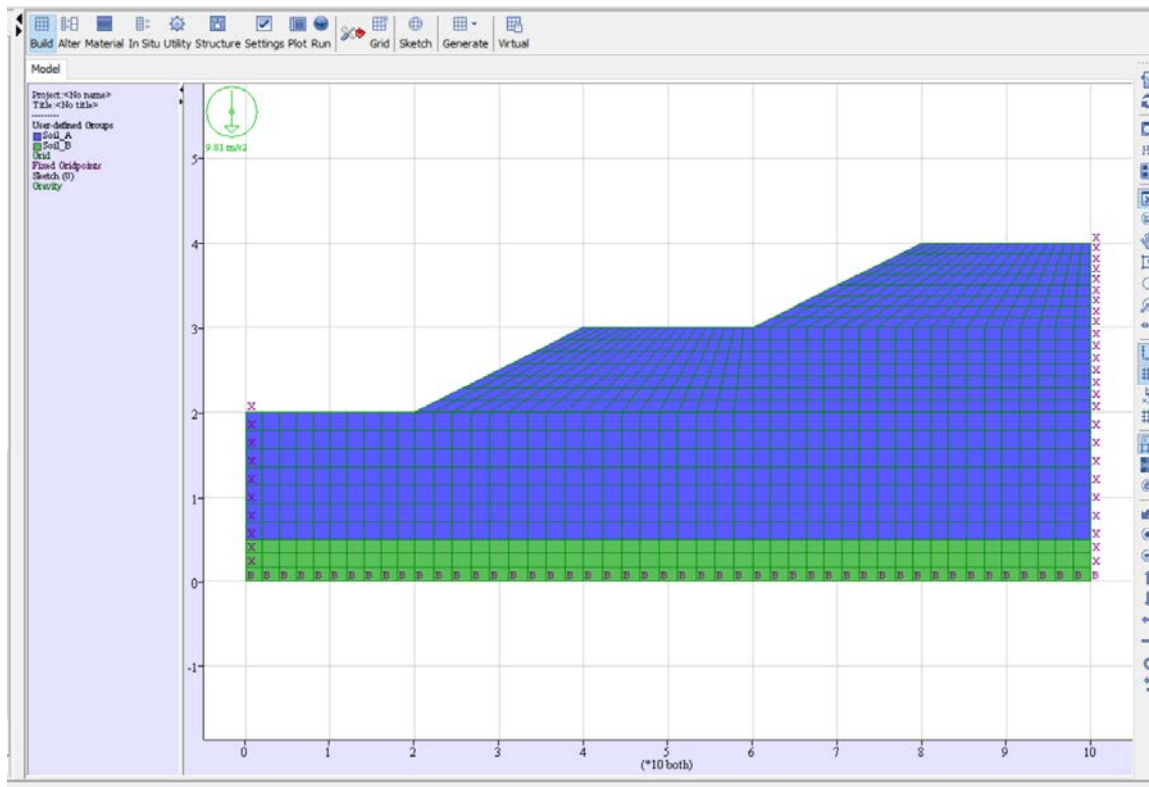
2.4 ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία θα γίνει ανάλυση πρηνών με διαφορετικές ιδιότητες μεταξύ τους και υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης με σκοπό την εξαγωγή καμπυλών τρωτότητας. Τελικός στόχος είναι από τα μοντέλα που θα αναλυθούν, μέσω του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D και με την βοήθεια της μεθόδους της πλήρους δυναμικής ανάλυσης να διερευνηθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν τη τρωτότητα των συστημάτων αυτών έναντι σεισμικού κινδύνου.

3. Εξεταζόμενα πρηνή και αριθμητική προσομοίωση

3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΑΝΩΝ

Όσο αναφορά την γεωμετρία αναφερόμαστε σε ένα πρανές με 2 αναβαθμούς με κλίση 1:0.5 και ύψος κάθε αναβαθμού ίσο με 5 m. Το πρανές αποτελείται από εδαφικό υλικό που επικάθεται επί βραχώδους υποβάθρου. Το εξεταζόμενο γεωμετρικό μοντέλο των εξεταζόμενων πρανών όπως εισήχθη στον κώδικά FLAC 7.0, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.1. Γεωμετρική αποτύπωση εδαφικών πρανών που εξετάστηκαν – εικόνα από FLAC 7.0

Όσο αναφορά τις εδαφικές ιδιότητες των πρανών εξετάστηκαν 3 περιπτώσεις εδαφών. Τα 3 εδάφη αποτελούνται από αργιλικά υλικά με διαφορετικό δείκτη πλαστικότητας PI με τις τιμές 13, 27 και 66, αντίστοιχα. Οι γωνίες εσωτερικής τριβής των επιλεγόμενων εδαφικών σχηματισμών είναι $\phi'_i(^{\circ})=30, 28$ και 16 αντίστοιχα. Οι ταχύτητες διατμητικών κυμάτων σε μικρές παραμορφώσεις είναι 250, 300 και 130 m/s αντίστοιχα. Η μη γραμμική συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών προδιαγράφηκε μέσω ενός μη γραμμικού προσομοιώματος με κριτήριο διαρροής Mohr Coulomb συνδυασμένο με καμπύλες G-γ-D που περιγράφουν την μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τη διατμητική παραμόρφωση (βλέπε παρακάτω).

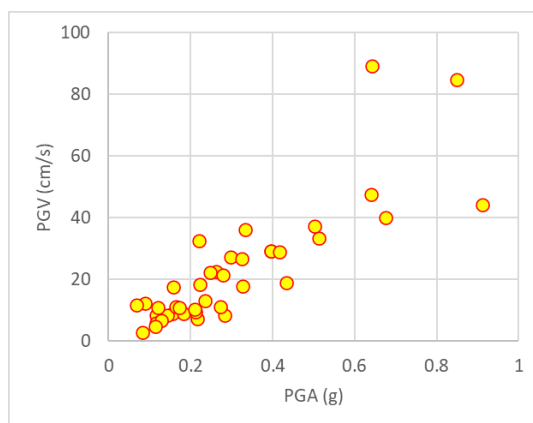
3.1.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

Για την εκτίμηση της τρωτότητας εκτελέσθηκε μια σειρά δυναμικών αναλύσεων των επιλεγόμενων πρανών με χρήση 40 πραγματικών καταγραφών ως σεισμικών διεγέρσεων, με

διαφορετική διάρκεια και διαφορετικής έντασης. Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των σεισμών από τους οποίους επιλέχθηκαν οι διεγέρσεις. Η Εικόνα 3.2 συνοψίζει τη συσχέτιση των μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων συναρτήσει των μεγίστων εδαφικών ταχυτήτων των επιλεγόμενων σεισμικών διεγέρσεων.

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά σεισμών από τους οποίους επιλέχθηκαν οι σεισμικές διεγέρσεις για τις δυναμικές αναλύσεις.

STATION COUNTRY	M _w	R (km)	Preferred FS	Station Name	V _{s,30} (m/s)	Database Code	
Japan	6.1	32.00	Reverse	Oshika	1432.7	C&F_277	
Japan	6.6	36	Reverse	Tsunan	626	C&F_324	
USA	5.2	11.50	Strike-Slip	Pinyon Flat Observatory	724.9	C&F_1008	
USA	6.4	61.5	Reverse	Ca: San Luis Obispo; Rec Center	712.822	C&F_1017	
Iran	7.35	57	Oblique	Tabas	712	ESMD_60	
Greece	5.36	17.00	Oblique	Kyparrisia-Agriculture Bank	778.0	ESMD_126	
Greece	6.61	17	Normal	Kozani	1000	ESMD_171	
Greece	6.04	17.00	Normal	Athens 4 (Kipseli District)	934.0	ESMD_335	
Serbia	6.9	65	Thrust	Hercegnovi Novi-O.S.D. Pavicic School	875	ISESD_225	
Greece	5	16		Pelekanada-Town Hall	1530	ISESD_576	
Greece	5.3	16.00	Normal	Chromio-Community Building	623.0	ISESD_1210	
Greece	6.4	48	Thrust	Koroni-Town Hall (Library)	1530	ISESD_1579	
Italy	6.4	21.70	Reverse	Tolmezzo-Diga Ambiesta	1029.6	ITACA_16	
Italy	5.9	8.50	Reverse	Tarcento	901.0	ITACA_116	
Italy	6.9	28.30	Normal	Bisaccia	976.2	ITACA_180	
Italy	5.6	20.00	Normal	Norcia	681.2	ITACA_491	
Italy	5.6	6.60	Normal	Lauria Galdo	603.2	ITACA_613	
Italy	6.3	4.40	Normal	L Aquila - V. Aterno - Colle Grilli	684.8	ITACA_857	
USA	6.61	20.04	Reverse	Lake Hughes #12	602.1	NGA_71	
USA	5.14	11.08	Strike-Slip	Gilroy Array #1	1428.1	NGA_98	
USA	5.74	4.37	Strike-Slip	Gilroy Array #6	663.3	NGA_150	
	6.36	33.52	Reverse	Slack Canyon	684.935	NGA_369	
USA	6.19	36.34	Strike-Slip	Gilroy Array #6	663.3	NGA_459	
	6.76	6.8	Reverse	Site 1	659.6	NGA_495	
	7.3	71.35	Reverse	Smart1 E02	659.6	NGA_572	
	5.5	3.69	Strike-Slip	Cerro Prieto	659.6	NGA_585	
USA	6.93	35.47	Reverse-Oblique	Gilroy Array #6	663.3	NGA_769	
USA	6.93	16.34	Reverse-Oblique	Ucsc Lick Observatory	659.6	NGA_810	
	7.01	4.51	Reverse	Petrolia	712.822	NGA_828	
31		7.28	44.02	Strike-Slip	Lucerne	684.935	NGA_879
32	USA	6.69	25.42	Reverse	La - Griffith Park Observatory	971.4	NGA_994
33	USA	6.69	20.36	Reverse	Pacoima Dam (Downstr)	2016.13	NGA_1050
34		6.9	8.7	Strike-Slip	Nishi-Akashi	609	NGA_1111
35		7.62	15.42	Reverse-Oblique	Tcu071	624.85	NGA_1507
36		5.61	6.46	Reverse	Mt Wilson - Cit Seis Sta	821.6894831	NGA_1645
37		7.13	26.53	Strike-Slip	Hector	684.935	NGA_1787
38		6.2	18.5	Reverse	Tcu129	664.43	NGA_2658
39	Turkey	7.6	42.77	Strike-Slip	Gebze-Tubitak Marmara Arastirma Merkezi	700.9	T-NSMP_1105
40	Turkey	7.6	3.40	Strike-Slip	Izmit-Meteoroloji Istasyonu	827.3	T-NSMP_1109
41	Turkey	7.1	15.60	Strike-Slip	Ldeo Station No. C1058 Bv	718.9	T-NSMP_1583



Εικόνα 3.2. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ επιταχύνσεων και ταχυτήτων των 40 επιλεγόμενων σεισμικών διεγέρσεων.

3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ FLAC 2D

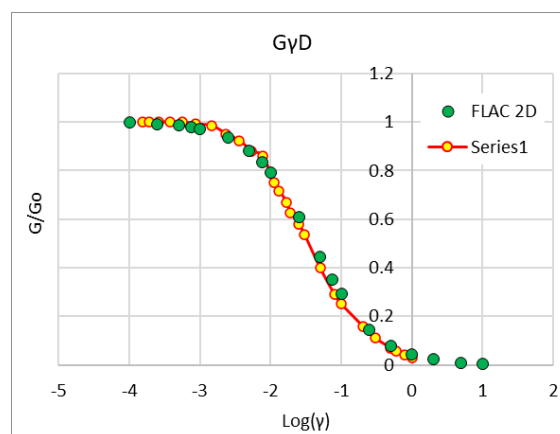
Για τη δυναμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FLAC 2D. Γνωρίζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων πρηνών, αλλά και τις μηχανικές ιδιότητες του περιβάλλον εδάφους, ξεκινά η κατασκευή του μοντέλου

προσομοίωσης για την αριθμητική, παραμετρική ανάλυση. Η κατασκευή του κανάβου διενεργείται σύμφωνα με τα στοιχεία του Σχήματος 3.1. Στη συνέχεια εισάγονται οι μηχανικές ιδιότητες του εκάστοτε εδάφους. Το έδαφος αναλύεται σύμφωνα με την θεωρία Mohr – Coulomb, ενώ το βραχώδες υπόβαθρο αναλύεται σύμφωνα με την ελαστοπλαστική θεωρία. Έχοντας ολοκληρώσει την στατική επίλυση, ξεκινά η δυναμική ανάλυση. Ο χρόνος ανάλυσης μηδενίζεται και τοποθετείται μεγάλος αριθμός βημάτων ανάλυσης. Για την σωστή προσομοίωση, τοποθετούνται στα όρια του κανάβου αποσβεστήρες (εξαναγκασμένη ταλάντωση με απόσβεση), έτσι ώστε να αποσβένει (απορροφάται) η δυναμική ενέργεια του συστήματος. Η απόσβεση παίρνει τιμή $c = 2Vs\rho$, όπου Vs η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων και ρ η πυκνότητα του εδάφους.

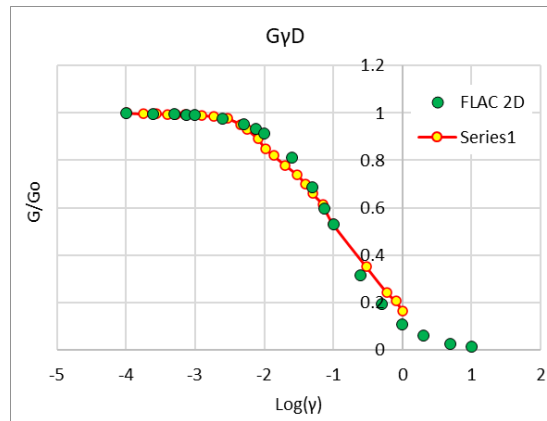
Για την αντιμετώπιση φαινομένων ανάκλασης εισάγονται και στις δύο διευθύνσεις της βάσης του προσομοιώματος (οριζόντια, κάθετη) στοιχεία quiet elements, x quiet και y quiet αντίστοιχα. Τα quiet elements επιτρέπουν στα αρχικά σεισμικά κύματα να διέρχονται στον κάνναβο και παράλληλα να απορροφούν ταυτόχρονα και τα ανακλώμενα κύματα. Κατά τη σεισμική δόνηση –διέγερση του εδάφους, το έδαφος στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή υποβάλλεται σε κύκλους φόρτισης. Κάθε στοιχείο ανάλυσης φορτίζεται και στη συνέχεια αποφορτίζεται (λόγω της απόσβεσης) ανάλογα με την εδαφική επιτάχυνση (PGA) τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αυτή η διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής (G) του εδαφικού στοιχείου και την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης (γ). Η αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης έχει σαν επακόλουθο την αύξηση της απόσβεσης. Το παραπάνω πρόβλημα εκφράζεται από τις καμπύλες $G\gamma D$ για κάθε έδαφος. Η μαθηματική έκφραση για την αριθμητική εισαγωγή στην ανάλυση δίνεται από την εξίσωση:

$$M_s = \frac{a}{1 + \exp\left[-\frac{(L-x_0)}{b}\right]}$$

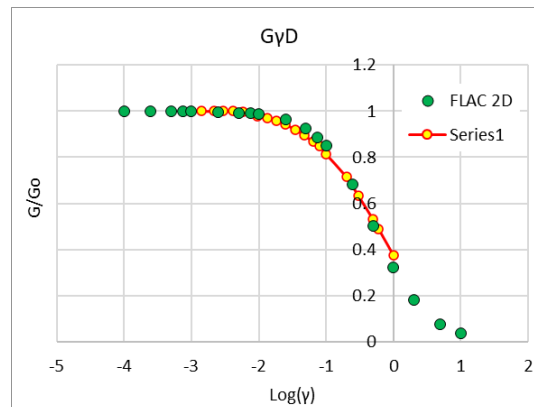
η οποία εξαρτάται από τις παραμέτρους a , b , x_0 , y_0 που βαθμονομούνται βάσει των καμπυλών $G\gamma D$ των επιλεγόμενων εδαφικών στρωμάτων (Εικόνες 3.3-3.5).



Εικόνα 3.3. Επιλεγόμενη καμπύλη $G\gamma D$ για το έδαφος με $PI=13$.



Εικόνα 3.4. Επιλεγόμενη καμπύλη G-γ-D για το έδαφος με PI=27.



Εικόνα 3.5. Επιλεγόμενη καμπύλη G-γ-D για το έδαφος με PI=66.

Η απόσβεση εδάφους κατασκευής από τη φυσική έννοια για πολύ μικρές αποσβέσεις (1% 2%), εισάγεται στην ανάλυση μέσω του μητρώου απόσβεσης Rayleigh $[C]$ και εκφράζεται από τη σχέση:

$$[C] = a_0 \times [M] + a_1 \times [K]$$

όπου $[M]$ το μητρώο μάζας και $[K]$ το μητρώο δυσκαμψίας. Οι παράμετροι a_0 και a_1 εξαρτώνται από την συχνότητα και την απόσβεση (ω , ξ).

Στην δυναμική ανάλυση, σε κάθε στοιχείο διενεργείται ανάλυση στο χρόνο. Η μαθηματική έκφραση από την οποία εξάγονται τα αποτελέσματα δίνεται από τη σχέση:

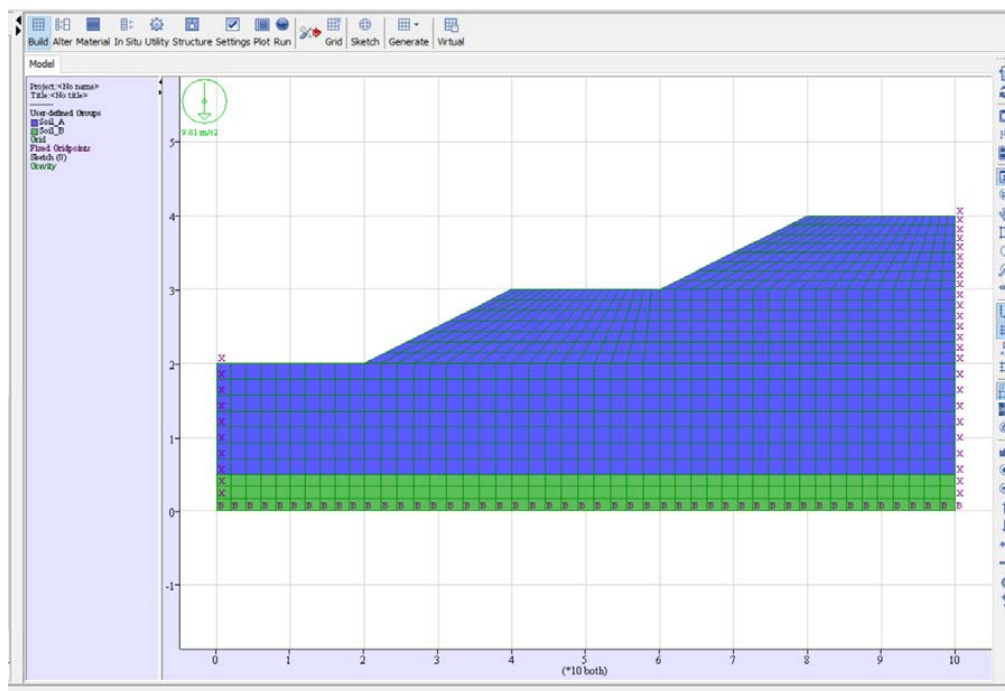
$$[M]\ddot{U} + [C]\dot{U} + [K]U = P(t)$$

Κάθε στοιχείο, σε κάθε χρονική στιγμή, έχει συγκεκριμένη παραμόρφωση, συγκεκριμένη δυσκαμψία, συγκεκριμένη μετακίνηση και συγκεκριμένα εντατικά μεγέθη (ροπές, αξονικά φορτία), καθώς και συγκεκριμένη επιτάχυνση. Για να είναι εφικτή και βιώσιμη η ανάλυση σε εύλογα χρονικά περιθώρια, ζητούνται αποτελέσματα σε μεμονωμένα σημεία ενδιαφέροντος (μετακινήσεις οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες στις κορυφές και στις βάσεις των 2 αναβαθμών του οδικού πρσανούς και στο τέλος η συνισταμένη μετακίνηση στα σημεία αυτά). Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα το υλικό μέσο όπου κατασκευάζεται το οδικό πρανός είναι ελαστοπλαστικό έδαφος, οπότε και θα λαμβάνει μόνιμες παραμορφώσεις. Αποτέλεσμα της σεισμικής διέγερσης είναι επίσης η ανακατανομή των εντατικών μεγεθών (ροπές, αξονικά φορτία) στην περιφέρεια της κατασκευής μελέτης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για το συγκεκριμένο πρόβλημα, έγινε η κατάλληλη τροποποίηση κώδικα, έτσι ώστε να εξαχθούν τα παρακάτω αποτελέσματα, τα οποία θα συμβάλουν, στην δημιουργία των καμπυλών τρωτότητας, αλλά και γενικότερα στην σωστή

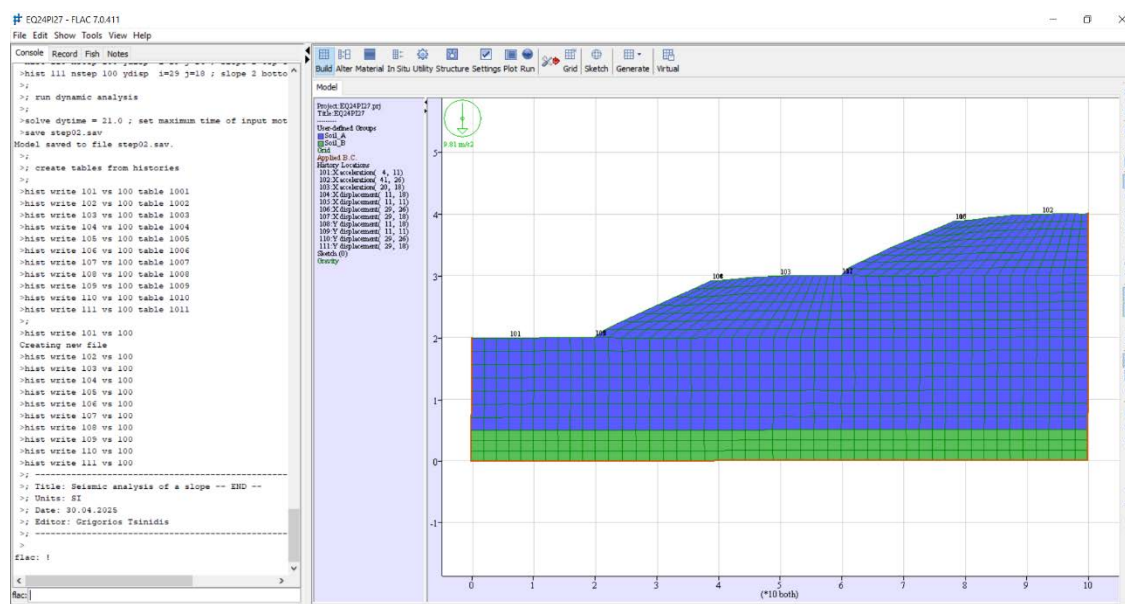
κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς των πρανών. Επιλέχθηκε ικανός αριθμός σεισμικών διεγέρσεων για την ασφάλεια και ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Συνολικά σαράντα (40) σεισμικές διεγέρσεις επιλέχθηκαν και προσομοιώθηκαν στο εκάστοτε μοντέλο. Στο σύνολο τους οι 120 παραμετρικές αναλύσεις είναι ικανές να δώσουν ένα ικανοποιητικό αριθμό δεδομένων, που μέσω στατιστικής ανάλυσης στο πρόγραμμα EXCEL θα παράγουν τα επιθυμητά αποτελέσματα (καμπύλες τρωτότητας).

Πρώτο σκέλος είναι να στηθεί το προσομοίωμα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

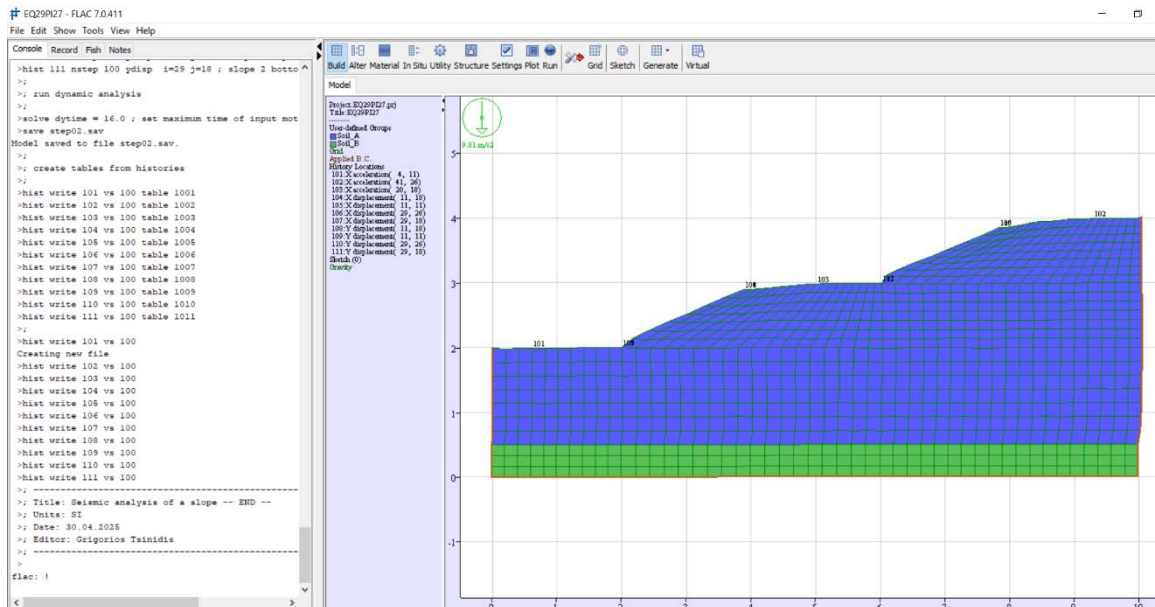


Εικόνα 3.6. Προσομοίωμα στο FLAC.

Οι 2 επόμενες εικόνες αποδίδουν αποτελέσματα αναλύσεων πρανών με $PI=13$. Παρατηρούνται έντονες παραμορφώσεις και σημαντικές μετακινήσεις.

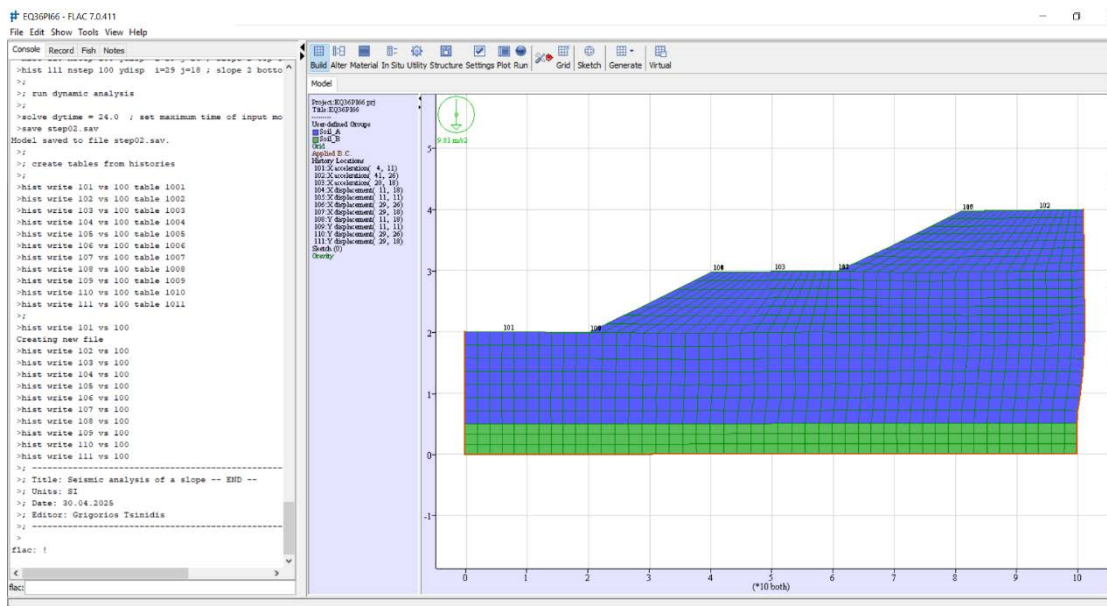


Εικόνα 3.7. Αποτέλεσμα ανάλυσης πρανούς με $PI = 13$ στο πέρας της σεισμικής διέγερσης.

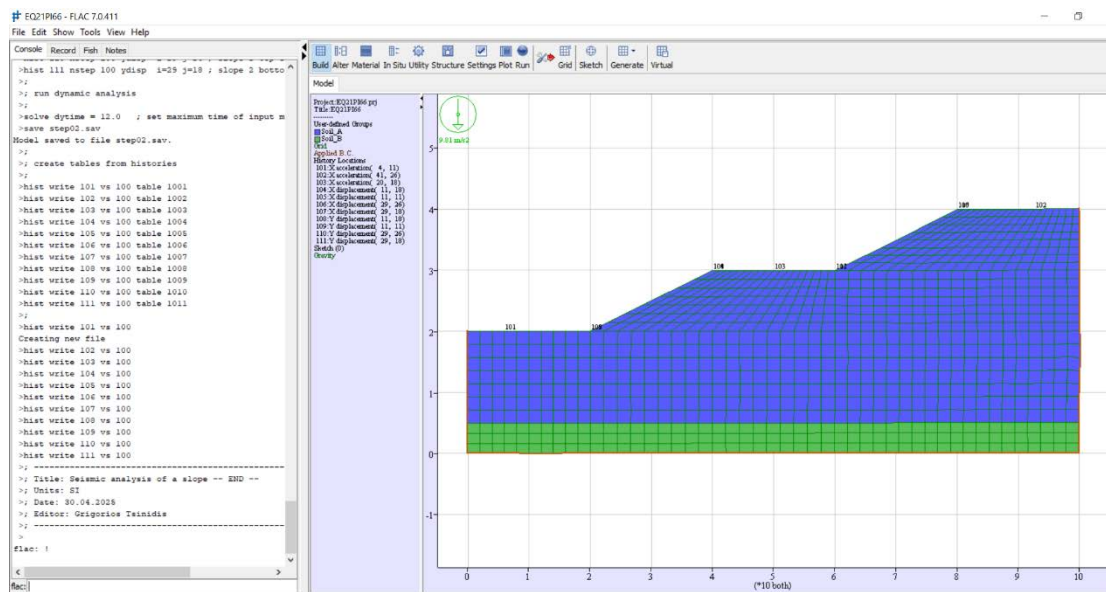


Εικόνα 3.8. Αποτέλεσμα ανάλυσης πρανούς με $PI = 13$ στο πέρας της σεισμικής διέγερσης.

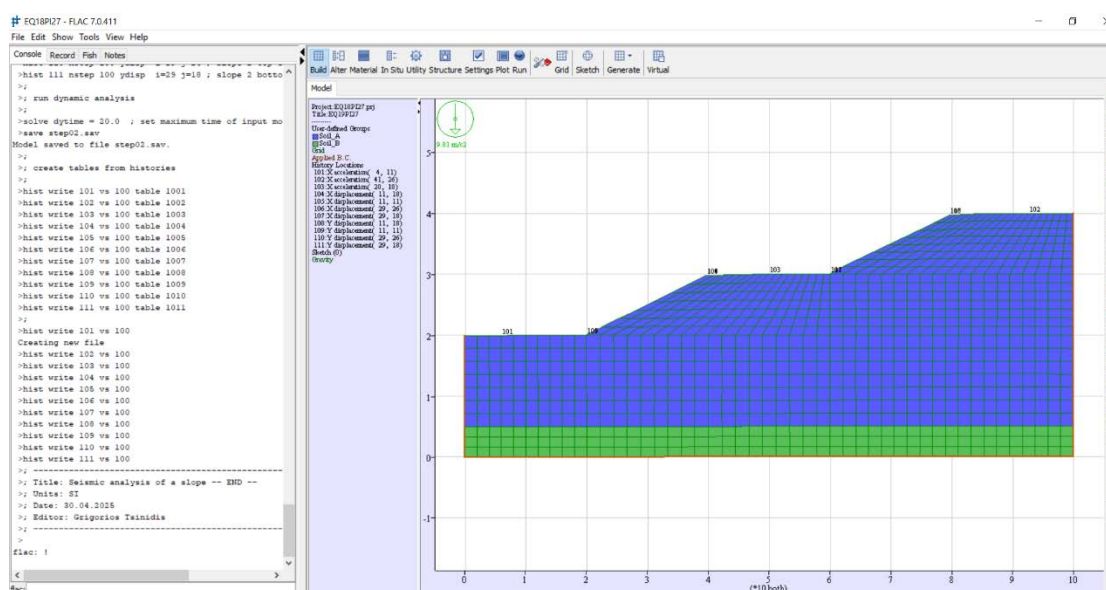
Οι επόμενες, ωστόσο αναλύσεις των εδαφικών πρανών με $PI = 27$ και $PI = 66$, έχουν αρκετά ηπιότερες μετακινήσεις και παραμορφώσεις λόγω αυξημένης αντοχής τους.



Εικόνα 3.9. Αποτέλεσμα ανάλυσης πρανούς με $PI = 27$ στο πέρας της σεισμικής διέγερσης.



Εικόνα 3.8. Αποτέλεσμα ανάλυσης πρανούς με $PI = 66$ στο πέρας της σεισμικής διέγερσης.

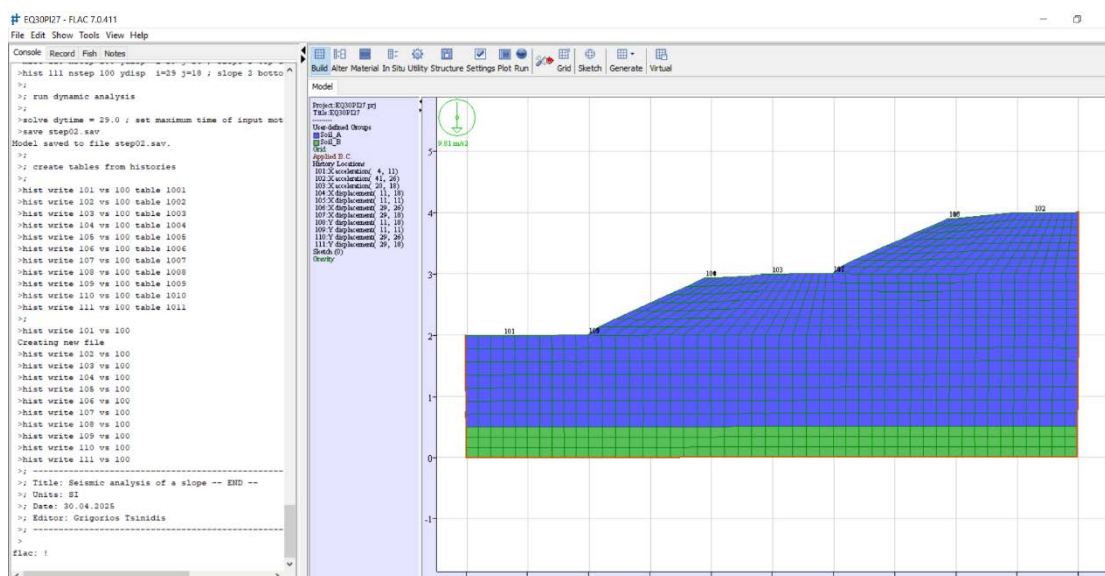


Εικόνα 3.9. Αποτέλεσμα ανάλυσης πρανούς με $PI = 66$ στο πέρας της σεισμικής διέγερσης.

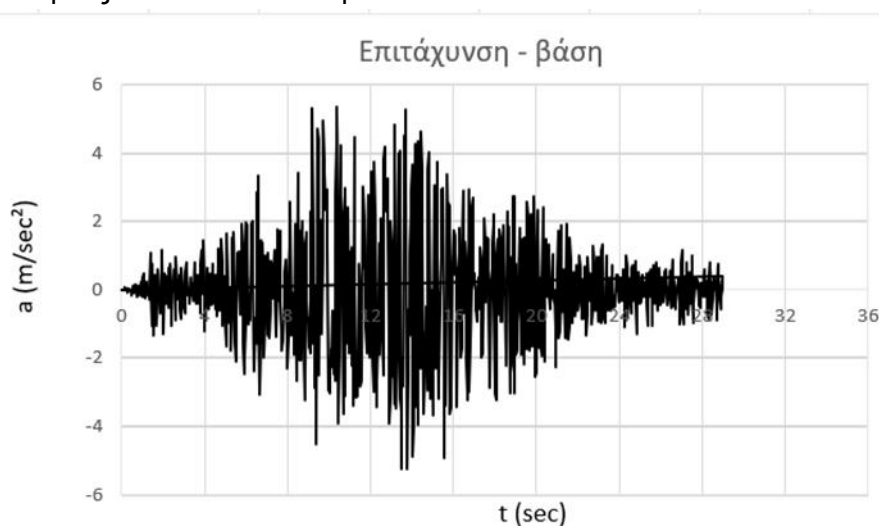
3.3 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΙΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

Στην παρούσα ενότητα θα εξετάσουμε ένα παράδειγμα ανάλυσης, εστιάζοντας στα εξής αποτελέσματα:

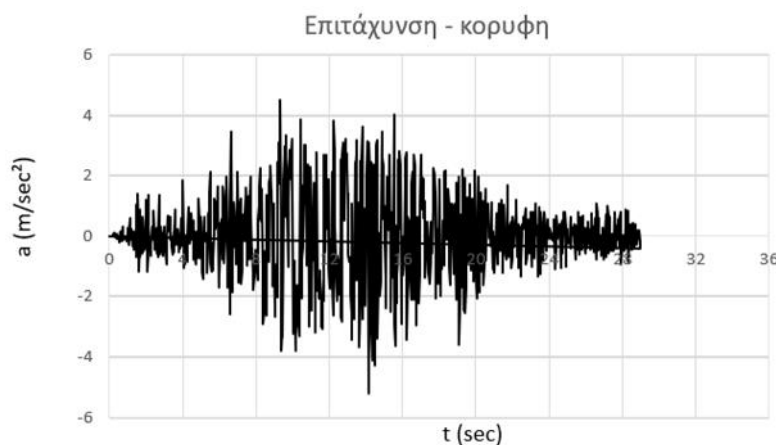
- Τιμές επιτάχυνσης στην επάνω και κάτω πλευρά του πρανούς καθώς και ανάμεσα στους αναβαθμούς των πρανών.
- Μετακινήσεις στο φρύδι και στον πόδα κάθε αναβαθμού του πρανούς.



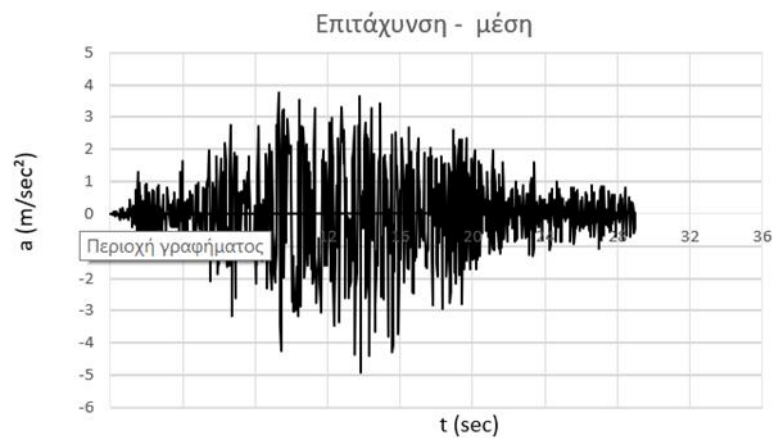
Εικόνα 3.10. Παραμορφωμένη εικόνα πρανούς στο τέλος της σεισμικής διέγερσης για την περίπτωση εδάφους Ρ127 και του σεισμού EQ30.



Εικόνα 3.11. Χρονοιστορία επιτάχυνσης στη βάση του πρανούς (έδαφος με $P1 = 27$) για τη σεισμική διέγερση EQ30.



Εικόνα 3.12. Χρονοιστορία επιτάχυνσης στην κορυφή του πρανούς (έδαφος με $PI = 27$) για τη σεισμική διέγερση EQ30.



Εικόνα 3.13. Χρονοιστορία επιτάχυνσης στην κορυφή του πρανούς (έδαφος με $PI = 27$) για τη σεισμική διέγερση EQ30.

Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν τις οριζόντιες μετακινήσεις στην κεφαλή και στον πόδα των αναβαθμών του εξεταζόμενου πρανούς ($x1$ top, $x1$ base, $x2$ top, $x2$ base). Όπως βλέπουμε οι μετακινήσεις κορυφής είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τις μετακινήσεις στις βάσεις των 2 αναβαθμών.



Εικόνα 3.14. Διάγραμμα εξέλιξης οριζόντιας μετακίνησης πρανούς στη κορυφή του 1ου αναβαθμού



Εικόνα 3.15. Διάγραμμα εξέλιξης οριζόντιας μετακίνησης πρανούς στη βάση του 1ου αναβαθμού



Εικόνα 3.16. Διάγραμμα εξέλιξης οριζόντιας μετακίνησης πρανούς στη βάση του 2ου αναβαθμού



Εικόνα 3.15. Διάγραμμα εξέλιξης οριζόντιας μετακίνησης πρανούς στην κορυφή του 2ου αναβαθμού

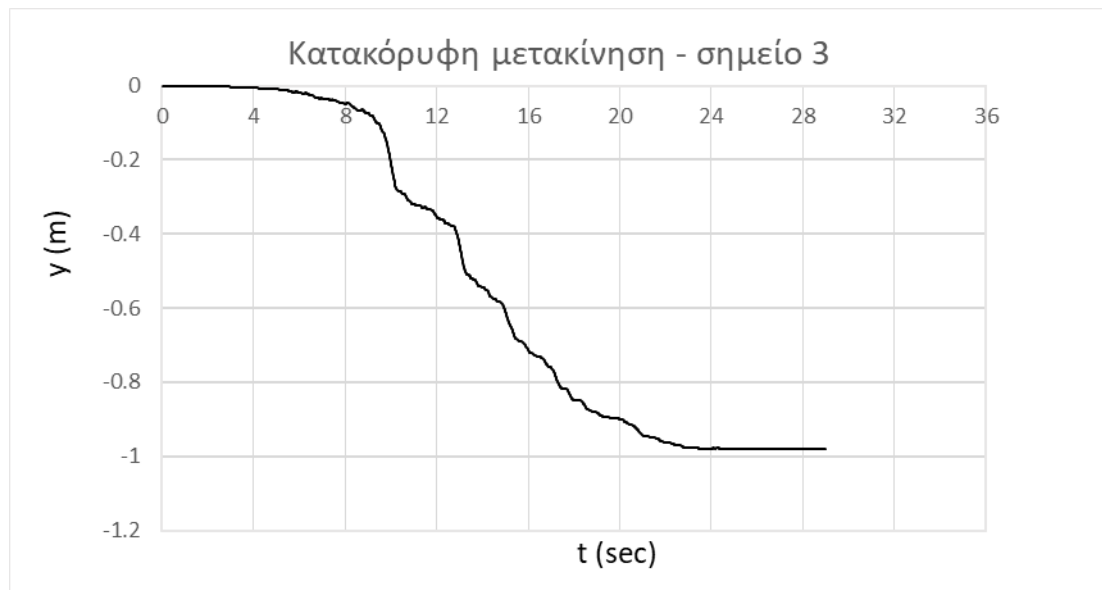
Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν τις κατακόρυφες μετακινήσεις στην κεφαλή και στον πόδα των αναβαθμών του εξεταζόμενου πρανούς (y_1 top, y_1 base, y_2 top, y_2 base). Οι μετακινήσεις στον αναβαθμό 1 είναι ανάλογες, ενώ στον αναβαθμό 2 οι κατακόρυφες μετακινήσεις διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.



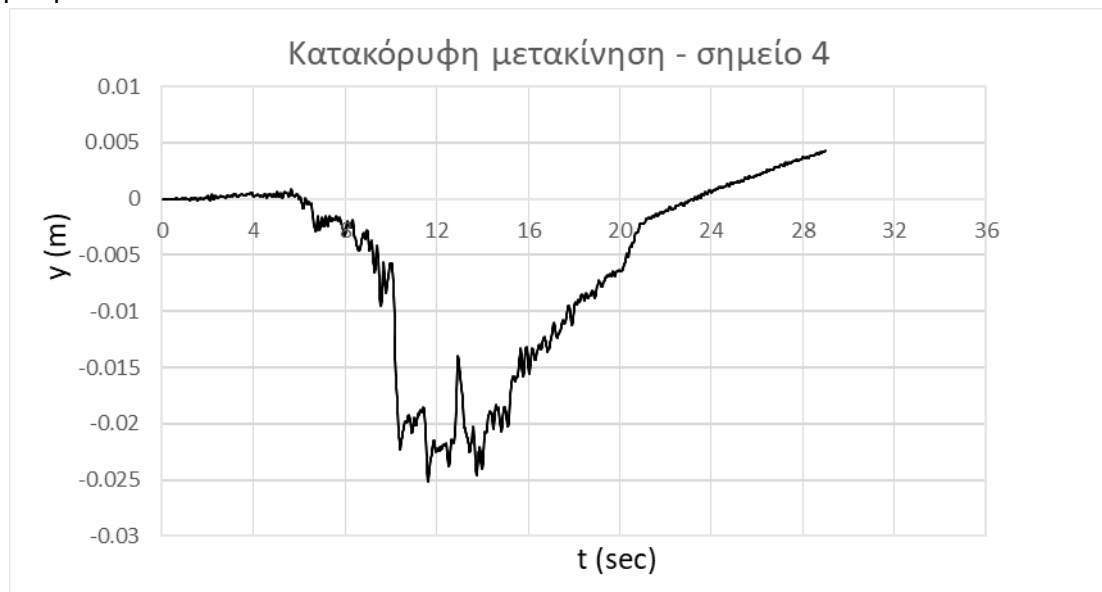
Εικόνα 3.14. Διάγραμμα εξέλιξης κατακόρυφης μετακίνησης πρανούς στην κορυφή του 1ου αναβαθμού



Εικόνα 3.15. Διάγραμμα εξέλιξης κατακόρυφης μετακίνησης πρανούς στη βάση του 1ου αναβαθμού

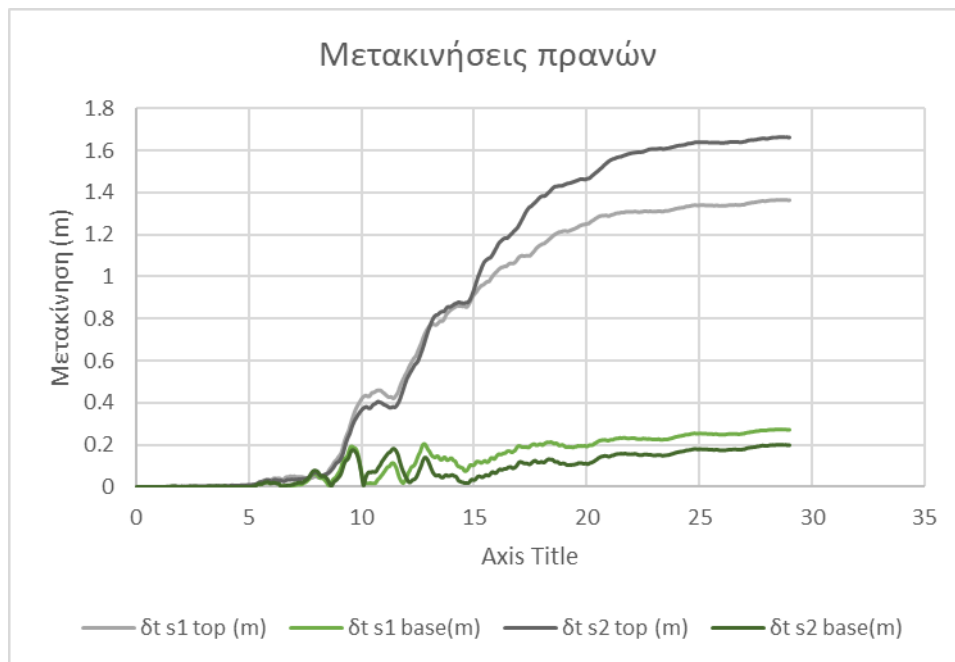


Εικόνα 3.15. Διάγραμμα εξέλιξης κατακόρυφης μετακίνησης πρανούς στην κορυφή του 2ου αναβαθμού



Εικόνα 3.15. Διάγραμμα εξέλιξης κατακόρυφης μετακίνησης πρανούς στη βάση του 2ου αναβαθμού

Στην Εικόνα 3.16 παρουσιάζονται οι συνισταμένες μετακινήσεις των ποδών και των κορυφών των αναβαθμών των πρανών.



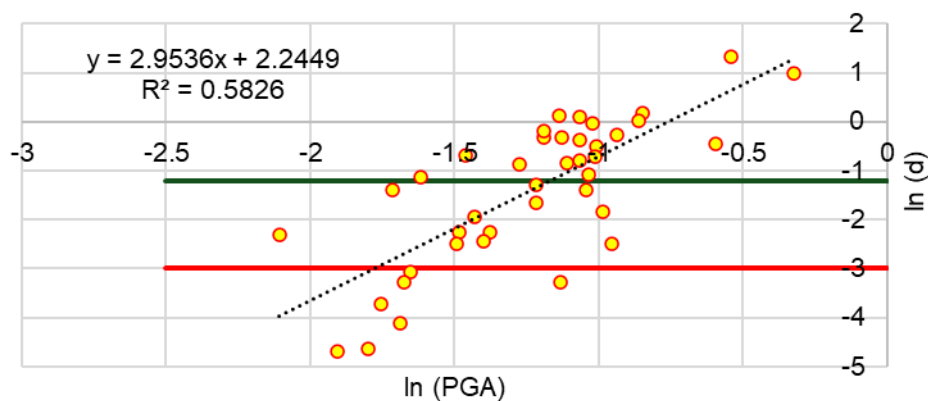
Εικόνα 3.16. Διάγραμμα εξέλιξης των συνισταμένων μετακινήσεων των αναβαθμών του πρανούς.

4 Παραμετρική ανάλυση

4.1 ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ & ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΑΝΕΣ ΜΕ $PI = 13$

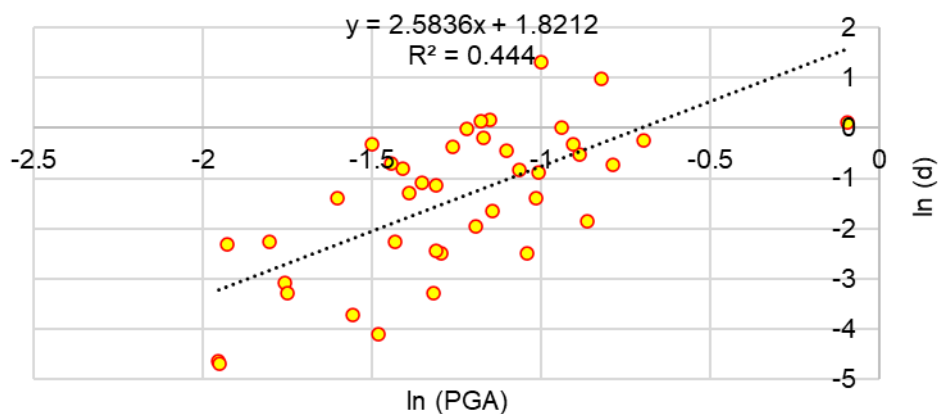
Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιθανοτικά μοντέλα σεισμικής απαίτησης (συσχέτιση συνισταμένης μετακίνησης πόδα και κεφαλής αναβαθμών πρανών με την επιτάχυνση στη βάση, το μέσο των αναβαθμών και την κεφαλή) που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που αφορούν στην περίπτωση του εξεταζόμενου εδαφικού πρανού με δείκτη πλαστικότητας $PI = 13$. Τα διαγράμματα διασποράς αποδίδονται σε λογαριθμική κλίμακα και στους 2 άξονες. Αυτό που διακρίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα είναι ότι όσο πάμε από τα διαγράμματα των χαμηλότερων επιταχύνσεων προς τα διαγράμματα των υψηλότερων επιταχύνσεων ο συντελεστής συσχέτισης μειώνεται.

Επιτάχυνση στη βάση - μετακίνηση στην κορυφή του 1ου αναβαθμού



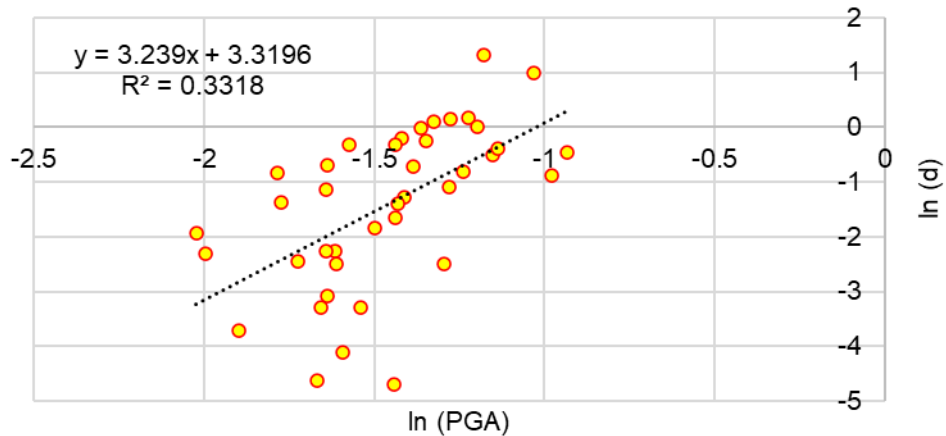
Εικόνα 4.1. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρανού για το εδαφικό πρανές με $PI = 13$.

Επιτάχυνση στο μέσο - μετακίνηση στην κορυφή του 1ου αναβαθμού



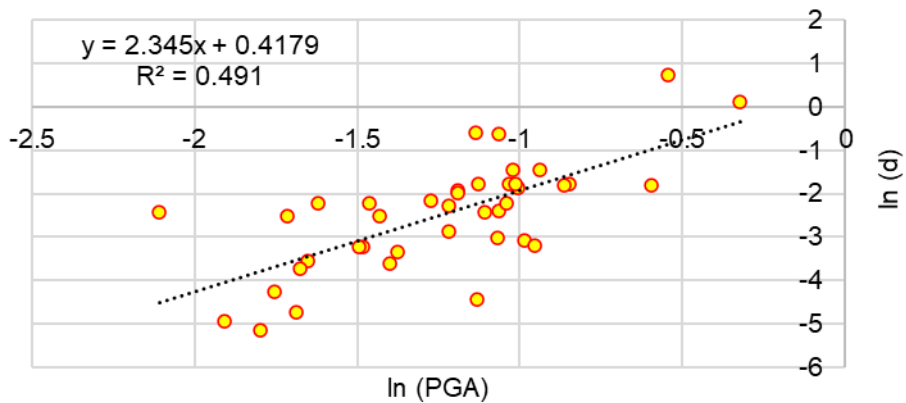
Εικόνα 4.2. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρανού για το εδαφικό πρανές με $PI = 13$.

Επιτάχυνση στην κορυφή - μετακίνηση στην κορυφή του
1ου αναβαθμού

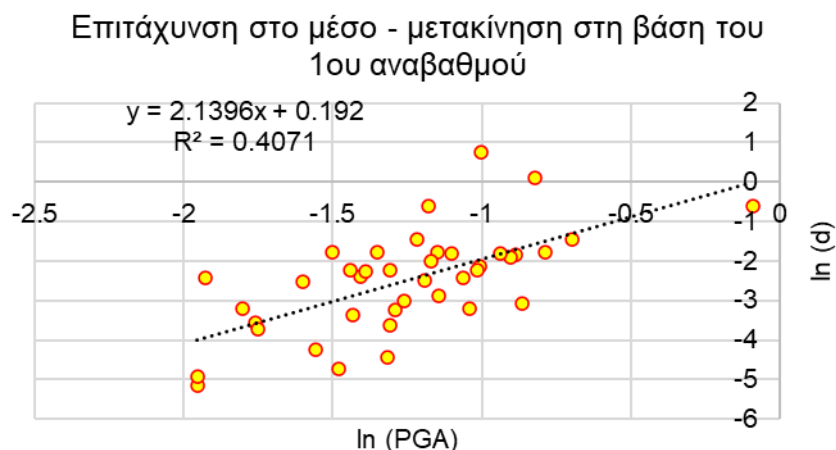


Εικόνα 4.3. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρρανές με PI = 13.

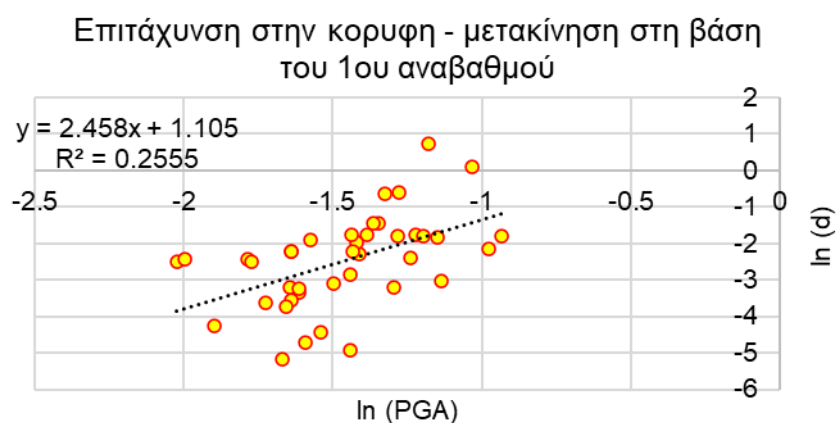
Επιτάχυνση στη βάση - μετακίνηση στη βάση του 1ου
αναβαθμού



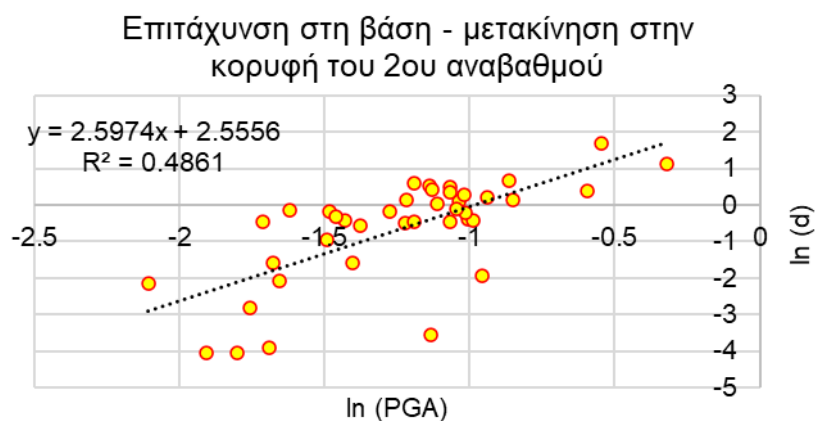
Εικόνα 4.4. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρρανές με PI = 13.



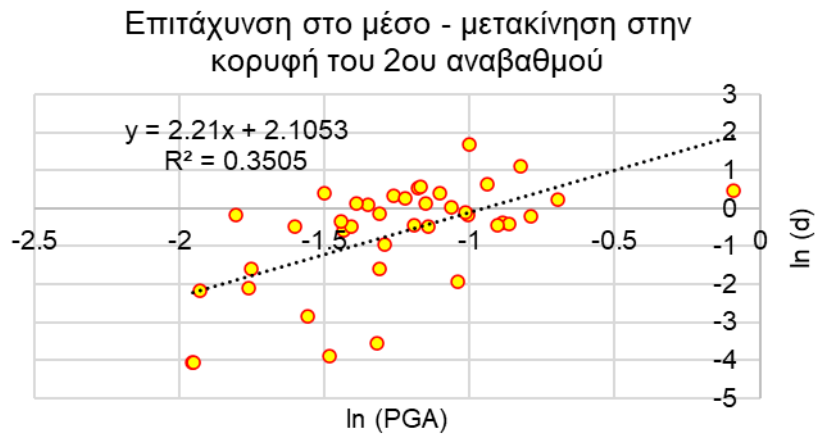
Εικόνα 4.5. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με $PI = 13$.



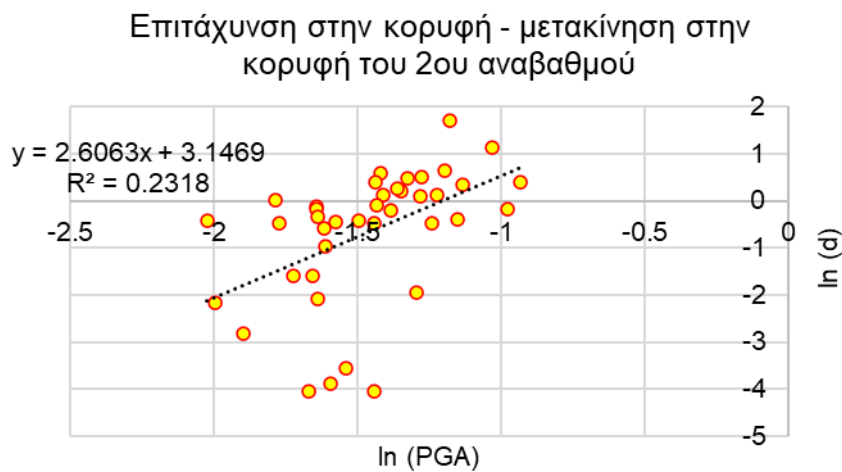
Εικόνα 4.6. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με $PI = 13$.



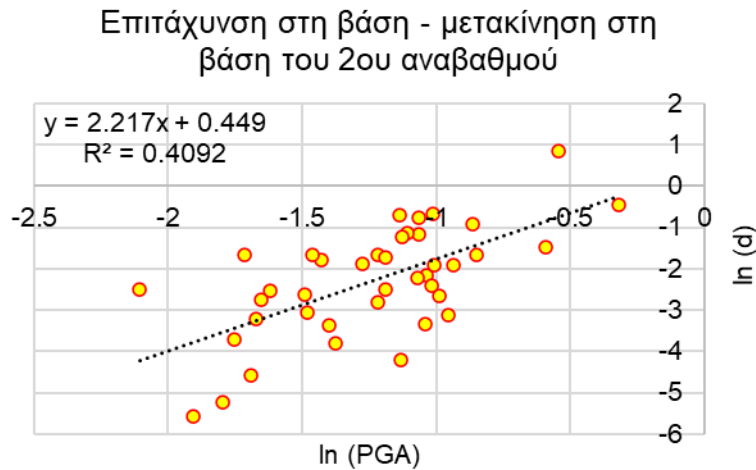
Εικόνα 4.7. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με $PI = 13$.



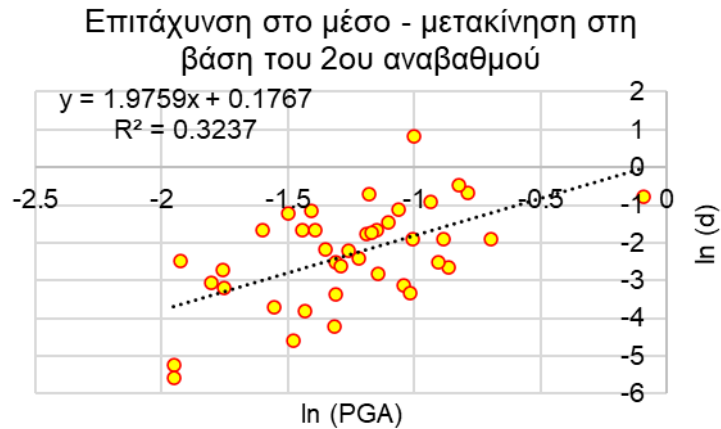
Εικόνα 4.8. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με PI = 13.



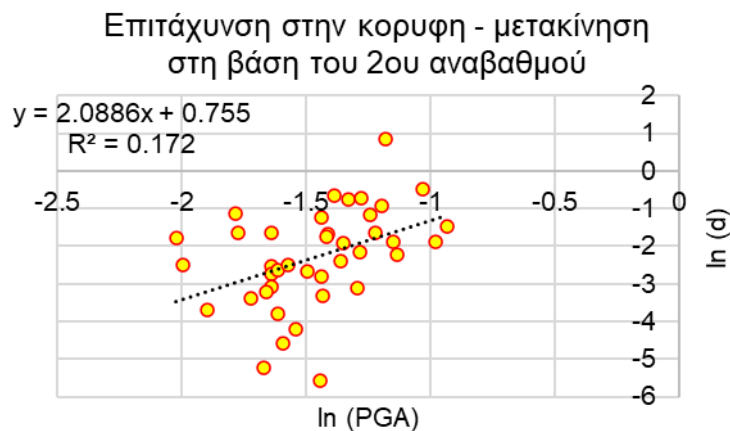
Εικόνα 4.9. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με PI = 13.



Εικόνα 4.10. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρσανές με PI = 13.



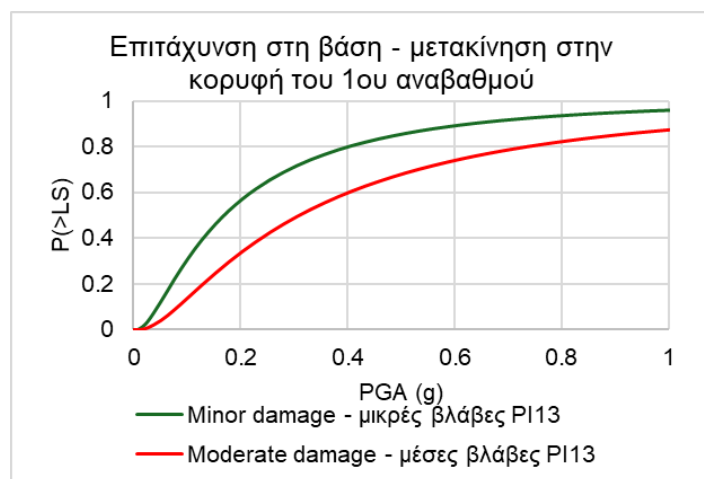
Εικόνα 4.11. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρσανές με PI = 13.



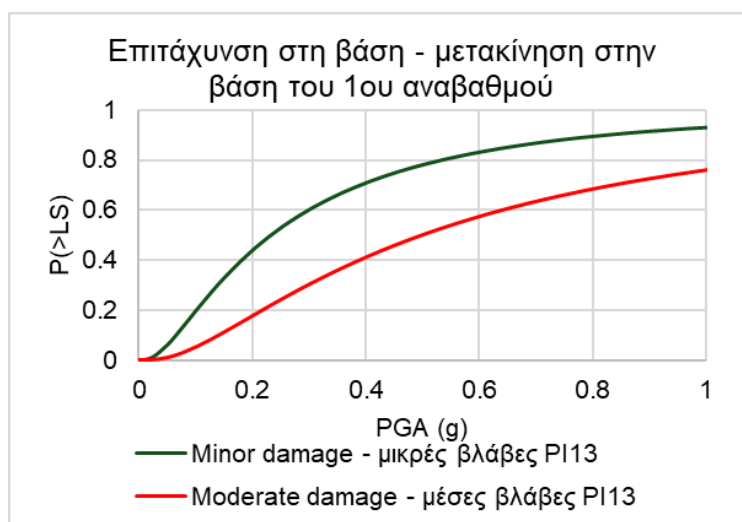
Εικόνα 4.12. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρσανές με PI = 13.

Από τα παραπάνω μοντέλα σεισμικής απαίτησης επιλέχθηκαν αυτά που χρησιμοποιούν την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς ως μέτρο σεισμικής έντασης για να χαραχθούν οι ανάλογες καμπύλες τρωτότητας (παρακάτω εικόνες). Για τη χάραξη των καμπυλών χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.3. Σχετικά με τις αβεβαιότητες β limit και β capacity οι επιλεγόμενες τιμές προέρχονται από την αντίστοιχη βιβλιογραφία για τις καμπύλες τρωτότητας. Οι στάθμες βλάβης ορίστηκαν ως εξής: οι μικρές βλάβες αντιστοιχούν σε μετακινήσεις της τάξης των 0.05 m, ενώ μέσες βλάβες αναφέρονται σε τιμές μετακινήσεων 0.3m. Η αβεβαιότητα β capacity προέκυψε από στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων διασποράς.

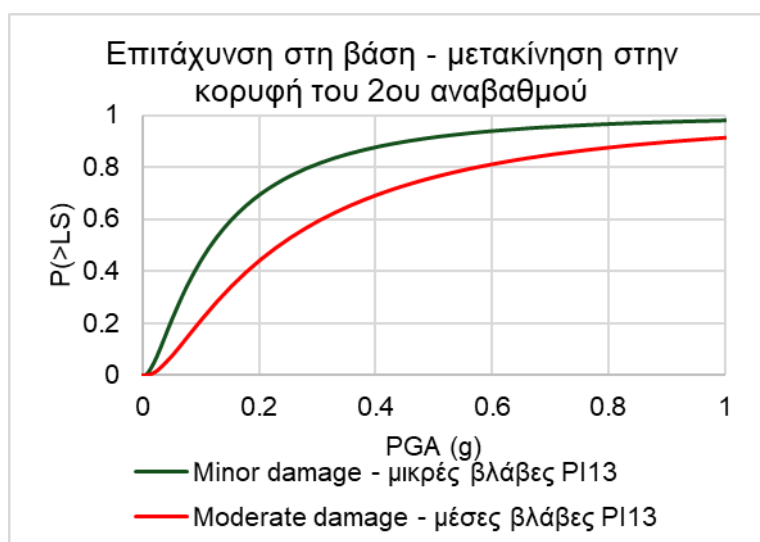
Γενικά στα ζεύγη καμπυλών τρωτότητας, οι καμπύλες των μικρών βλαβών είναι ψηλότερα από αυτές των μεσαίων βλαβών κάτι το οποίο είναι απολύτως δικαιολογημένο καθώς μια μικρή βλάβη μπορεί να προκληθεί και από έναν μικρή σχετικά επιτάχυνσης σεισμό. Ένα ακόμα αξιοσημείωτο πως ένας σεισμός συγκεκριμένης επιτάχυνσης μπορεί να προκαλέσει διαφορετικό επίπεδο βλάβης στο πρανές, αυτό ωστόσο συμβαίνει καθώς στον σεισμό δεν είναι η επιτάχυνση το μοναδικό κριτήριο για την ένταση του αλλά και η διάρκεια και το συχνотικό περιεχόμενο.



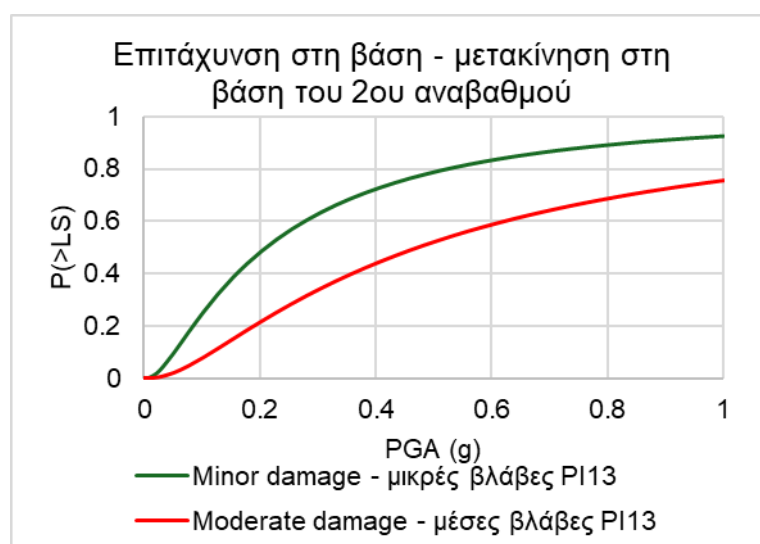
Εικόνα 4.13. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με $PI = 13$.



Εικόνα 4.14. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με $PI = 13$.



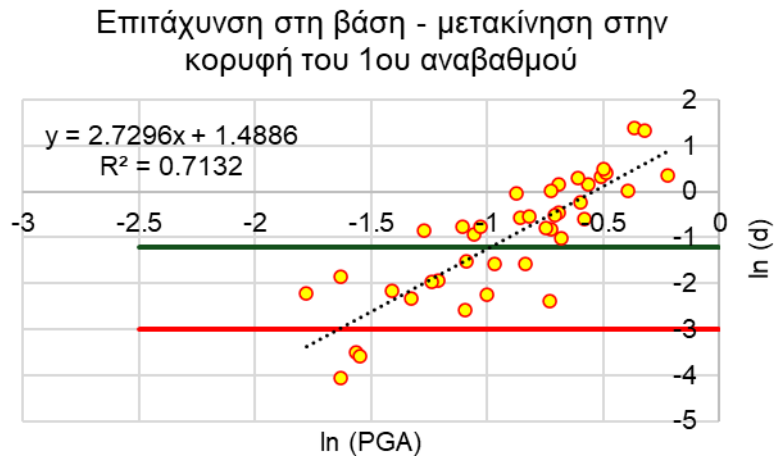
Εικόνα 4.15. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με PI = 13.



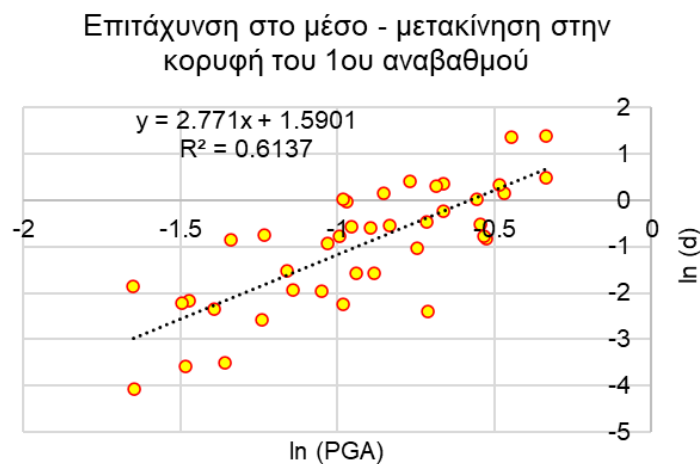
Εικόνα 4.16. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με PI = 13.

4.2 ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ & ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΑΝΕΣ ΜΕ PI = 27

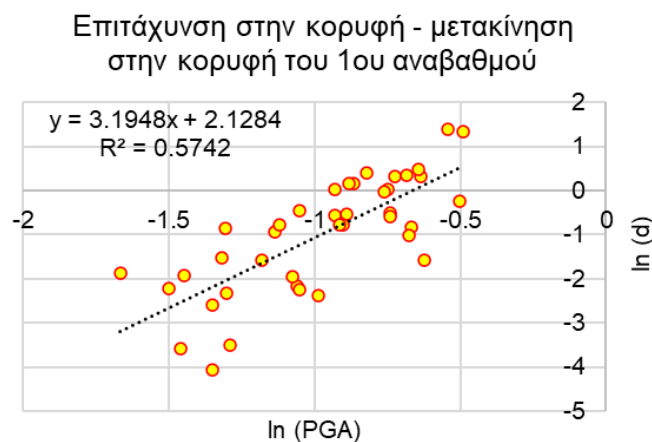
Ακολουθώντας ανάλογη πορεία με την προηγούμενη ενότητα προέκυψε σειρά πιθανοτικών μοντέλων σεισμικής απαίτησης και καμπυλών τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με PI = 27. Αυτό που διαπιστώνεται είναι ότι οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης είναι αυξημένες σε σχέση με το έδαφος PI13 και ότι υπάρχει μικρότερη διαφορά μεταξύ υψηλών και χαμηλών επιταχύνσεων στους συντελεστές συσχέτισης σε σχέση με το προηγούμενο έδαφος. Στα αποτελέσματα αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι τα μικρότερα β demand σε σχέση με το προηγούμενο αργιλικό έδαφος που εξετάστηκε. Στις καμπύλες τρωτότητας οι πιθανότητες για μικρές και μέσες βλάβες είναι σχετικά μικρότερες με το προηγούμενο έδαφος.



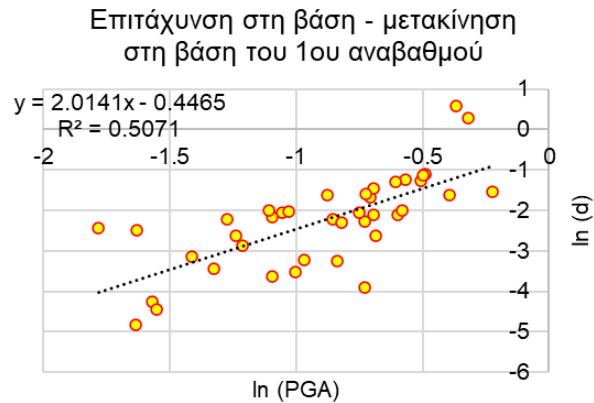
Εικόνα 4.17. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρρανές με $PI = 27$.



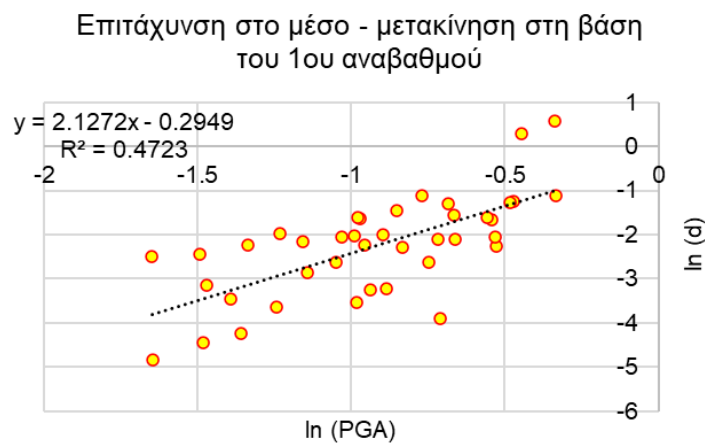
Εικόνα 4.18. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρρανές με $PI = 27$.



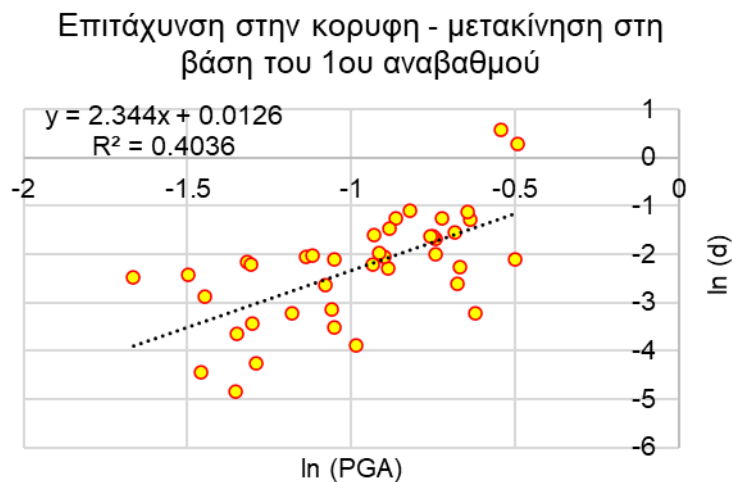
Εικόνα 4.19. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρρανές με $PI = 27$.



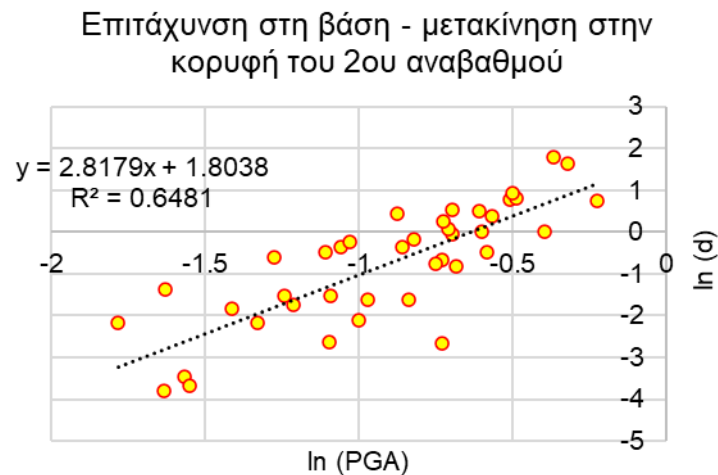
Εικόνα 4.20. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με $PI = 27$.



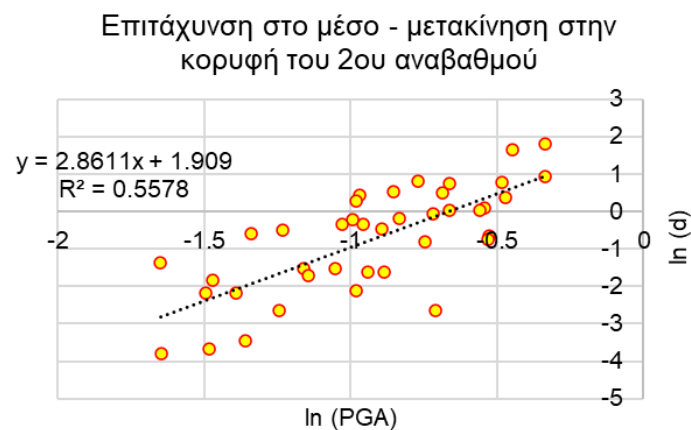
Εικόνα 4.21. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με $PI = 27$.



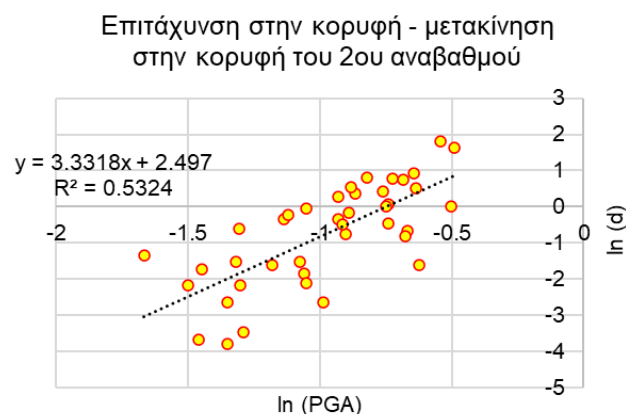
Εικόνα 4.22. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρανούς για το εδαφικό πρανές με PI = 27.



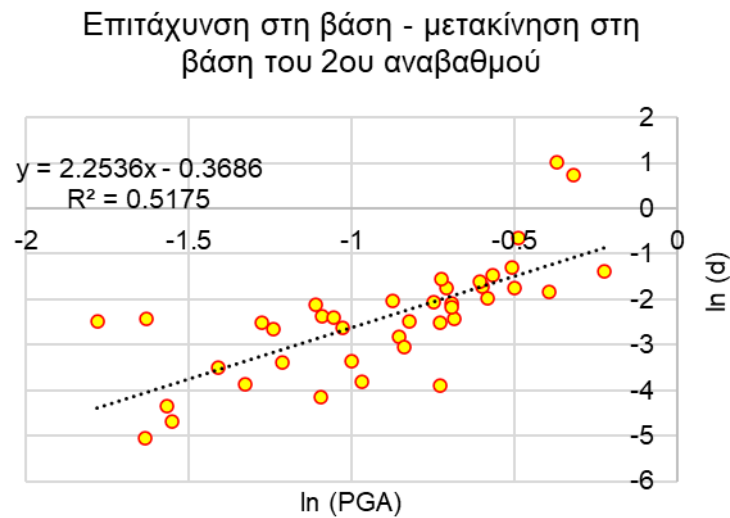
Εικόνα 4.23. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρανούς για το εδαφικό πρανές με PI = 27.



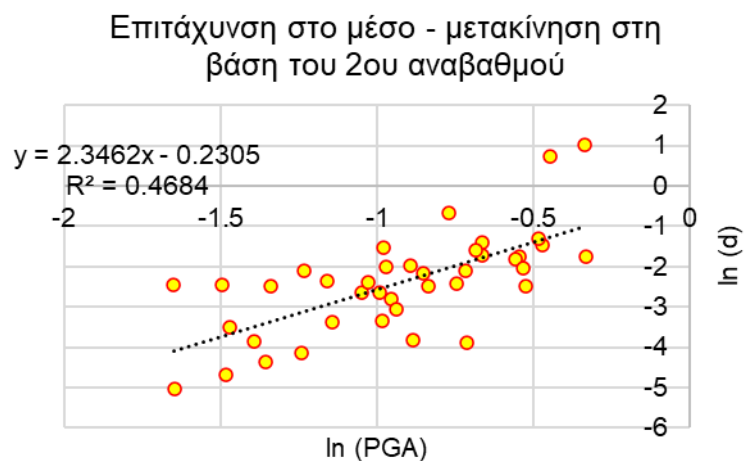
Εικόνα 4.24. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρανούς για το εδαφικό πρανές με PI = 27.



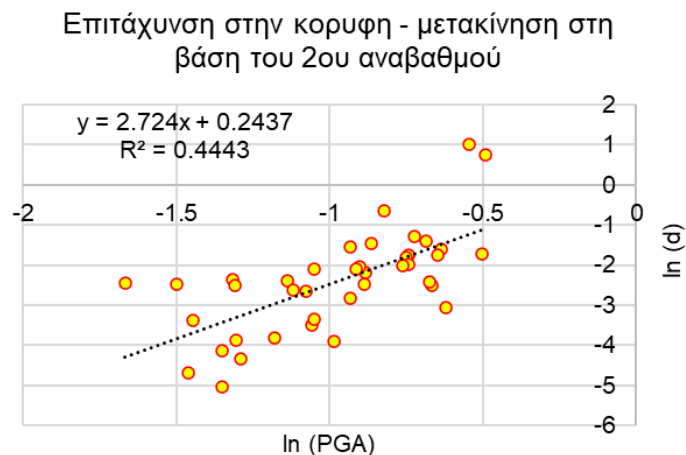
Εικόνα 4.25. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρανές PI = 27.



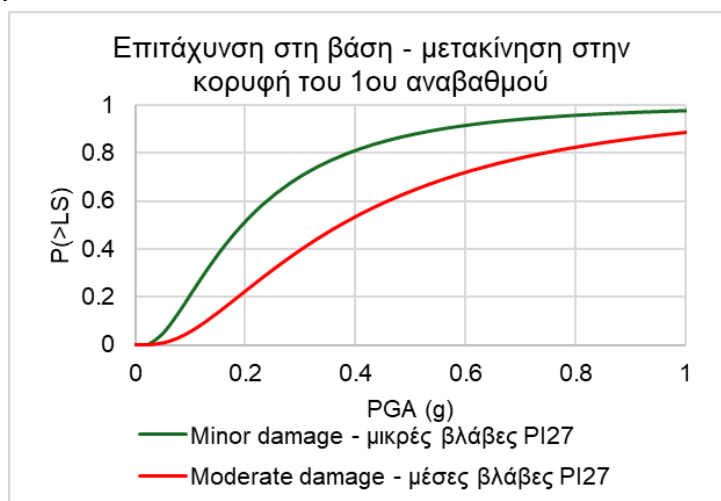
Εικόνα 4.26. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με PI = 27.



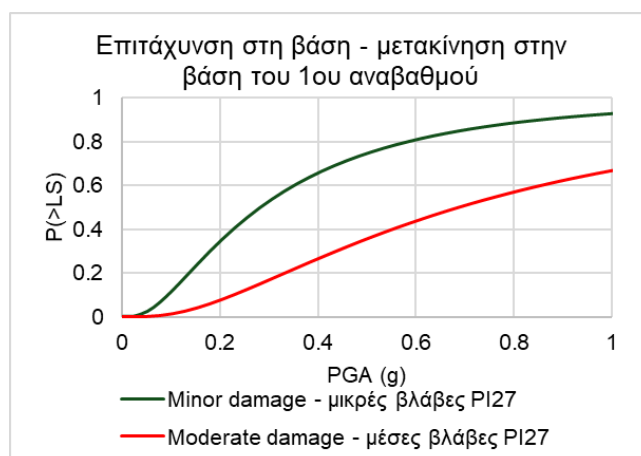
Εικόνα 4.27. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με PI = 27.



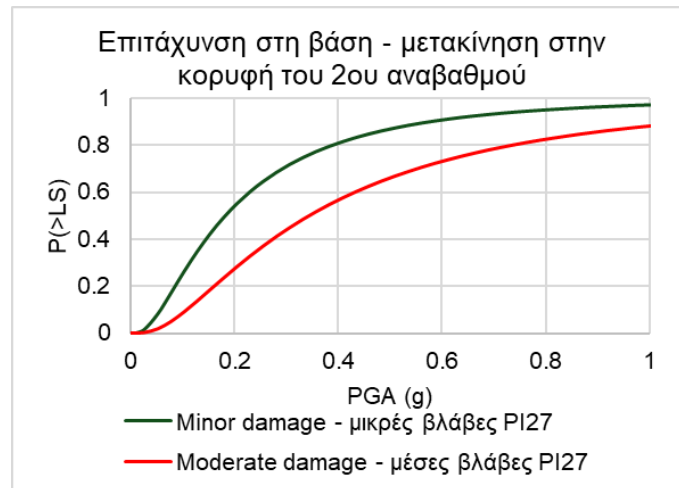
Εικόνα 4.28. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρσανές με PI = 27.



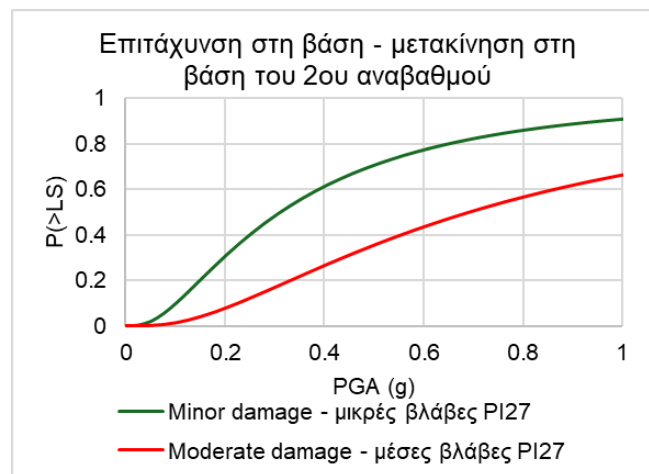
Εικόνα 4.29. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρσανές με PI = 27.



Εικόνα 4.30. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρσανές με PI = 27.



Εικόνα 4.31. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με $PI = 27$.

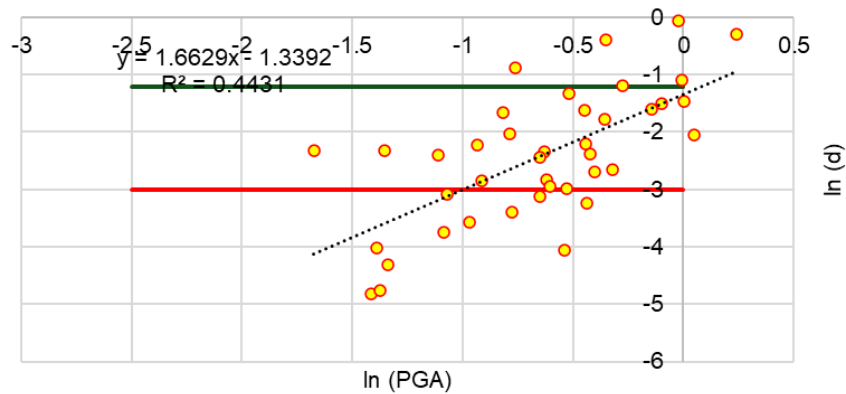


Εικόνα 4.32. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με $PI = 27$.

4.3 ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ & ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΑΝΕΣ ΜΕ $PI = 66$

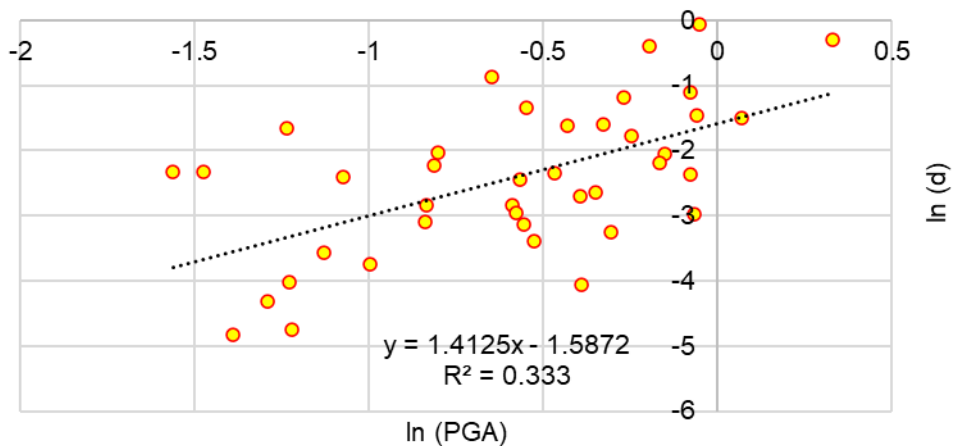
Ακολουθώντας ανάλογη πορεία με την προηγούμενη ενότητα προέκυψε σειρά πιθανοτικών μοντέλων σεισμικής απαίτησης και καμπυλών τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με $PI = 66$. Το β demand σε αυτή την περίπτωση είναι αρκετά προσαυξημένο σε σχέση με τις προηγούμενες 2 περιπτώσεις με τιμές αρκετά κοντά στην μονάδα. Στο θέμα τώρα των καμπυλών τρωτότητας η διαφορά με τις άλλες 2 περιπτώσεις είναι ότι οι πιθανότητες για μικρή και ειδικά για μέση ζημιά είναι αισθητά μειωμένες σε σχέση με τις άλλες 2 περιπτώσεις. Αυτό διότι το έδαφος είναι αρκετά πιο σκληρό και χρειάζεται έναν αρκετά πιο ισχυρό σεισμό για να παρατηρηθεί η οποιαδήποτε μόνιμη μετακίνηση.

Επιτάχυνση στη βάση - μετακίνηση στην κορυφή του 1ου αναβαθμού



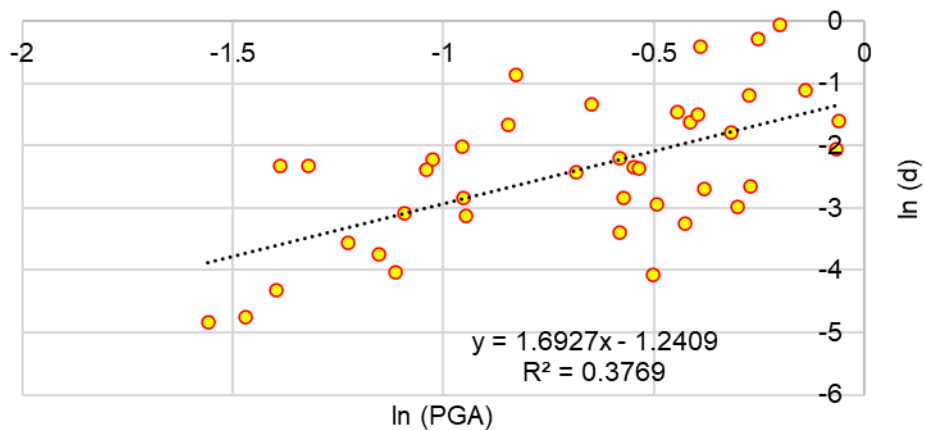
Εικόνα 4.33. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρσανές με $PI = 66$.

Επιτάχυνση στο μέσο - μετακίνηση στην κορυφή του 1ου αναβαθμού



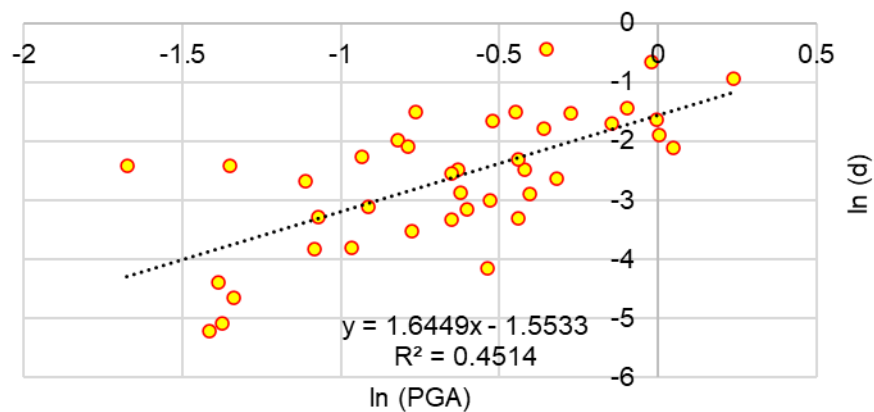
Εικόνα 4.34. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρσανές με $PI = 66$.

Επιτάχυνση στην κορυφή - μετακίνηση στην κορυφή του
1ου αναβαθμού



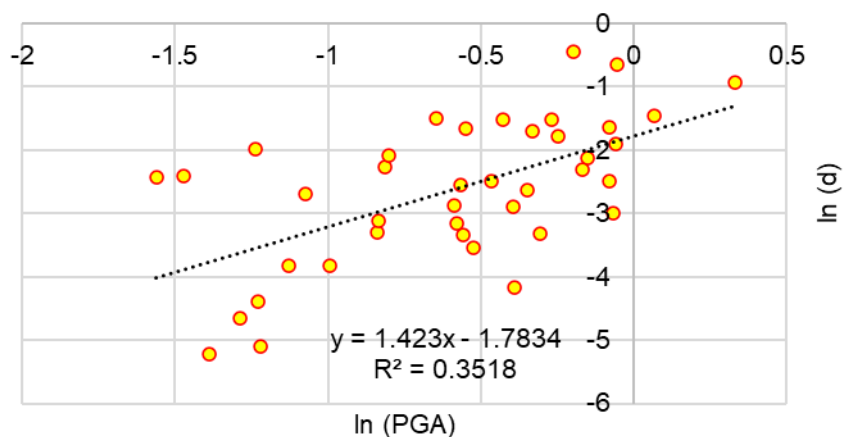
Εικόνα 4.35. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με PI = 66.

Επιτάχυνση στη βάση - μετακίνηση στη βάση του
1ου αναβαθμού



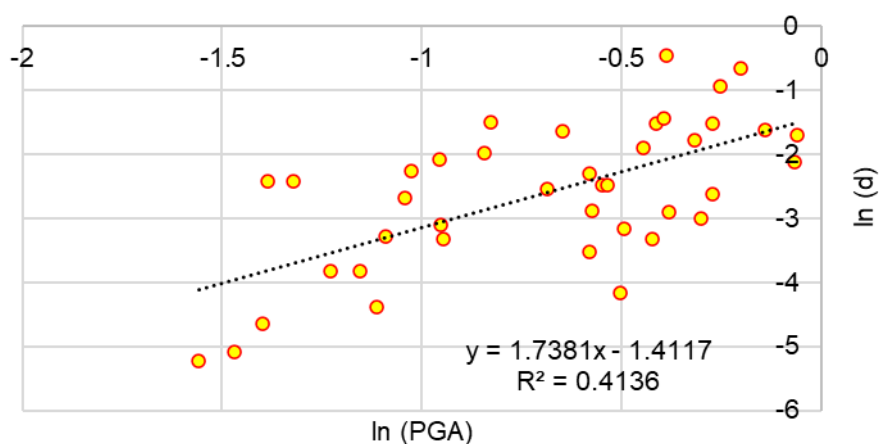
Εικόνα 4.36. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με PI = 66.

Επιτάχυνση στο μέσο - μετακίνηση στη βάση του
1ου αναβαθμού



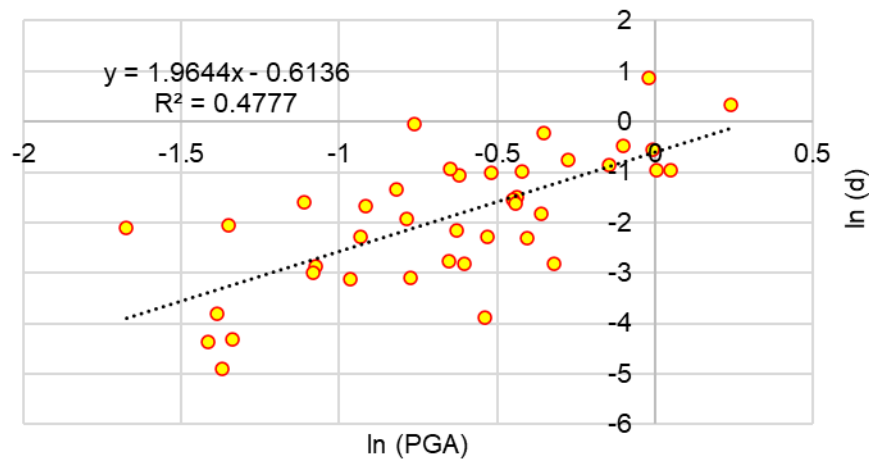
Εικόνα 4.37. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με $PI = 66$.

Επιτάχυνση στην κορυφή - μετακίνηση στη βάση του
1ου αναβαθμού



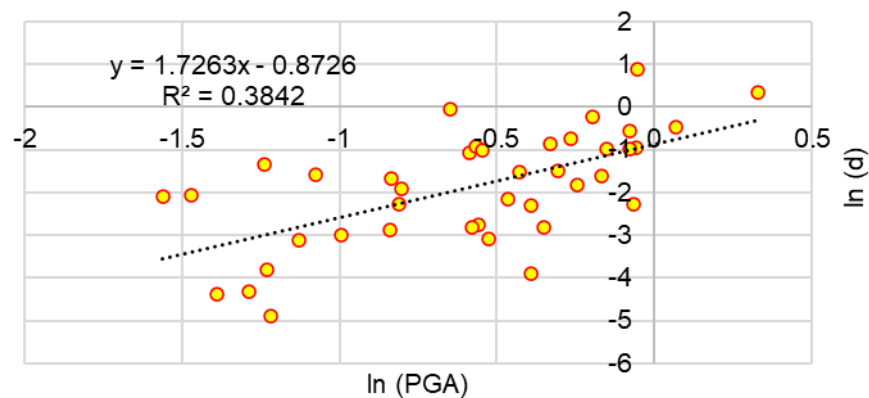
Εικόνα 4.38. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με $PI = 66$.

Επιτάχυνση στη βάση - μετακίνηση στην κορυφή
του 2ου αναβαθμού

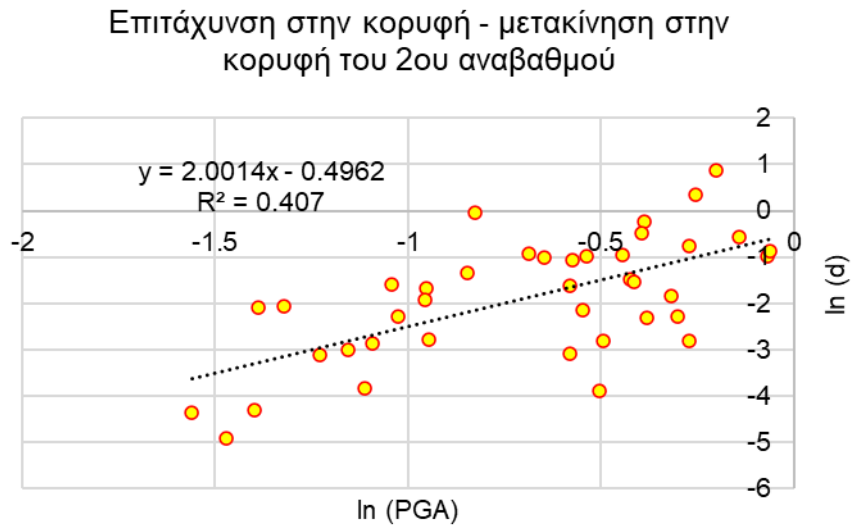


Εικόνα 4.39. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με $PI = 66$.

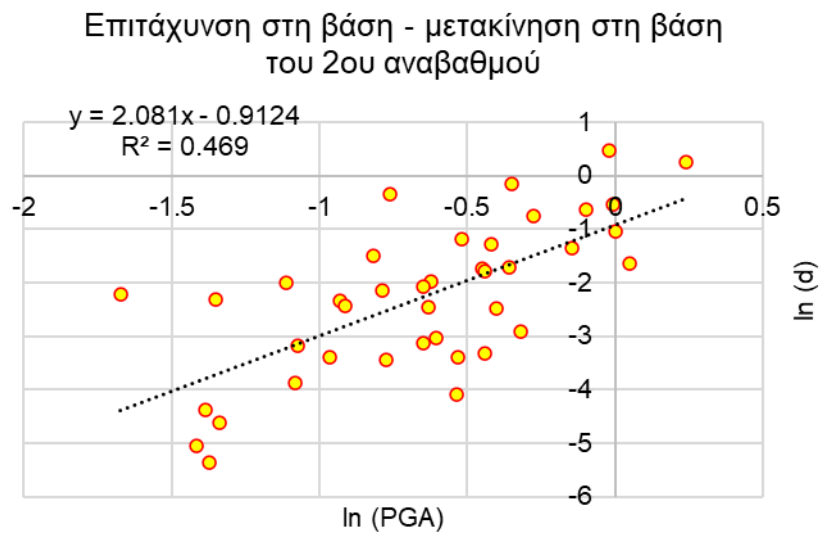
Επιτάχυνση στο μέσο - μετακίνηση στην κορυφή του
2ου αναβαθμού



Εικόνα 4.40. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρανές με $PI = 66$.

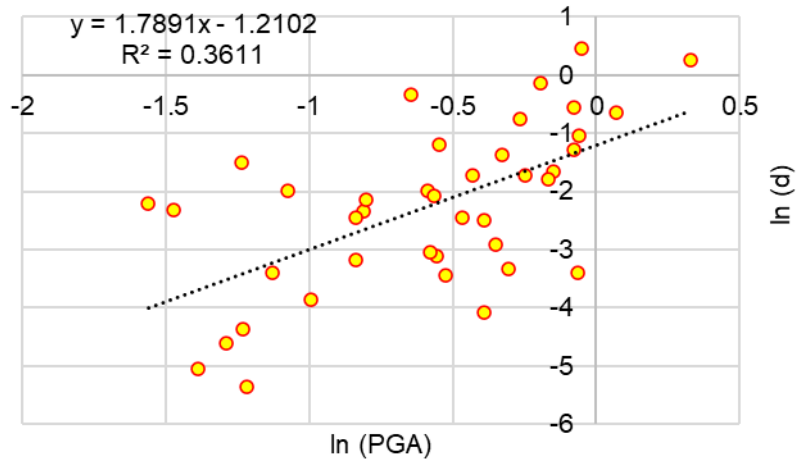


Εικόνα 4.41. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στην κορυφή του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρσανές PI = 66.



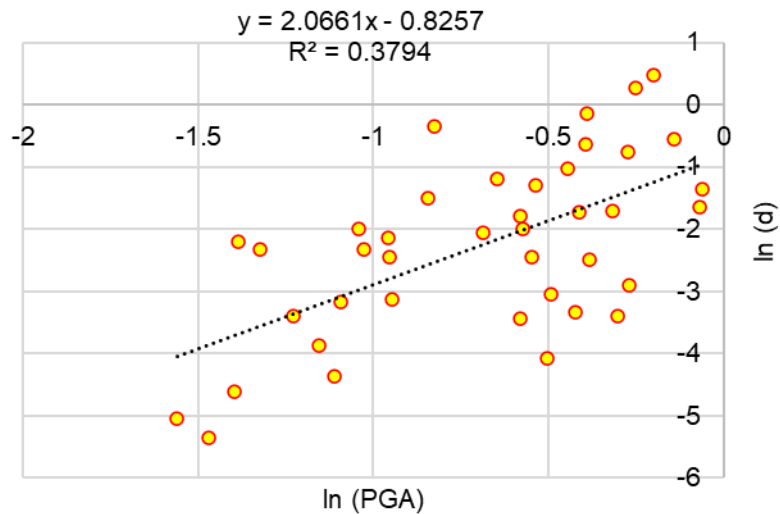
Εικόνα 4.42. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στη βάση του πρσανούς για το εδαφικό πρσανές με PI = 66.

Επιτάχυνση στο μέσο - μετακίνηση στη βάση
του 2ου αναβαθμού

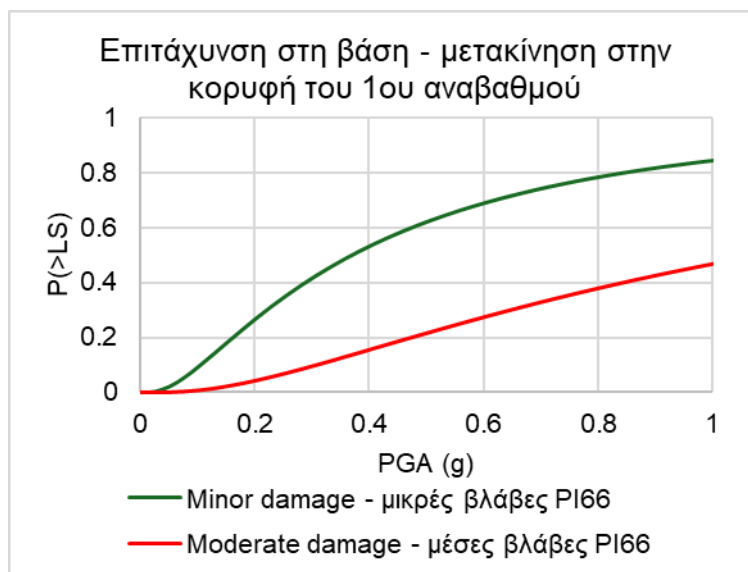


Εικόνα 4.43. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στο μέσο του πρσανούς για το εδαφικό πρρανές με PI =66.

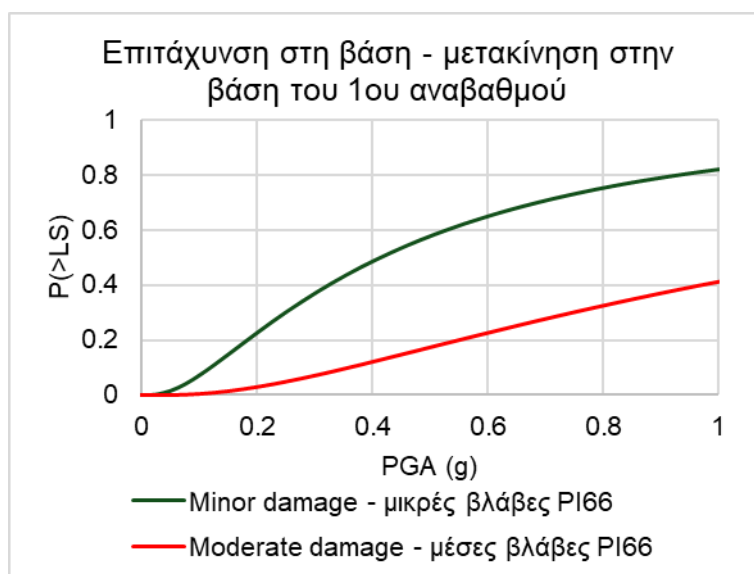
Επιτάχυνση στην κορυφή - μετακίνηση στη
βάση του 2ου αναβαθμού



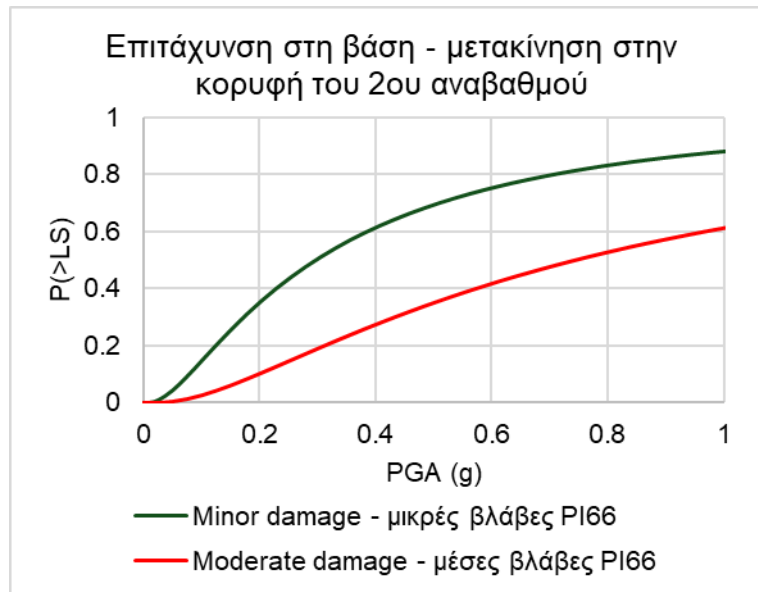
Εικόνα 4.44. Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης που συσχετίζει την μετακίνηση στη βάση του 2^{ου} αναβαθμού με την επιτάχυνση στην κορυφή του πρσανούς για το εδαφικό πρρανές με PI = 66.



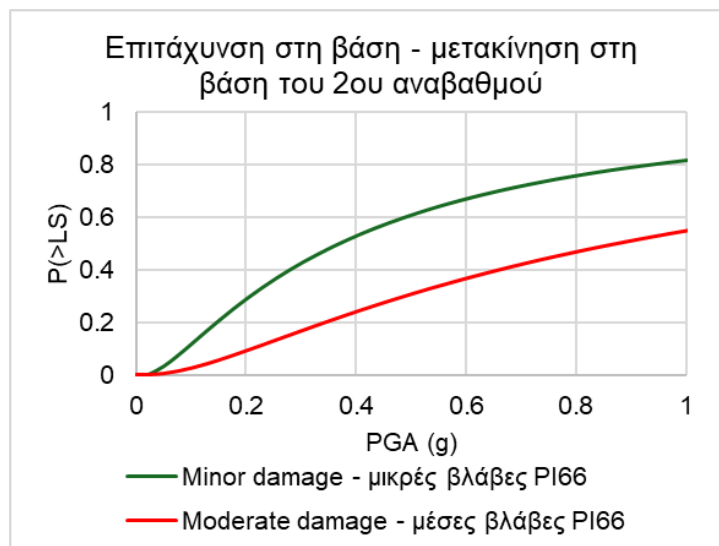
Εικόνα 4.45. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με $PI = 66$.



Εικόνα 4.46. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με $PI = 66$.



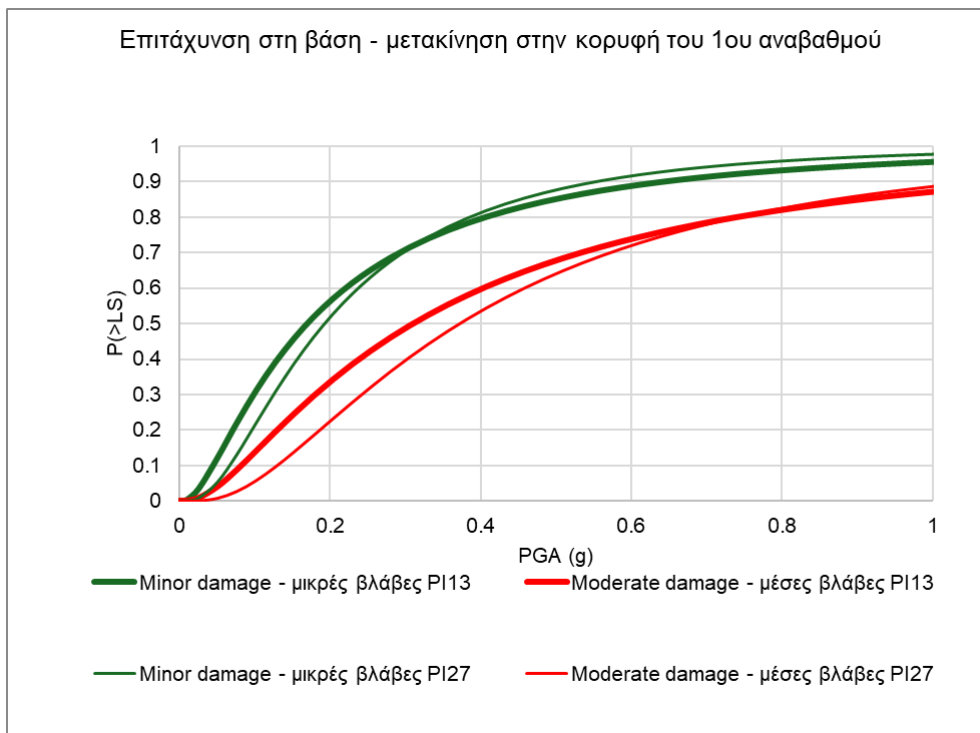
Εικόνα 4.47. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με PI = 66.



Εικόνα 4.48. Καμπύλες τρωτότητας για το εδαφικό πρανές με PI = 66.

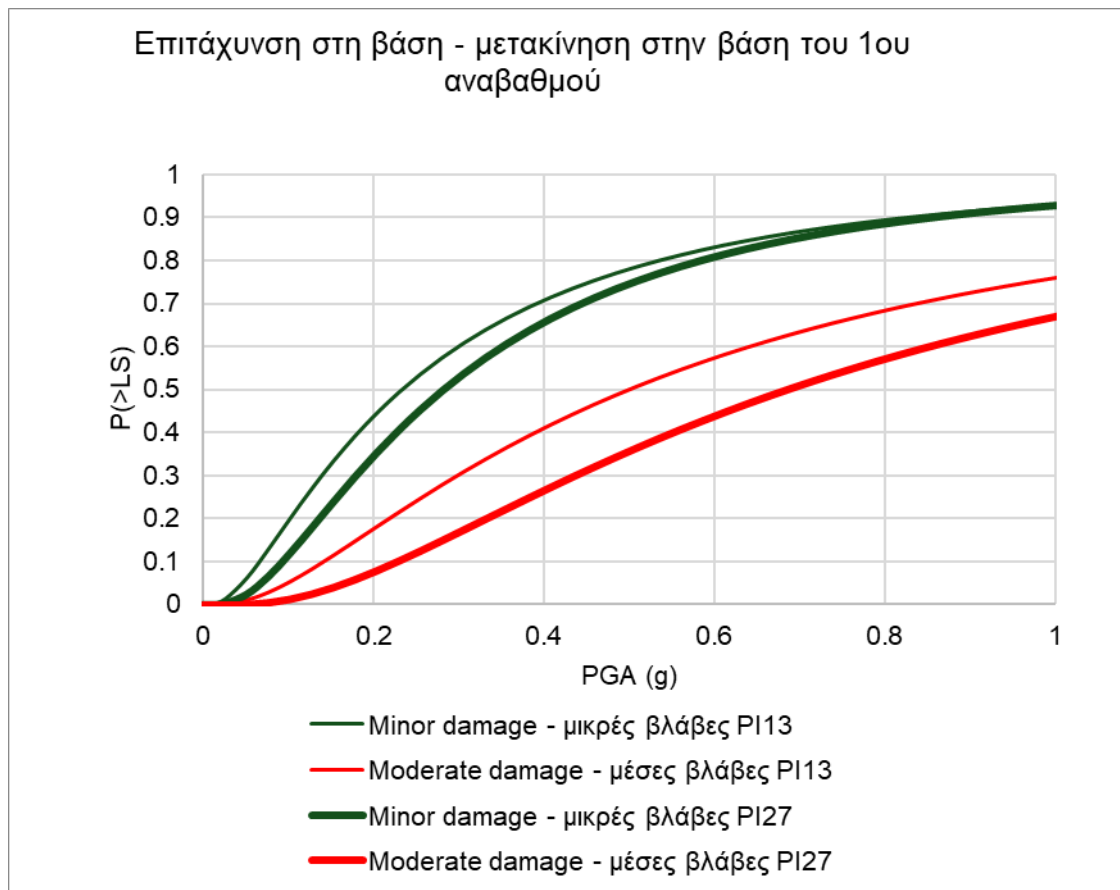
4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συγκριτικά καμπύλες τρωτότητας των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Αρχικά παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των εδαφικών πρανών με PI13 και PI27 που αναφέρονται στις καμπύλες τρωτότητας που προκύπτουν για μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι στις μικρές επιταχύνσεις υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να φτάσουμε τις μικρές ή τις μέσες βλάβες για PI13 καθώς το έδαφος είναι πιο χαλαρό από PI27, ωστόσο για μεγάλες σεισμικές επιταχύνσεις οι καμπύλες σχεδόν ταυίζονται.



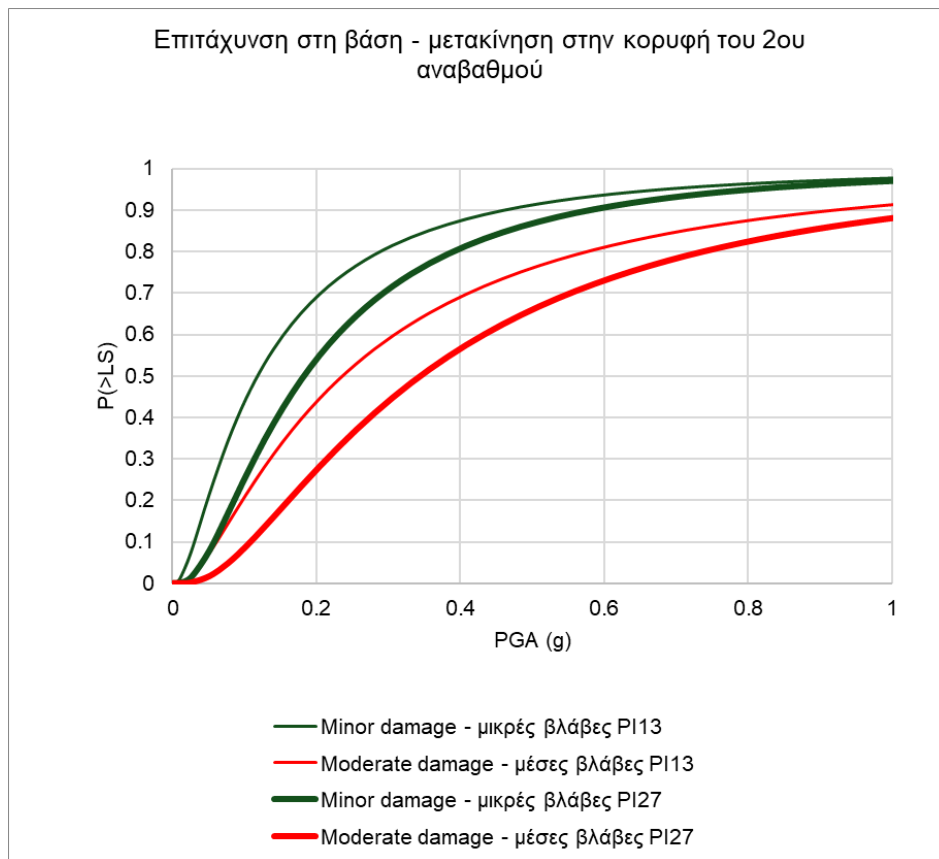
Εικόνα 4.49. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI13-PI27 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη κορυφή του 1ου αναβαθμού)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση καμπυλών τρωτότητας μεταξύ PI13-PI27 που αφορούν στη μετακίνηση στη βάση του 1ου αναβαθμού. Αυτό ουσιαστικά που μπορεί να παρατηρηθεί είναι ότι στις μικρές βλάβες πάνω από κάποια τιμή της σεισμικής επιτάχυνσης παρατηρείται ταύτιση των καμπυλών μεταξύ των δύο εδαφών και είναι λογικό καθώς μιλάμε για μικρές βλάβες που είναι αρκετά πιθανό να συμβούν χωρίς μεγάλη δυσκολία και ταυτοχρόνως έχουμε εδάφη όχι και τόσο μεγάλης διαφοράς στην πλαστικότητα. Σε αντίθεση τώρα με την προηγούμενη περίπτωση στο θέμα των μέσων βλαβών υπάρχει μια απόκλιση στην πιθανότητα να συμβούν ακόμα και όσο προχωράμε αρκετά στη κλίμακα της σεισμικής επιτάχυνσης. Η διαφορά των 2 καμπυλών στο θέμα της πιθανότητας για μέσες βλάβες είναι περίπου 10 %.



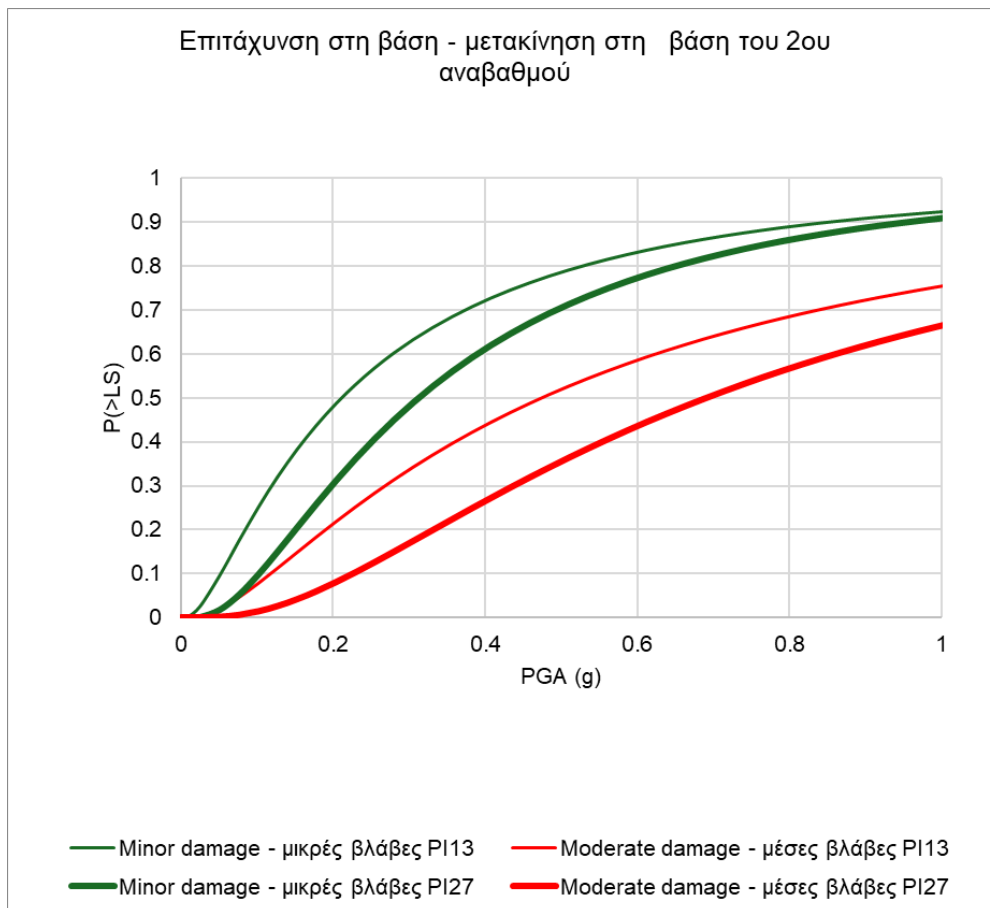
Εικόνα 4.50. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI13-PI27 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη βάση του 1ου αναβαθμού

Στην περίπτωση μετακίνησης στην κορυφή του 2^{ου} (υψηλότερου αναβαθμού) οι καμπύλες πάλι μετά από ένα σημείο ταυτίζονται για όλους τους λόγους που προαναφέρθηκαν και στην περίπτωση μετακίνησης κορυφής του 1^{ου} αναβαθμού. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι ότι στην περίπτωση του 2^{ου} αναβαθμού οι πιθανότητες να συμβούν οι βλάβες αυτές και ειδικότερα οι μέσες είναι ελαφρώς πιο αυξημένες σε σχέση με τον 1^ο αναβαθμό. Αυτό συμβαίνει επειδή οι μεγαλύτερες μετακινήσεις σε ένα σεισμό σε ένα οδικό πρυνές συμβαίνουν στην κορυφή του υψηλότερου αναβαθμού υψομετρικά.



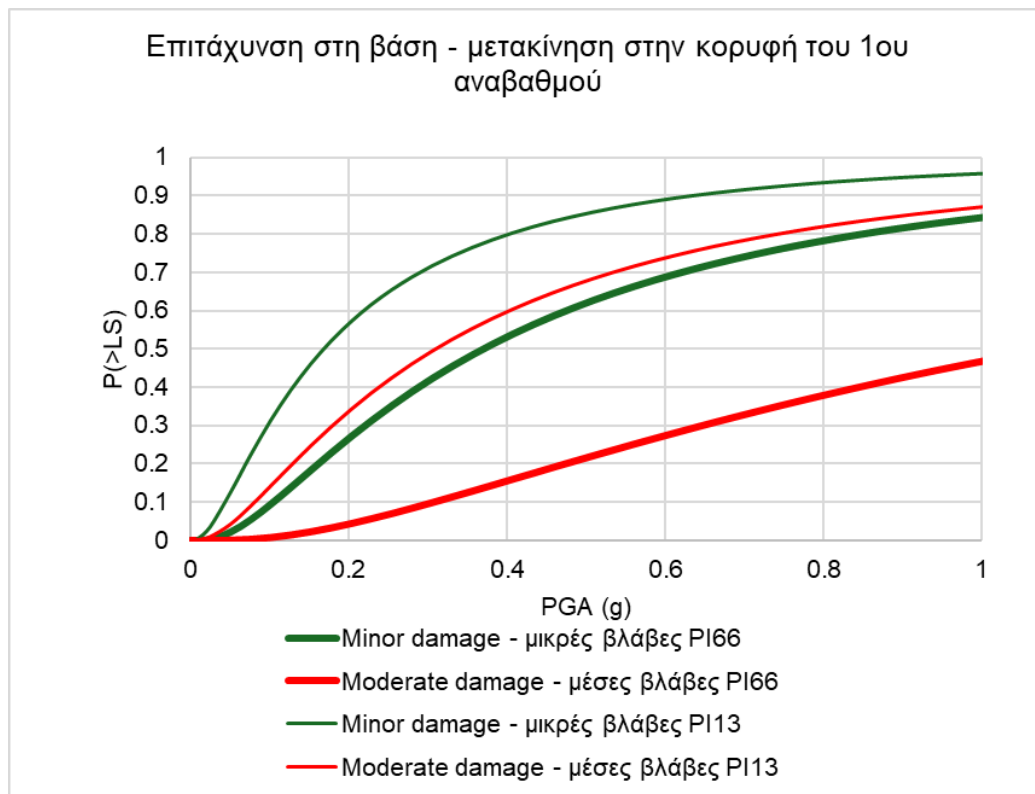
Εικόνα 4.51. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI13-PI27 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στην κορυφή του 2ου αναβαθμού.

Για την περίπτωση των μετακινήσεων στην βάση του 2^{ου} αναβαθμού παρατηρούνται όλα όσα παρατηρήθηκαν και για τις μετακινήσεις στην βάσει του 1^{ου} αναβαθμού για τους λόγους που προαναφέρθηκαν και μάλιστα οι πιθανότητες είναι ίδιες σχεδόν με ελάχιστες αποκλίσεις σε σχέση με τον 1^ο αναβαθμό.



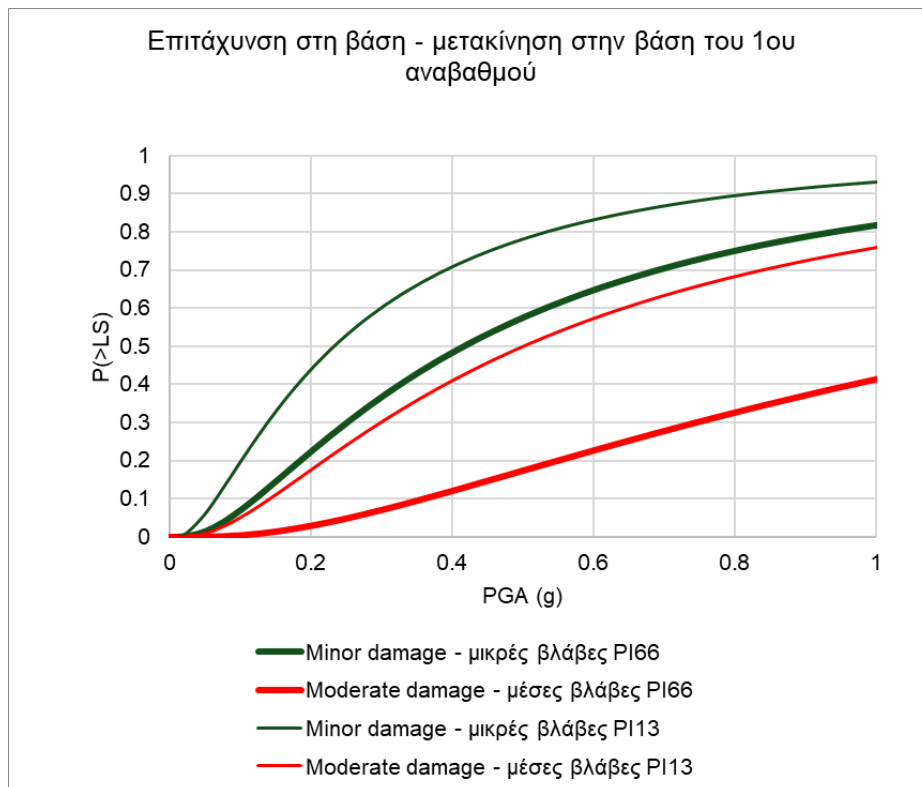
Εικόνα 4.52. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI13-PI27 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη βάση του 2ου αναβαθμού)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά καμπύλες τρωτότητας που προέκυψαν για εδαφικά πρηνή με PI13-PI66. Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί για τη σύγκριση των 2 εδαφών για την μετακίνηση στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού είναι ότι οι διαφορές είναι αρκετά μεγάλες και για την περίπτωση των μικρών αλλά και για την περίπτωση των μέσων βλαβών, κάτι το οποίο είναι απολύτως λογικό, καθώς στην πρώτη περίπτωση εδάφους μιλάμε για μια άργιλο χαλαρή ενώ στην δεύτερη για μια άργιλο σχετικά δύσκαμπτη.



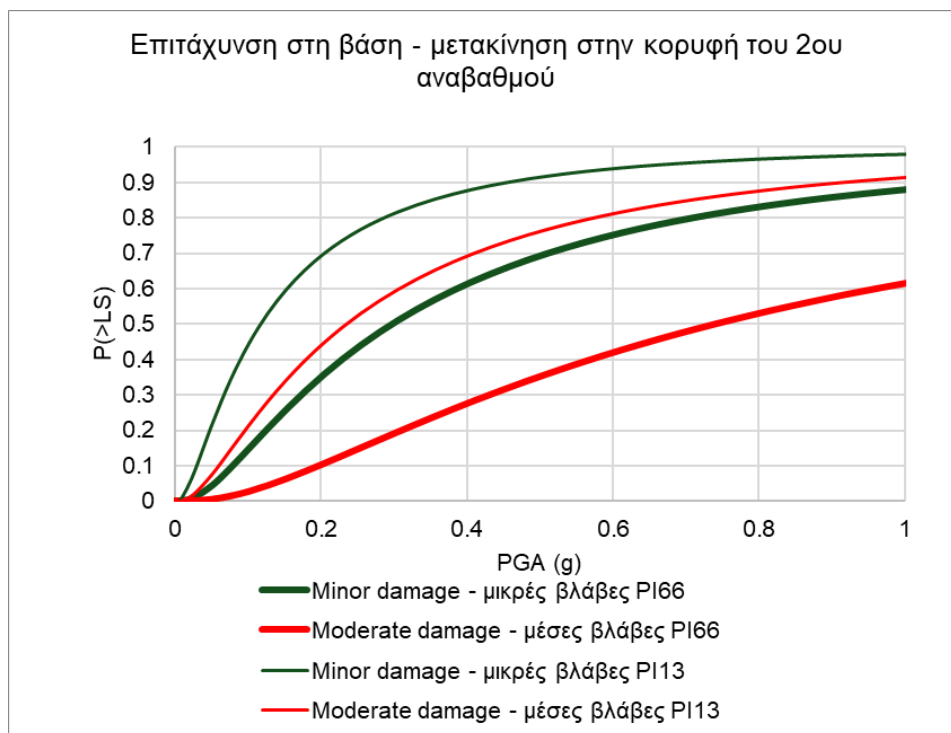
Εικόνα 4.53. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI13-PI66 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη κορυφή του 1ου αναβαθμού)

Παρακάτω φαίνεται η σύγκριση για τα ίδια εδάφη για τις μετακινήσεις στην βάση του 1^{ου} αναβαθμού. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι οι πάλι οι αποκλίσεις είναι αισθητές λόγω διαφοράς στην πλαστικότητα των εδαφών, ωστόσο οι πιθανότητες να συμβούν οι βλάβες σε σχέση με την κορυφή του αναβαθμού είναι γύρω στο 5-7 % μειωμένες διότι οι κορυφές είναι πιο επιρρεπείς σε μεγαλύτερες μετακινήσεις.

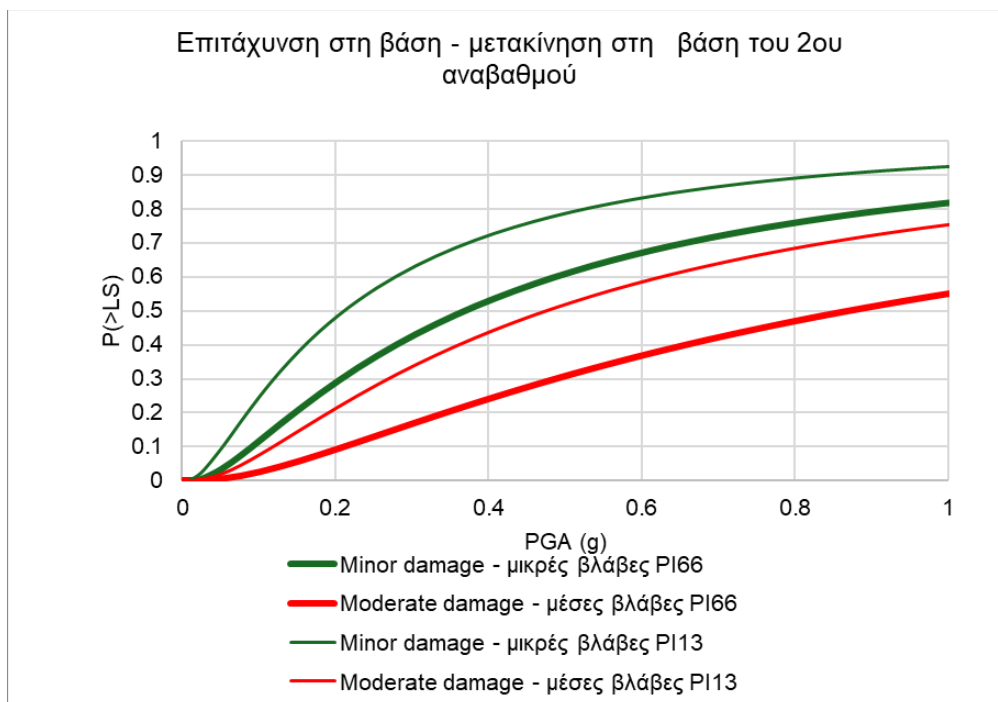


Εικόνα 4.54. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI13-PI66 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη βάση του 1ου αναβαθμού)

Στα επόμενα δύο διαγράμματα βλέπουμε τις συγκρίσεις για το ίδιο έδαφος στο φρύδι και στον πόδα του 2^{ου} αναβαθμού. Βλέπουμε τις αποκλίσεις στις πιθανότητες για ακριβώς τους ίδιους λόγους που ισχύουν για τον 1^ο αναβαθμό με την μοναδική διαφορά ότι οι πιθανότητες στη βάση είναι γύρω στο 15 τοις εκατό μειωμένες σε σχέση με την κορυφή, ουσιαστικά ελαφρώς μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τις διαφορές στην κορυφή και στη βάση του 1^{ου} αναβαθμού.

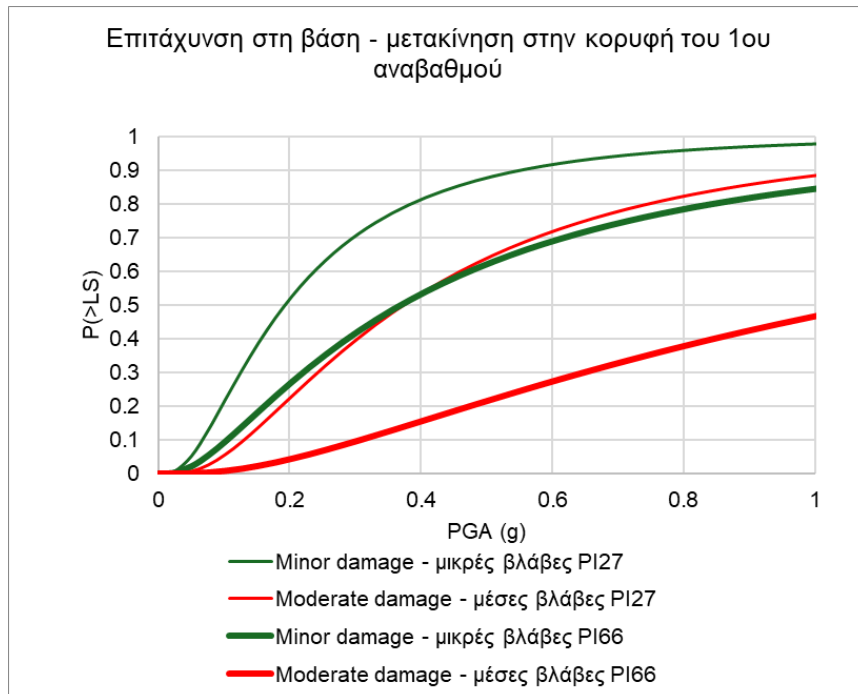


Εικόνα 4.55. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI13-PI66 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στην κορυφή του 2ου αναβαθμού)



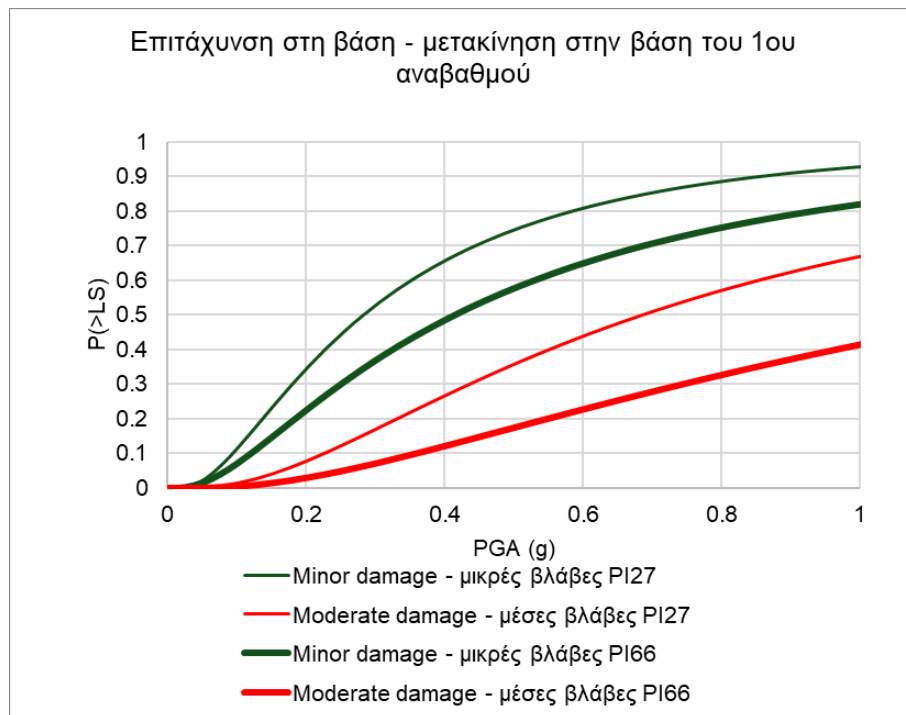
Εικόνα 4.56. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI13-PI66 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη βάση του 2ου αναβαθμού)

Στο επόμενο γράφημα που αφορά την σύγκριση μεταξύ PI27-PI66 στην κορυφή του 1^{ου} αναβαθμού διακρίνεται πάλι μια αρκετά μεγάλη διαφορά μεταξύ των καμπυλών των 2 εδαφών όσο αυξάνεται η σεισμική επιτάχυνση του εδάφους γιατί και σε αυτή την σύγκριση μεταξύ των 2 εδαφών, όπως και στην ακριβώς προηγούμενη, μιλάμε για ένα έδαφος αργιλικό σχετικά χαλαρό και για ένα άλλο σχετικά σκληρό αργιλικό.



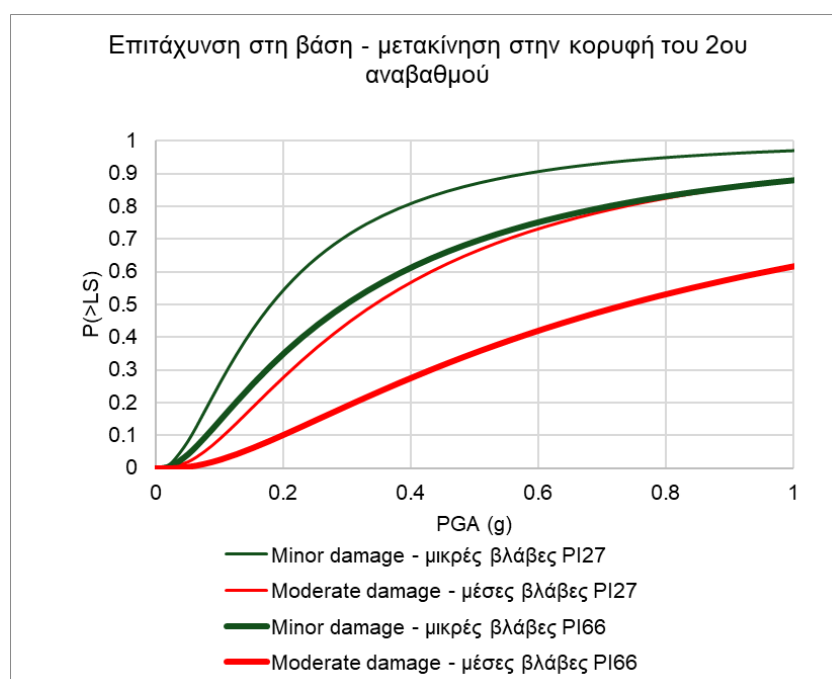
Εικόνα 4.57. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI27-PI66 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη κορυφή του 1ου αναβαθμού)

Για την βάση του 1^{ου} αναβαθμού πάλι παρατηρούνται οι έντονες διαφορές μεταξύ των καμπυλών με την διαφορά ότι οι πιθανότητες είναι πιο μειωμένες σε σχέση με την περίπτωση της κορυφής του αναβαθμού.



Εικόνα 4.58. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI27-PI66 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη βάση του 1ου αναβαθμού)

Για την επόμενη ακριβώς σύγκριση στην κορυφή του 2^{ου} αναβαθμού πάλι φαίνεται μεγάλη διαφορά στις καμπύλες όσο αυξάνεται η σεισμική επιτάχυνση για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Απλώς μεταξύ των καμπυλών των μικρών βλαβών οι διαφορές στις πιθανότητες είναι ηπιότερες σε σχέση με τις μέσες βλάβες. Αυτό γιατί οι μικρές βλάβες και στα 2 εδάφη δεν απαιτούν υπερβολικά μεγάλη ενέργεια για να συμβούν και μετά από ένα σημείο της σεισμικής επιτάχυνσης συγκεντρώνουν σημαντικές πιθανότητες και στα 2 εδάφη που μελετώνται.



Εικόνα 4.59. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI27-PI66 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη κορυφή του 2ου αναβαθμού)

Στην επόμενη σύγκριση μεταξύ PI27-PI66 στην βάση του 2^{ου} αναβαθμού φαίνονται οι αποκλίσεις και η διαφορά στις πιθανότητες μεταξύ κορυφής και βάσης στον 2^ο αναβαθμό για τους γνωστούς λόγους που αναφέρθηκαν και παραπάνω. Γενικά παρατηρείται μεγαλύτερη σύγκλιση των καμπυλών από ότι στην περίπτωση της βάσης του 2^{ου} αναβαθμού στη σύγκριση PI13-PI66 κάτι που μοιάζει αρκετά λογικό καθώς το έδαφος PI27 είναι λιγότερο χαλαρό από το PI13.



Εικόνα 4.60. Σύγκριση καμπυλών τρωτότητας PI27-PI66 με επιτάχυνση στη βάση και μετακίνηση στη βάση του 2ου αναβαθμού)

5. Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη της σεισμικής τρωτότητας πρηνών μέσω δυναμικών αναλύσεων με το λογισμικό FLAC 2D. Σκοπός της έρευνας ήταν η αποτίμηση της απόκρισης τριών διαφορετικών πρηνών, τα οποία διέφεραν ως προς τα φυσικά και μηχανικά τους χαρακτηριστικά, υπό την επίδραση διαφόρων σεισμικών διεγέρσεων. Για κάθε περίπτωση εκτελέστηκαν μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις, λαμβάνοντας υπόψη την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών και την επίδραση της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους και σεισμικής φόρτισης.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι πρηνή με μειωμένες τιμές αντοχής και δυσκαμψίας — όπως χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, μικρή γωνία εσωτερικής τριβής και περιορισμένη συνοχή— παρουσίαζαν μεγαλύτερες μετακινήσεις και αυξημένη πιθανότητα αστοχίας, γεγονός που υποδήλωνε υψηλότερο βαθμό σεισμικής τρωτότητας. Αντίθετα, πρηνή με ενισχυμένα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά εμφάνιζαν σταθερότερη συμπεριφορά και περιορισμένες αποκρίσεις υπό σεισμική διέγερση.

Η μελέτη ανέδειξε τη σημασία της ακριβούς εκτίμησης των γεωτεχνικών παραμέτρων για την αξιόπιστη ανάλυση και αξιολόγηση της σεισμικής ευπάθειας πρηνών.

Βιβλιογραφία

- Argyroudis, S. & Kaynia, A. M., 2015. Analytical seismic fragility functions for highway and railway embankments and cuts. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(11), pp. 1863--1879.
- Baker, J. W., 2007. Probabilistic structural response assessment using vector-valued intensity measures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13), pp. 1861--1883.
- Che, F. et al., 2021. Embankment seismic fragility assessment under the near-fault pulse-like ground motions by applying the response surface method. *Shock and Vibration*, Volume 2021, pp. 1--15.
- Che, F. et al., 2021. Embankment seismic fragility assessment: A case study on Xi'an-Baoji expressway (China). *Plos one*, 16(2), p. e0246407.
- HAZUS, 2004. *Hazus Earthquake Model Technical Manual; Hazus 4.2 SP3*. Washington, DC, USA: FEMA.
- Hu, H., Huang, Y. & Chen, Z., 2019. Seismic fragility functions for slope stability analysis with multiple vulnerability states. *Environmental Earth Sciences*, Volume 78, pp. 1--10.

Maruyama, Y. et al., 2010. Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), pp. 1158--1167.

Rossetto, T. & Elnashai, A., 2003. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering structures*, 25(10), pp. 1241--1263.