

Σεισμική αναταξιμότητα και οικονομικές απώλειες για το λιμάνι του Ηρακλείου Κρήτης

**Άγγελος-Αλέξανδρος Ποάλας¹, Δάφνη Παντούσα², Δέσποινα Σκουλίδου³, Δημήτριος
Βαμβάτσικος⁴**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αναπτύσσεται μοντέλο σεισμικής διακινδύνευσης για το λιμάνι του Ηρακλείου, στη Κρήτη. Το μοντέλο ακολουθεί το κλασικό τρίπτυχο της έκθεσης, τρωτότητας και επικινδυνότητας. Ελλείψει καλύτερων δεδομένων, οι υφιστάμενες κατασκευές κατηγοριοποιούνται βάσει HAZUS και αντιστοιχίζονται στις κατάλληλες καμπύλες τρωτότητας. Η σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής αποτιμάται μέσω πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου βάσει του πλέον πρόσφατου ευρωπαϊκού μοντέλου (ESHM20). Στο σύνολό του, το μοντέλο εκτιμά τις βλάβες και τον χρόνο αποκατάστασης πλήρους λειτουργικότητας του λιμανιού, μετά από ενδεχόμενα καταστροφικά σεισμικά γεγονότα. Παράλληλα, εκτιμώνται και οι αντίστοιχες άμεσες χρηματικές απώλειες, ενώ παρέχεται και η βάση για την ανάπτυξη επιχειρησιακών μοντέλων έμμεσων απωλειών σε μεταγενέστερο στάδιο. Απώτερος στόχος είναι η ενίσχυση της σεισμικής αναταξιμότητας του λιμανιού και η κατάρτιση σχεδίων αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών.

Λέξεις Κλειδιά: Άμεσες απώλειες, Εκτίμηση σεισμικής διακινδύνευσης, Λιμένας

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ολιστικά πλαίσια αποτίμησης διακινδύνευσης και αναταξιμότητας κρίσιμων υποδομών έχουν προταθεί ως βασικά εργαλεία για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων που προκύπτουν από φυσικές καταστροφές. Πρόκειται για εξέλιξη των κλασικών εφαρμογών Μοντέλων Διακινδύνευσης Καταστροφών (CAT Risk Modelling, [1]), με την εισαγωγή της διάδοσης των συνεπειών στο σύστημα αλλά και της ανάκαμψης μετά το καταστροφικό γεγονός. Στο επίκεντρο αυτών των πλαισίων βρίσκεται η Αποτίμηση Άμεσων Επιπτώσεων (Direct Impact Assessment), η οποία βασίζεται στον συνδυασμό της αποτίμησης επικινδυνότητας, των μοντέλων έκθεσης και των συναρτήσεων τρωτότητας. Μέσω αυτής της διαδικασίας εκτιμάται το επίπεδο βλάβης των

¹ Υποψήφιος διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, angelos_poalas@mail.ntua.gr

² Societal Resilience Engineer, Resilience Guard, d.pantousa@resilienceguard.ch

³ Operational Resilience Engineer, Resilience Guard, des.skoulidou@resilienceguard.ch

⁴ Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, divamva@mail.ntua.gr

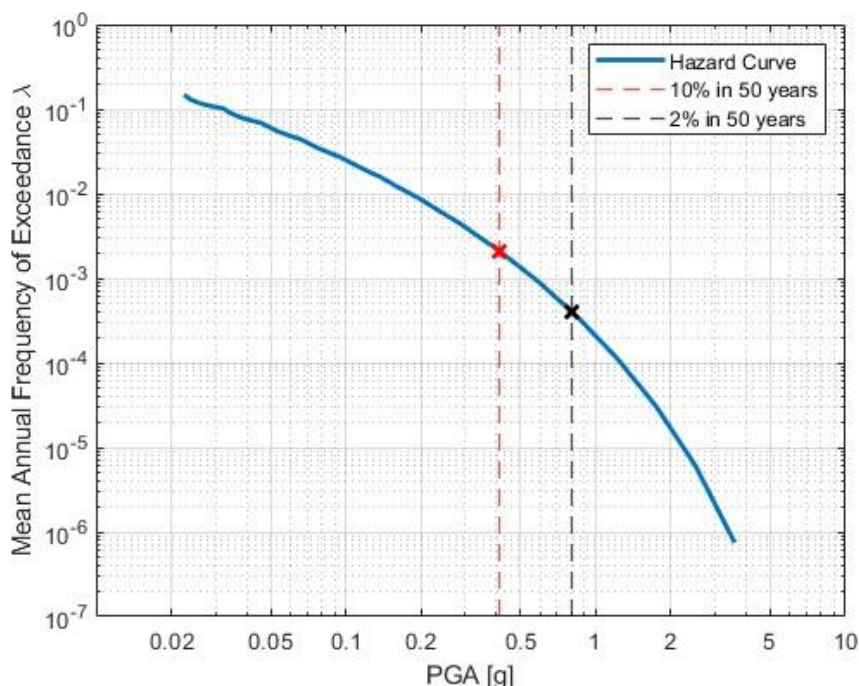
κατασκευών και ποσοτικοποιούνται οι άμεσες ζημιές ή απώλειες, εκφρασμένες κυρίως ως κόστος και χρόνος αποκατάστασης (πχ. FEMA P-58, HAZUS-MH, [2, 3]).

Οι λιμενικές υποδομές αποτελούν κρίσιμο τμήμα των δικτύων μεταφορών και της οικονομικής δραστηριότητας, καθώς διασφαλίζουν τη συνδεσιμότητα, την εμπορευματική ροή και τη λειτουργία εφοδιαστικών αλυσίδων σε τοπικό και διεθνές επίπεδο. Ωστόσο, έχουν επανειλημμένα αποδειχθεί ευάλωτες σε φυσικές καταστροφές, κυρίως σεισμούς, με σοβαρές συνέπειες για τη λειτουργία τους και την περιβάλλουσα περιοχή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα περιλαμβάνουν τις εκτεταμένες ζημιές στο λιμάνι του Oakland κατά τον σεισμό Loma Prieta το 1989 [4], τις καταρρεύσεις και εκτεταμένες βλάβες στις λιμενικές εγκαταστάσεις στο Kobe της Ιαπωνίας το 1995 [5], καθώς και πιο πρόσφατα στην Ελλάδα, όπως στο λιμάνι Ληξουρίου μετά τον σεισμό της Κεφαλλονιάς το 2014 [6] και στο λιμάνι της Κω το 2017 [7]. Στο πλαίσιο της επιστημονικής έρευνας, έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες για την αποτίμηση των ζημιών και των άμεσων επιπτώσεων σε λιμενικές εγκαταστάσεις [8], δίνοντας έμφαση κυρίως σε κρίσιμα δομικά στοιχεία όπως οι προβλήτες και οι κρηπιδότοιχοι, που έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα ευάλωτα υπό σεισμικά φορτία.

Ωστόσο, οι άμεσες ζημιές ή απώλειες αποτελούν μόνο ένα μέρος των συνολικών συνεπειών. Στην περίπτωση των λιμένων, οι τυχόν βλάβες συνεπάγονται διαταραχή της λειτουργίας κατά το διάστημα αποκατάστασης, οδηγώντας σε έμμεσες οικονομικές απώλειες [9, 10]. Για την ποσοτικοποίηση αυτού του σκέλους των συνεπειών, γίνεται η προσπάθεια εφαρμογής επιχειρησιακών προσομοιωμάτων λειτουργίας [11] στα πλαίσια του ερευνητικού έργου OCEANIDS [12]. Ωστόσο, η χρήση τους απαιτεί αποτελέσματα σε επίπεδο μεμονωμένου συμβάντος, κάτι που δεν παρέχεται από τις συμβατικές μεθόδους. Για να καλύψουμε το κενό, προτείνουμε τη χρήση μεθόδων ποσοτικοποίησης της τρωτότητας σε επίπεδο σεισμικής καταγραφής [13, 14], φέρνοντας ως παράδειγμα εφαρμογής το λιμάνι του Ηρακλείου Κρήτης.

2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ

Για την αποτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας αξιοποιείται το Ευρωπαϊκό Μοντέλο Σεισμικής Επικινδυνότητας του 2020 [15]. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η μέση καμπύλη επικινδυνότητας για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration, PGA). Θεωρείται έδαφος τύπου B κατά EC8 [16]. Γενικώς, τιμές κάτω του 0,02g θεωρούνται αμελητέες, καθότι δεν αναμένεται να προκαλέσουν αξιόλογες βλάβες. Ομοίως, τιμές άνω των 2,5g δεν προσφέρουν στις πιθανές βλάβες: Έχοντας μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης της τάξης του 10^{-5} και κάτω είναι υπερβολικά σπάνιες για να συνεισφέρουν κατ' οποιονδήποτε τρόπο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις τιμές ενδιαφέροντος εμφανίζονται στο Σχήμα 1. Για την αποτίμηση της διακινδύνευσης εισάγουμε ως κάτω όριο αποκοπής την τιμή $PGA = 0,02g$, αγνοώντας στην ουσία όλες τις μικρότερες τιμές. Με άλλα λόγια θεωρούμε ότι αυτές θα έχουν αμελητέες συνέπειες για το χαρτοφυλάκιο μας, εξασφαλίζοντας ότι η αριστερή ουρά των λογαριθμοκανονικών καμπυλών τρωτότητας, που δίνει μη μηδενική πιθανότητα υπέρβασης ακόμα και για σχεδόν μηδενικές τιμές σεισμικής έντασης, εν τέλει δε θα επηρεάσει τα αποτελέσματα.



Σχήμα 1: Μέση καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας για το λιμάνι του Ηρακλείου σε όρους μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης. Ενδεικτικά εμφανίζονται τα επίπεδα έντασης με πιθανότητα υπέρβασης 10% (κόκκινο) και 2% (μαύρο) στα 50 χρόνια

3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΘΕΣΗΣ

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρείχε ο Οργανισμός Λιμένος Ηρακλείου (Ο.Λ.Η.), στο λιμάνι υπάρχουν 74 κατασκευές ενδιαφέροντος (Σχήμα 2). Από αυτές, δεν συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο έκθεσης τρία μνημειακά κτίσματα, ήτοι ο Ενετικός Κούλες, τα νεώρια και το λιμενικό περίπτερο, τα οποία χρωματίζονται με καφέ στο Σχήμα 2.

Λειτουργούν συνολικά έξι προβλήτες (I – VI). Στην πρώτη (μαύρο χρώμα) βρίσκονται κτίρια γραφείων, όπως το κτίριο γεφυροπλάστιγγας και ο παλιός λιμενικός σταθμός επιβατών, καθώς και φυλάκια εισόδου-εξόδου. Στην δεύτερη (πράσινο χρώμα) λειτουργεί πυροσβεστικός σταθμός, υποσταθμός της Δ.Ε.Η., ο νέος λιμενικός σταθμός επιβατών, εκδοτήριο εισιτηρίων, κτίριο ελέγχου αποσκευών και φυλάκια εισόδου-εξόδου. Στην τρίτη προβλήτα (κίτρινο χρώμα), στεγάζεται το κτηνιατρείο του λιμανιού, φυλάκιο εισόδου-εξόδου, δύο υποσταθμοί της Δ.Ε.Η., ισάριθμες αποθήκες και υπόγειες δεξαμενές καυσίμων. Στις προβλήτες IV-V (μπλε χρώμα), βρίσκεται το τελωνείο, υποσταθμός της Δ.Ε.Η. και κτίριο γραφείων. Τέλος, στην έκτη προβλήτα (κόκκινο χρώμα), βρίσκεται πληθώρα ιδιωτικών κτιρίων επισκευών σκαφών, το κτίριο ελέγχου της προβλήτας (κτίριο λεμβούχων), ένας υποσταθμός της Δ.Ε.Η., κτίριο που στεγάζει παλιρροιογράφο και δύο κτίρια του Ινστιτούτου Θαλάσσιας Βιολογίας Κρήτης (Ι.ΘΑ.ΒΙ.Κ.).

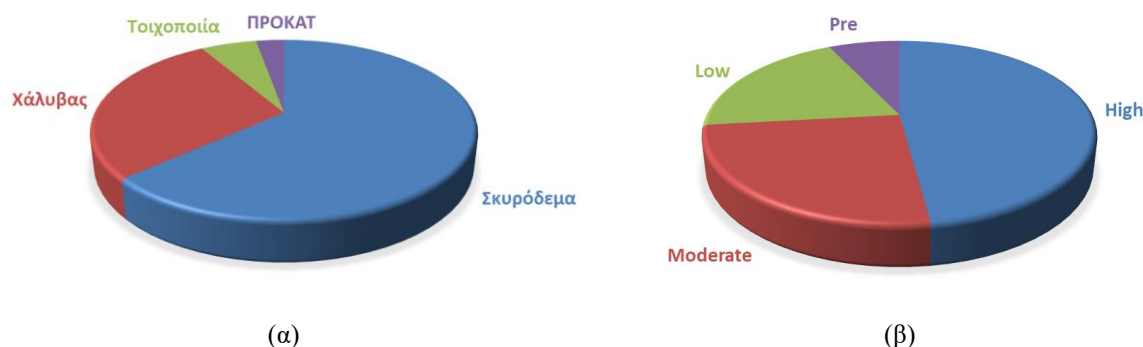
Πέρα από τις προβλήτες, κτίρια βρίσκονται και σε δύο παραλιακά μέτωπα, ένα εντός του λιμανιού και ένα εκτός αυτού. Στο πρώτο (λευκό χρώμα), υπάρχουν κτίρια πολλών και διαφορετικών χρήσεων, όπως γυμναστήριο, απεντομωτήριο, κτίρια του Ι.ΘΑ.ΒΙ.Κ., ψυγείο, σταθμός Κ.Τ.Ε.Λ., μικρό στέγαστρο στάσης λεωφορείου, υποσταθμός της Δ.Ε.Η., αποθήκες ΤΟΛ, φυλάκιο εισόδου-εξόδου, το διοικητήριο του Ο.Λ.Η. και το κτίριο των λιμενεργατών. Στο δεύτερο (γαλάζιο χρώμα) παρατηρείται επίσης ευρεία ποικιλία χρήσεων. Ειδικότερα, βρίσκεται

κτίριο του Ε.Κ.Α.Β., το κτίριο των ναυτοπροσκόπων, το αντλιοστάσιο του Ο.Λ.Η., δεξαμενές ύδρευσης μαζί με το κτίριο ελέγχου σωληνώσεων τους, θεατρικός σταθμός, σταθμός λεωφορείων, χώροι καταστημάτων, υγιεινής και γραφείων, υποσταθμός της Δ.Ε.Η., κτίριο που στεγάζει παλιρροιογράφο και το στέγαστρο των ψαράδων. Τέλος, στην προβλήτα έναντι του Ενετικού Κούλε (μωβ χρώμα), βρίσκεται το λιμεναρχείο του λιμανιού, κτίριο εγκαταστάσεων καυσίμων και καφέ/εστιατόριο.

Όσον αφορά το υλικό κατασκευής των κτιρίων, από το σύνολο τους, τα 45 είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα, τα 20 από χάλυβα, τα 4 από τοιχοποιία και 2 είναι προκατασκευασμένα (Σχήμα 3α). Επίσης, σχετικά με το επίπεδο των αντισεισμικών κανονισμών με βάση τους οποίους κατασκευάστηκαν, 34 από τα κτίρια είναι κατασκευασμένα μετά το 1995 (High Code), 18 την περίοδο 1985-95 (Moderate Code), 14 την περίοδο 1959-85 (Low Code) και 5 πριν το 1959 (Pre Code) (Σχήμα 3β).



Σχήμα 2: Δορυφορική εικόνα του λιμανιού του Ηρακλείου (Google Earth). Οι κατασκευές σημειώνονται με πινέζες.



Σχήμα 3: Κατηγοριοποίηση των κτιρίων ανάλογα με (α) το υλικό κατασκευής τους και (β) το επίπεδο κανονισμού της μελέτης

4 ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

Έχοντας συνθέσει το μοντέλο έκθεσης, αντιστοιχίζεται για κάθε κατασκευή και για κάθε επίπεδο βλάβης στο οποίο μπορεί να βρεθεί, μία καμπύλη σεισμικής τρωτότητας. Σε συμφωνία με το μοντέλο επικινδυνότητας, όλες οι καμπύλες λαμβάνονται συναρτήσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA). Οι καμπύλες τρωτότητας λαμβάνονται από το HAZUS. Συγκεκριμένα, το

εγχειρίδιο παρέχει την διάμεσο τιμή (median) και την λογαριθμοκανονική απόκλιση (standard deviation of the log data) μιας λογαριθμοκανονικής κατανομής (lognormal distribution), συναρτήσει του στατικού συστήματος, του ύψους, της εποχής κατασκευής, της χρήσης της εκάστοτε κατασκευής κ.α. Συνολικά, χρησιμοποιούνται 22 διαφορετικές καμπύλες (Πίνακας 1). Ο Πίνακας 2 καταγράφει τις τιμές της διαμέσου και της διασποράς των καμπυλών τρωτότητας, για όλα τα επίπεδα βλάβης.

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση των κατασκευών του λιμανιού του Ηρακλείου σύμφωνα με το HAZUS

Ταξινόμηση κατά HAZUS	Περιγραφή στατικού συστήματος / κτιρίου	Ύψος	Επίπεδο αντισεισμικού κανονισμού	Αριθμός κτιρίων
S1L – High	S1 - Πλαίσια παραλαβής ροπών από χάλυβα	Χαμηλό	Υψηλό	8
S1L – Moderate		Χαμηλό	Μεσαίο	1
S2L – High	S2 – Πλαίσια με συνδέσμους δυσκαμψίας από χάλυβα	Χαμηλό	Υψηλό	6
S2L – Low		Χαμηλό	Χαμηλό	1
S3 – Low	S3 - Ελαφρά χαλύβδινα πλαίσια	-	Χαμηλό	4
C1L – High	C1 - Πλαίσια παραλαβής ροπών από οπλισμένο σκυρόδεμα με ελαφρά χωρίσματα	Χαμηλό	Υψηλό	15
C1L – Moderate		Χαμηλό	Μεσαίο	12
C1L – Low		Χαμηλό	Χαμηλό	1
C2L – Low	C2 - Διατμητικά τοιχία από οπλισμένο σκυρόδεμα	Χαμηλό	Χαμηλό	1
C3L – Low	C3 - Πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα με τοιχοπλήρωση	Χαμηλό	Χαμηλό	5
C3M – Pre		Μεσαίο	Χωρίς	1
C3H – Pre		Πολύωροφο	Χωρίς	1
PC1 – Moderate	PC1 - Προκατασκευασμένα τοιχία από οπλισμένο σκυρόδεμα	-	Χωρίς	1
PC2L - Moderate	PC2 - Προκατασκευασμένα πλαίσια και διατμητικά τοιχία από οπλισμένο σκυρόδεμα	Χαμηλό	Μεσαίο	1
RM1L – High	RM1 - Φέρουσα οπλισμένη τοιχοποιία με ξύλινα ή μεταλλικά διαφράγματα	Χαμηλό	Υψηλό	1
URML – Low	URM - Φέρουσα άοπλη τοιχοποιία	Χαμηλό	Χαμηλό	1
URML – Pre		Χαμηλό	Χωρίς	2
MH – High	MH - Κατασκευές τύπου ISOBOX	-	Υψηλό	2
MH – Moderate		-	Μεσαίο	1
ESS2 – High	ESS - Ηλεκτρικός υποσταθμός χαμηλής τάσης με μη αγκυρωμένα υποσυστήματα	-	Υψηλό	2
ESS2 – Moderate		-	Μεσαίο	3
ESS2 – Low		-	Χαμηλό	1

Πίνακας 2: Διάμεσος και λογαριθμική απόκλιση καμπυλών τρωτότητας (λογαριθμοκανονικές κατανομές) για τις κατηγορίες των κατασκευών του λιμανιού του Ηρακλείου, σε όρους μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης - PGA

Ταξινόμηση κατά HAZUS	Ελαφρές ζημιές		Μέτριες ζημιές		Εκτεταμένες ζημιές		Πλήρης ζημιά	
	Διάμεσος [g]	Διασπορά	Διάμεσος [g]	Διασπορά	Διάμεσος [g]	Διασπορά	Διάμεσος [g]	Διασπορά
S1L – High	0,19	0,64	0,31	0,64	0,64	0,64	1,49	0,64
S1L – Mod.	0,15	0,64	0,22	0,64	0,42	0,64	0,80	0,64
S2L – High	0,24	0,64	0,41	0,64	0,76	0,64	1,46	0,64
S2L – Low	0,12	0,64	0,17	0,64	0,30	0,64	0,48	0,64
S3 – Low	0,15	0,64	0,26	0,64	0,54	0,64	1,00	0,64
C1L – High	0,21	0,64	0,35	0,64	0,70	0,64	1,37	0,64
C1L – Mod.	0,16	0,64	0,23	0,64	0,41	0,64	0,77	0,64
C1L – Low	0,12	0,64	0,15	0,64	0,27	0,64	0,45	0,64
C2L – Low	0,14	0,64	0,19	0,64	0,30	0,64	0,52	0,64
C3L – Low	0,12	0,64	0,17	0,64	0,26	0,64	0,44	0,64
C3M – Pre	0,09	0,64	0,14	0,64	0,25	0,64	0,41	0,64
C3H – Pre	0,08	0,64	0,13	0,64	0,27	0,64	0,43	0,64
PC1 – Mod.	0,18	0,64	0,24	0,64	0,44	0,64	0,71	0,64
PC2L – Mod.	0,18	0,64	0,25	0,64	0,40	0,64	0,74	0,64
RM1L – High	0,30	0,64	0,46	0,64	0,93	0,64	1,57	0,64
URML – Low	0,14	0,64	0,20	0,64	0,32	0,64	0,46	0,64
URML – Pre	0,13	0,64	0,17	0,64	0,26	0,64	0,37	0,64
MH – High	0,11	0,64	0,18	0,64	0,31	0,64	0,60	0,64
MH – Mod.	0,11	0,64	0,18	0,64	0,31	0,64	0,60	0,64
ESS2 – High	0,13	0,65	0,26	0,50	0,34	0,40	0,74	0,40
ESS2 – Mod.	0,13	0,65	0,26	0,50	0,34	0,40	0,74	0,40
ESS2 – Low	0,13	0,65	0,26	0,50	0,34	0,40	0,74	0,40

5 ΑΜΕΣΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Ως άμεσες απώλειες ενός σεισμικού γεγονότος, νοούνται κυρίως οι χρηματικές απώλειες αποκατάστασης των ζημιών, δηλαδή το κόστος επισκευής και ενδεχομένως και αντικατάστασης. Στο HAZUS ακολουθούνται δύο διαφορετικές μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των άμεσων απωλειών λόγω σεισμού.

Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται τα περισσότερα κτίρια. Εδώ δίνεται ο λόγος του κόστους επισκευής προς τη συνολική αξία αντικατάστασης, σε όρους δομικών και μη δομικών ζημιών, οι τελευταίες χωριστά λόγω παραμορφώσεων και λόγω επιταχύνσεων. Εν προκειμένω, για λόγους απλότητας λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δομικές βλάβες και γίνεται αναγωγή στο 100% της αξίας του δομικού συστήματος.

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν κατασκευές συστημάτων μεταφοράς (π.χ. αυτοκινητοδρόμων, σιδηροδρόμων, λιμένων, αεροδρομίων κ.α.) και κοινής ωφέλειας (π.χ. αποχετευτικά, πετρελαίον και φυσικού αερίου, ηλεκτρικής ενέργειας, τηλεπικοινωνιών κ.α.), όπου δίνεται μια «κεντρική»

εκτίμηση βλάβης, μαζί με ένα κάτω και ένα άνω όριο του λόγου του κόστους επισκευής προς τη συνολική αξία αντικατάστασης, χωρίς αυτά να διαχωρίζονται περαιτέρω σε κόσθη δομικών και μη-δομικών επισκευών. Στην περίπτωση του Λιμένα Ηρακλείου, περιλαμβάνονται οι κατηγορίες των λιμενικών αποθηκών και σταθμών, των ηλεκτρικών υποσταθμών, των δεξαμενών καυσίμων, των αντλιοστασίων και των δεξαμενών ύδατος.

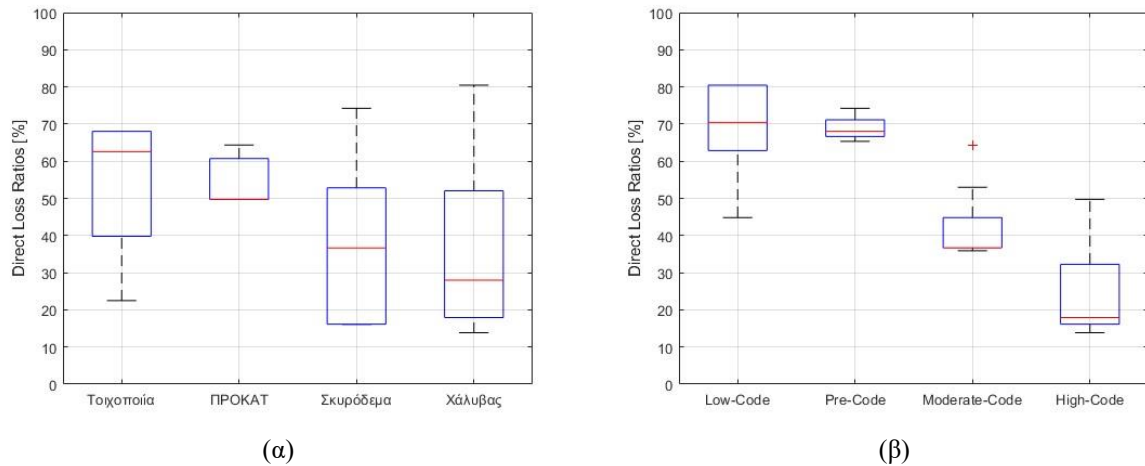
Για την εκτίμηση τις πιθανοτικής κατανομής των απωλειών, δεδομένης της σεισμικής έντασης, εκτελείται προσομοίωση Μόντε Κάρλο. Συγκεκριμένα, για κάθε κατασκευή γίνεται δειγματοληψία 100 εναλλακτικών σεναρίων βλάβης δεδομένων των καμπύλων τρωτότητας. Γνωρίζοντας πόσα από τα 100 κτίρια βρίσκονται σε κάθε επίπεδο βλάβης, αντιστοιχίζεται μία τιμή λόγου κόστους (ανάλογη του επιπέδου βλάβης) και υπολογίζεται ο μέσος όρος των 100 περιπτώσεων. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία για κάθε τιμή έντασης της μέγιστης επιτάχυνσης εδάφους, χαράσσεται η καμπύλη υπέρβασης κόστους (Loss Exceedance Curve), η οποία εκφράζει τη μέση ετήσια συχνότητα με την οποία υπερβαίνεται ένα επίπεδο απωλειών. Τέλος, ολοκληρώνοντας το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη υπέρβασης κόστους, υπολογίζονται οι μέσες ετήσιες απώλειες (average annual loss, AAL) που αναμένεται να έχει μια κατασκευή.

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

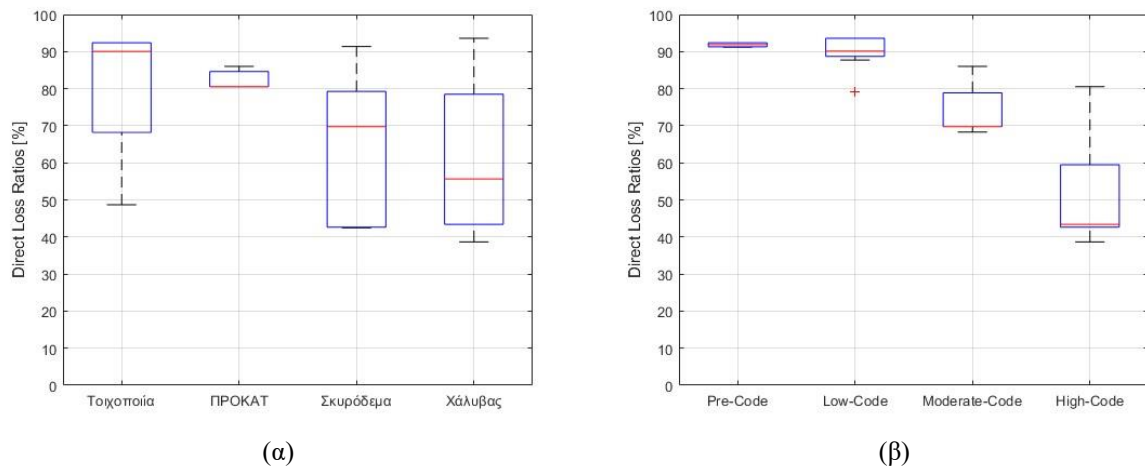
Ως παραδείγματα εφαρμογής, παρουσιάζονται δύο σενάρια. Το πρώτο για μέγιστη επιτάχυνση εδάφους ίση με 0,41g, η οποία έχει πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια, ενώ το δεύτερο για μέγιστη επιτάχυνση εδάφους ίση με 0,80g, η οποία έχει πιθανότητα υπέρβασης 2% στα 50 χρόνια (Σχήμα 1). Σημειώνεται ότι η επιτάχυνση σχεδιασμού για έδαφος B κατά το ελληνικό προσάρτημα του EC8, η οποία θεωρητικώς αντιστοιχεί στο επίπεδο 10% στα 50 χρόνια, είναι $1,20 \times 0,24g = 0,288g$, η οποία είναι αρκετά χαμηλότερη από την τιμή 0,41g που προκύπτει από το ESHM20. Αυτό είναι ένα θέμα το οποίο έχει προκαλέσει αρκετές συζητήσεις στα πλαίσια της επερχόμενης ανανέωσης του EC8 χωρίς ακόμα να έχει προκύψει σαφές συμπέρασμα. Για τις ανάγκες της ανάλυσής μας, θα προχωρήσουμε με τις προβλέψεις του ESHM20 χωρίς περαιτέρω σχολιασμό.

Στο Σχήμα 4α εμφανίζεται η κατανομή των άμεσων απωλειών για τα κτίρια κατηγοριοποιημένα κατά υλικό κατασκευής, ενώ στο Σχήμα 4β έχουμε κατηγοριοποίηση ανά επίπεδο κανονισμού (ή ισοδύναμα, εποχή μελέτης), όλα για το επίπεδο των 10% στα 50 χρόνια. Όπως γίνεται εμφανές, τα κτίρια τύπου ISOBOX και URM/RM είναι σαφώς τα πιο ευάλωτα, όπως και εκείνα τα οποία μελετήθηκαν με παλαιότερους ή καθόλου κανονισμούς. Τα αντίστοιχα γραφήματα για το επίπεδο έντασης 2% στα 50 χρόνια είναι στα Σχήματα 5α,β. Τα συμπεράσματα είναι αντίστοιχα και εδώ, με σαφώς αυξημένες ζημιές λόγω της υψηλότερης έντασης. Τέλος, στα Σχήματα 6α,β εμφανίζονται γραφήματα ανά υλικό και ανά κανονισμό, αντίστοιχα, για τις μέσες ετήσιες απώλειες. Η διαφορά εδώ είναι ότι λαμβάνονται υπόψη όλα τα πιθανά επίπεδα έντασης, σταθμισμένα με τη μέση συχνότητα εμφάνισής τους, όπως προκύπτει από την καμπύλη επικινδυνότητας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, λαμβάνεται υπόψη ότι το σενάριο 2%/50 μπορεί να προκαλεί μεγαλύτερες απώλειες από το 10%/50, όμως εξ ορισμού το πρώτο είναι $10 / 2 = 5$ φορές πιο σπάνιο από το τελευταίο. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν τιμές AAL της τάξεως του 0,2 έως 1,2% της αξίας της έκαστης κατασκευής, οι οποίες θεωρούνται σχετικά υψηλές με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία. Αυτό είναι ενδεικτικό της υψηλής σεισμικότητας της περιοχής αλλά και των μεγάλων αβεβαιοτήτων ως προς την ικανότητα των κτιρίων. Χωρίς λεπτομερέστερες

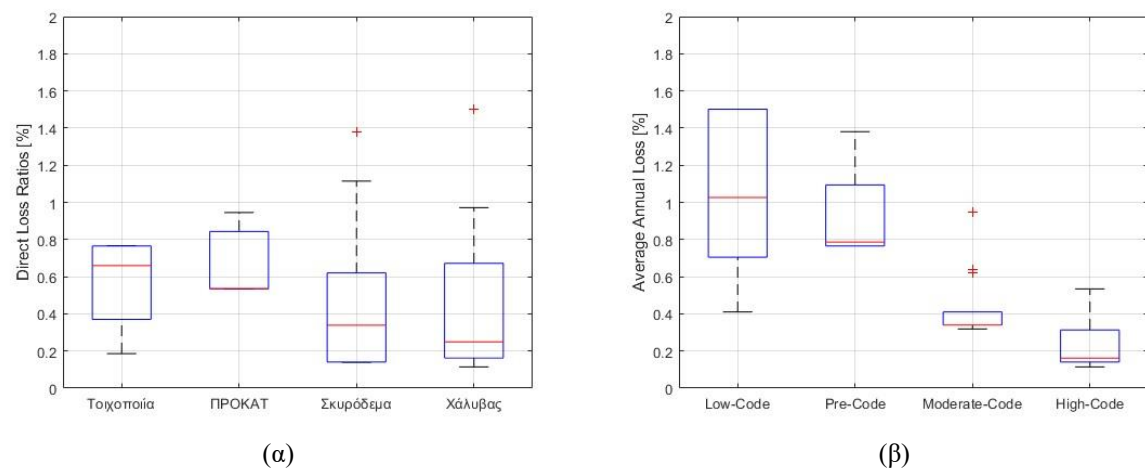
πληροφορίες είναι δύσκολο να μετριαστούν οι αβεβαιότητες και να επιτευχθούν μικρότερες τιμές AAL.



Σχήμα 4: Κατανομή των κανονικοποιημένων τιμών άμεσων απωλειών (α) ανά υλικό κατασκευής και (β) ανά επίπεδο κανονισμού για το επίπεδο έντασης 10% στα 50 χρόνια.



Σχήμα 5: Κατανομή των κανονικοποιημένων τιμών άμεσων απωλειών (α) ανά υλικό κατασκευής και (β) ανά επίπεδο κανονισμού για το επίπεδο έντασης 2% στα 50 χρόνια.



Σχήμα 6: Κατανομή των κανονικοποιημένων τιμών της μέσης ετήσιας άμεσης απώλειας (α) ανά υλικό κατασκευής και (β) ανά επίπεδο κανονισμού.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναπτύχθηκε ένα προσομοίωμα σεισμικής διακινδύνευσης για το λιμάνι του Ηρακλείου, το οποίο εκτιμά τις βλάβες και τις άμεσες οικονομικές απώλειες μετά από ένα καταστροφικό σεισμικό γεγονός. Το μοντέλο αυτό ακολουθεί την κλασική τριμερή προσέγγιση του μοντέλου έκθεσης - τρωτότητας - επικινδυνότητας. Η σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής υπολογίστηκε μέσω πιθανοτικής ανάλυσης κινδύνου με βάση το Ευρωπαϊκό Μοντέλο Σεισμικού Κινδύνου (ESHM20). Η κατηγοριοποίηση των υφιστάμενων κατασκευών έγινε με βάση την ταξινόμηση κατά HAZUS. Οι άμεσες απώλειες υπολογίστηκαν με την εκτέλεση προσομοίωσης Monte Carlo για την εκτίμηση της κατανομής των απωλειών, δεδομένης της σεισμικής έντασης.

Οι άμεσες χρηματικές απώλειες που εκτιμήθηκαν αφορούν το κόστος επισκευής ή αποκατάστασης των ζημιών. Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης, υπολογίζονται οι μέσες ετήσιες απώλειες που αναμένονται ανά κατηγορία κατασκευής. Αυτές είναι ενδεικτικές του κόστους ασφάλισης (ή και αυτασφάλισης) του διαχειριστή. Ωστόσο, πέραν αυτής της γενικότερης πληροφορίας, η ανάλυση έχει γίνει με τρόπο που παρέχεται η βάση για την ανάπτυξη επιχειρησιακών μοντέλων έμμεσων απωλειών σε μεταγενέστερο στάδιο.

8 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα για την Έρευνα και την Καινοτομία Horizon 2020, στο πλαίσιο του έργου OCEANIDS: “User-driven applications and tools for Climate-Informed Maritime Spatial Planning and integrated seascape management, towards a resilient & inclusive Blue Economy”, με Αριθμό Σύμβασης: 101112919.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Mitchell-Wallace K., Jones M., Hillier J., Foote M. Natural catastrophe risk management and modelling: A practitioner's guide. John Wiley & Sons, 2017.
2. FEMA. FEMA P-58: Seismic Performance Assessment of Buildings. Federal Emergency Management Agency, 2012.
3. FEMA. HAZUS-MH 2.1: Technical manual. Federal Emergency Management Agency, 2012.
4. EERI. Loma Prieta Earthquake October 17, 1989, PRELIMINARY RECONNAISSANCE REPORT, Earthquake Engineering Research Institute, 1989.
https://www.eeri.org/lfe/pdf/USA_CA_LomaPrieta_PrelimReport.pdf
5. Chang SE. Disasters and transport systems: loss, recovery and competition at the Port of Kobe after the 1995 earthquake. *Journal of transport geography* 2000; 8(1): 53-65.
6. ΟΑΣΠ. Κεφαλονιά 2014, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού & Προστασίας, 2014.
<https://oasp.gr/node/7149>
7. ΟΑΣΠ. Κως 2017, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού & Προστασίας, 2017.
<https://oasp.gr/node/7151>
8. Fotopoulou S, Karafagka S, Karatzetou A, Pitilakis K. System-Wide Seismic Risk Assessment of Port Facilities; Application to the Port of Thessaloniki, Greece. *Sustainability* 2022; 14(3): 1424.
9. Pachakis D, Kiremidjian AS. Ship traffic modeling methodology for ports. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 2003; 129(5): 193-202.
10. Pachakis D, Kiremidjian AS. Estimation of downtime-related revenue losses in seaports following scenario earthquakes. *Earthquake Spectra* 2004; 20(2): 427-449.
11. Μαλαβάζος Στεκιέρκα ΑΑ, Ποάλας ΑΑ, Τσαρπαλής Δ, Χατζηδάκη Α, Λαχανάς Χ, Μελισσιανός Β, Βαμβάτσικος Δ. Σεισμική αναταξινόμηση και προσομοίωμα λειτουργίας του ποτάμιου λιμένα του Γκαλάτσι στη Ρουμανία, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, 2025.
12. OCEANIDS. User-driven applications and tools for Climate-Informed Maritime Spatial Planning and integrated seascape management, towards a resilient & inclusive Blue Economy. European Commission –

- European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency, 2023. <https://www.oceanids-project.eu>
13. Karaferis ND, Melissianos VE, Bakalis K, Kazantzi AK, Vamvatsikos D. Seismic risk assessment of a crude oil refinery testbed: alternative fragility approaches. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 2025; 124: 105495. DOI: 10.1016/j.ijdr.2025.105495.
 14. Grajales-Ortiz C, Melissianos VE, Bakalis K, Kohrangi M, Bazzurro P, Vamvatsikos D. Seismic damage assessment of a crude oil hydrodesulphurisation unit. Part II: hazard-consistent fragility assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 2025; 124: 105520. DOI: 10.1016/j.ijdr.2025.105520.
 15. Crowley H, Dabbeek J, Despotaki V, Rodrigues D, Martins L, Silva V, Romão X, Pereira N, Weatherill G, Danciu L. European Seismic Risk Model (ESRM20). EFEHR Technical Report 002 V1.0.0, 2021. <https://doi.org/10.7414/EUC-EFEHR-TR002-ESRM20>
 16. EN 1998-1, (2004), «Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance—Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings», Brussels, <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-8-design-structureearthquake-resistance>