



D 6.2

V1 pilot area digital twin

Πρώτη έκδοση του ψηφιακού διδύμου της
πιλοτικής περιοχής

Project name

TwinCity: Climate-Aware Risk and Resilience Assessment of Urban Areas under
Multiple Environmental Stressors via Multi-Tiered Digital City Twinning.

Hellenic Foundation for Research and Innovation (H.F.R.I.) | Grant Agreement 2515
2nd Call for H.F.R.I. Research Projects to support Faculty Members & Researchers

Dissemination level	Public (PU) - Fully open
Type of deliverable	DEM - Demonstrator, pilot, prototype
Work package	WP6 – Sensor data integration & digital twinning
Deliverable number	D6.2 V1 pilot area digital twin
Status - version, date	Final – V1.0
Deliverable leader	E. Karaferi
Contractual date of delivery	31/01/2025

Ποιοτικός έλεγχος

	Name	Organisation	Date
Peer review 1	Δ. Βαμβάτσικος	ΕΜΠ	16/10/2024
Peer review 2	Β. Μελισσιανός	ΕΜΠ	29/11/2024

Ιστορικό παραδοτέου

Version	Date	Author	Summary of changes
0.1	04/10/2024	Ε. Καραφέρη	Πρώτο προσχέδιο εγγράφου
1.0	21/12/2024	Ε. Καραφέρη	Τελική έκδοση (V1.0) εγγράφου

Νομική διακήρυξη

Η παρούσα εργασία είναι χρηματοδοτούμενη από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ, Grant Agreement 2515). Οι απόψεις και οι πληροφορίες που παρουσιάζονται στο παρόν έγγραφο δεν αντικατοπτρίζουν τις απόψεις του ΕΛΙΔΕΚ και εκφράζουν μόνο τους συγγραφείς. Το ΕΛΙΔΕΚ δεν φέρει καμία νομική ή άλλη ευθύνη για τα περιεχόμενα του παρόντος εγγράφου. Οι πληροφορίες σε αυτό το έγγραφο παρέχονται "ως έχουν", και η ερμηνεία τους επαφίεται στον αναγνώστη. Οι συμπράττοντες τω έργω δεν φέρουν καμία ευθύνη για ζημίες οποιουδήποτε είδους, συμπεριλαμβανομένων έμμεσων ή άλλων ζημιών που μπορεί να προκύψουν από τη χρήση του υλικού που παρουσιάζεται.

Copyright © TwinCity Consortium, 2024.

Περιεχόμενα

Ποιοτικός έλεγχος	2
Ιστορικό παραδοτέου.....	2
Νομική διακήρυξη.....	2
Κατάλογος σχημάτων.....	4
Κατάλογος πινάκων	4
Κατάλογος συντομογραφιών και ακρωνύμιων	5
Σύνοψη	6
1 Εισαγωγή	7
1.1 Γενικές πληροφορίες.....	7
1.2 Σκοπός του παραδοτέου	7
1.3 Στοχευόμενο κοινό	7
1.4 Χρήσιμοι ορισμοί	8
1.5 Εννοιολογικό Πλαίσιο του Ψηφιακού Διδύμου Κοινότητας (CDT).....	8
2 Επίδειξη του CDT V1 στην πόλη της Ρόδου: Σενάριο Σεισμικού Κινδύνου 8	
2.1 Επιλογή σεισμικού σεναρίου – Σεισμική Επικινδυνότητα.....	9
2.2 Βλάβες στο κτηριακό απόθεμα.....	13
2.3 Βλάβες στις υποδομές – Δίκτυο Ύδρευσης	15
2.4 Οικονομικές Απώλειες	16
2.5 Μακροπρόθεσμες επιπτώσεις	18
3 Συμπεράσματα	20
4 Βιβλιογραφία	20

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Αποτελέσματα API για σεισμούς κοντά στην πόλη της Ρόδου για μέγιστη απόσταση 50 km, ελάχιστο μέγεθος 3 Ρίχτερ και μέγιστο μέγεθος 6 ρίχτερ	10
Σχήμα 2: Παράμετροι για φιλτράρισμα σεισμικών γεγονότων.....	10
Σχήμα 3: Ενδεικτικά φιλτραρισμένα σεισμικά γεγονότα.	10
Σχήμα 4: Στιγμιότυπο οθόνης από ειδησεογραφικό ιστότοπο . (https://www.seismos.gr/seismos/rodos/448841).....	11
Σχήμα 5: Στιγμιότυπο οθόνης από τα αποτελέσματα του λογισμικού σε περιβάλλον GIS.	11
Σχήμα 6: Πεδία εδαφικής κίνησης για τα εντατικά μεγέθη: (α) μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration, PGA), (β) Μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity, PGV)	12
Σχήμα 7: Πεδία εδαφικής κίνησης για τα εντατικά μεγέθη: (α) Φασματική επιτάχυνση για περίοδο 0.5s (Spectral Acceleration at 0.5 seconds, SA(0.5s)), (β) Φασματική επιτάχυνση για περίοδο 1.0s (Spectral Acceleration at 1.0 seconds, SA(1.0s)).	12
Σχήμα 8: Χωρική κατανομή των κτηρίων υπό κατάρρευση για την πόλη της Ρόδου. RCW: Τοιχώματα Οπλισμένου Σκυροδέματος	14
Σχήμα 9: Χωρική κατανομή των κτηρίων από μη ενισχυμένη τοιχοποιία για την πόλη της Ρόδου (α) με ελαφριές ζημιές (DS1) και (β) σε κατάρρευση (DS4). URM: Άοπλη Τοιχοποιία	14
Σχήμα 10: Αριθμός κτηρίων ανά κατάσταση ζημίας και τυπολογία- είδος κτηρίου. WRF: Ξύλινο Κτήριο, SRF: Κτήριο από Χάλυβα, RM: Ενισχυμένη Τοιχοποιία, URM: Άοπλη Τοιχοποιία, RCW: Τοιχώματα Οπλισμένου Σκυροδέματος, RCF: Πλαίσια Οπλισμένου Σκυροδέματος	15
Σχήμα 11: Εκτιμώμενου ποσοστό σωλήνων που δεν παρέχουν νερό σε οικοδομικά τετράγωνα μετά από το σεισμικό συμβάν.....	15
Σχήμα 12: Θέση επικέντρου σεισμικού γεγονότος μεγέθους 6.1 της κλίμακας Ρίχτερ.....	16
Σχήμα 13: Ποσοστό κτηρίων ανά κατάσταση ζημίας και τυπολογία- είδος κτηρίου.....	17
Σχήμα 14: Άμεσες οικονομικές απώλειες ανά επιχειρηματική δραστηριότητα για σεισμό.	17
Σχήμα 15: Έμμεσες οικονομικές απώλειες ανά επιχειρηματική δραστηριότητα για σεισμό.....	17
Σχήμα 16: Άμεσες μέσες ετήσιες οικονομικές απώλειες για τον σεισμό.	18
Σχήμα 17: Μέσο ετήσιο ποσοστό πληθυσμού με κίνδυνο μη πρόσβασης σε καθαρό νερό.	19
Σχήμα 18: Άμεσες και έμμεσες μέσες ετήσιες οικονομικές απώλειες για τον σεισμό.....	19
Σχήμα 19: Έμμεσες μέσες ετήσιες οικονομικές απώλειες για τον σεισμό ανά επιχειρηματική δραστηριότητα.	19
Σχήμα 20: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για πιθανότητα 2% στα 50 χρόνια (αριστερά) και 10% στα 50 χρόνια (δεξιά).....	20

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Επιλεγμένο σεισμικό συμβάν.	13
Πίνακας 2: Επιλεγμένο σεισμικό συμβάν για παρουσίαση απωλειών.	16

Κατάλογος συντομογραφιών και ακρωνύμιων

Συντομογραφία	Ολογράφως
CDT	City Digital Twin
WP	Πακέτα Εργασίας (Work Package)
GIS	Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems)
GMF	Πεδίο Κίνησης Εδάφους (Ground Motion Field)
PGA	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration)
PGV	Μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity)
SA(0.5s)	Φασματική επιτάχυνση για περίοδο 0.5s (Spectral Acceleration at 0.5 seconds)
SA(1.0s)	Φασματική επιτάχυνση για περίοδο 1.0s (Spectral Acceleration at 1.0 second)
DS	Επίπεδο βλάβης (Damage State)

Σύνοψη

Το παραδοτέο D6.2 «V1 pilot area digital twin» περιλαμβάνει την πρώτη λειτουργική έκδοση (V1) του Ψηφιακού Διδύμου Κοινότητας (City Digital Twin, CDT) για την πιλοτική περιοχή μελέτης, συγκεκριμένα την πόλη της Ρόδου, όπως αυτή αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Πακέτου Εργασίας 6 (WP6). Στο παραδοτέο αυτό παρουσιάζονται οι δυνατότητες του λογισμικού ως ένα δυναμικό μοντέλο, που είναι ικανό για ενημέρωση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Επιδεικνύεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης δεδομένων από πολλαπλές πηγές (όπως με λήψη σεισμικών δεδομένων από ιστοτόπους όπως αναφέρθηκε στο παραδοτέο D6.1) και η χρήση προϋπολογισμένων αποτελεσμάτων για την εκτίμηση των απωλειών στην πόλη σε κτηριακό επίπεδο και σε επίπεδο υποδομών. Το παρόν παραδοτέο επικεντρώνεται στις επιπτώσεις του σεισμού στη περιοχή μελέτης.

Αρχικά, στο λογισμικό έχουν προστεθεί όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου και τα προϋπολογισμένα σενάρια, βάση πιθανοτικών μοντέλων. Μετά την αρχική επεξεργασία των δεδομένων (Task 6.1 & 6.2), το λογισμικό προσομοιώνει την απόκριση της αστικής περιοχής σε ένα υποθετικό σεισμικό συμβάν. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων λαμβάνει υπόψη τις εγγενείς αβεβαιότητες, παρέχοντας μια σειρά πιθανών σεναρίων ενώ ενσωματώνει και τη δυνατότητα αυτο-βελτίωσης μέσω ανατροφοδότησης από τον χρήστη νέων δεδομένων. Ενδεικτικά, η ανατροφοδότηση αυτή μπορεί να είναι για την συμπερίληψη:

- (α) πιο αναλυτικών και σύγχρονων σεισμικών μοντέλων, που περιλαμβάνουν τα νεότερα δεδομένα για τη σεισμογενή ρήγματα, βελτιωμένα μοντέλα εδαφικής κίνησης κλπ.,
- (β) πιο αντιπροσωπευτικών καμπύλων τρωτότητας για τις υποδομές με βάση νεότερες πληροφορίες,
- (γ) καμπύλες απωλειών που έχουν υπολογιστεί για την συγκεκριμένη τοποθεσία έναντι καμπυλών βάσει π.χ. ευρωπαϊκών μοντέλων,
- (δ) πιο επικυρωμένα στοιχεία σχετικά με τα κτήρια και τις υποδομές τις πόλεις (συμπερίληψη νεόκτιστων κτηρίων ή νέα έργα υποδομής).

Η δυνατότητα αυτής της ανατροφοδότησης προσδίδει τον προαναφερόμενο δυναμικό χαρακτήρα του λογισμικού και αποδεικνύει την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του και στο μέλλον με τις κατάλληλες προσθήκες ώστε να είναι επικαιροποιημένος.

Το κεντρικό μέρος του παραδοτέου επικεντρώνεται σε μια ολοκληρωμένη επίδειξη της λειτουργικότητας του CDT V1, η οποία παρουσιάζεται μέσω σεναρίου σεισμικού κινδύνου στην πιλοτική περιοχή. Η επίδειξη περιλαμβάνει την αναλυτική παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων που παράγει το μοντέλο, όπως χάρτες επικινδυνότητας, εκτιμήσεις βλαβών για το γενικό κτιριακό απόθεμα και το δίκτυο ύδρευσης, και εκτιμήσεις των άμεσων και έμμεσων οικονομικών απωλειών. Τα αποτελέσματα αυτά τεκμηριώνουν την ετοιμότητα του CDT V1 ως βάση για την περαιτέρω αναβάθμιση του λογισμικού στο επόμενο Πακέτο Εργασίας (WP7) στο οποίο θα γίνει προσθήκη και των καιρικών επιπτώσεων λόγω κλιματικής αλλαγής.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικές πληροφορίες

Το ερευνητικό πρόγραμμα TwinCity έχει ως στόχο να αξιοποιήσει υπάρχοντα εργαλεία και υπηρεσίες (π.χ. κλιματικά μοντέλα, μοντελοποίηση ακραίων γεγονότων και των επιπτώσεών τους κ.λπ.) και να αναπτύξει νέες τεχνολογίες (Layered-Block Models, City Digital Twins) για να προσφέρει μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα για την αξιολόγηση της κοινωνικοοικονομικής ανθεκτικότητας, που λαμβάνει υπόψη πολλαπλούς κινδύνους, την καλύτερη προετοιμασία, την ταχύτερη και αποτελεσματικότερη απόκριση και τη βιώσιμη ανασυγκρότηση αστικών περιοχών. Το TwinCity προσφέρει ένα ισχυρό εργαλείο που προσδιορίζει τα τοπικά κοινωνικοοικονομικά και επιχειρηματικά συστήματα για την προσομοίωση πολλαπλών πιθανών σεναρίων διακοπής λειτουργίας των επιχειρήσεων, αξιοποιώντας τις πληροφορίες που προσέφερε η καραντίνα εξαιτίας του COVID-19 ως προς τη διακοπή λειτουργίας και της ανάκαμψης των επιχειρήσεων. Ο τελικός στόχος είναι να προσφερθεί μια πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα βάσει του οποίου οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να αξιολογήσουν την συμπεριφορά, τον κίνδυνο και την ανθεκτικότητα μια μεγάλης κλίμακας πιλοτικής μελέτης μιας νησιωτικής ελληνικής πόλης που υπόκειται σε σεισμούς και καιρικούς/κλιματικούς κινδύνους.

1.2 Σκοπός του παραδοτέου

Το παραδοτέο D6.2 «V1 pilot area digital twin» είναι η παράδοση της πρώτης (V1) λειτουργικής έκδοσης του Ψηφιακού Διδύμου Κοινότητας (City Digital Twin, CDT). Αυτή η έκδοση έχει σκοπό την επίδειξη (DEM) των δυνατοτήτων του λογισμικού και τον έλεγχο της λειτουργικότητας του ως προς την εκτίμηση των απωλειών μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Σηματοδοτεί δε την ολοκλήρωση της ενσωμάτωσης όλων των δεδομένων από τα προηγούμενα πακέτα εργασίας (WP) σε ένα ενιαίο λογισμικό. Η κύρια λειτουργία του είναι να επιδείξει την αρχιτεκτονική και την ικανότητα του συστήματος να παράγει ολιστικές αποτιμήσεις της σεισμικής επικινδυνότητας, όπως παρουσιάζονται μέσω του σεναρίου σεισμικού κινδύνου.

Στο στάδιο αυτό, του παραδοτέου D6.2, έχει επιτευχθεί η ολοκλήρωση της φάσης ανάπτυξης της βασικής λειτουργικότητας του μοντέλου αλλά είναι ακόμα η πρώτη έκδοση του. Αναφερόμαστε σε πρώτη έκδοση καθώς το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί, αλλά προς το παρόν έχει προστεθεί μόνο η σεισμική επικινδυνότητα για την πόλη, με τις σχετικές οικονομικές απώλειες, ενώ η καιρική επικινδυνότητα θα προστεθεί στο επόμενο Πακέτο Εργασίας 7 (WP7). Συνεπώς, η παρούσα έκθεση τεκμηριώνει την ολοκλήρωση ενός κρίσιμου ορόσημου: τη δημιουργία ενός λειτουργικού πρωτοτύπου που αποτελεί την αδιαμφισβήτητη βάση για τις μελλοντικές βελτιώσεις του έργου.

1.3 Στοχευόμενο κοινό

Το έγγραφο D6.2 είναι ένα δημόσιο έγγραφο και θα είναι προσβάσιμο από όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς, και συμμετέχοντες στο πρόγραμμα TwinCity. Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον για ερευνητές και υπηρεσίες που εμπλέκονται στην εκτίμηση διακινδύνευσης κατασκευών ή και ολόκληρων περιοχών. Οι μεθοδολογίες που παρουσιάζονται μπορούν μάλιστα να βοηθήσουν και σε

τυχόν εκπαιδευτικούς σκοπούς που αφορούν σε νέους επιστήμονες που ενδιαφέρονται για τις εν λόγω θεματικές.

1.4 Χρήσιμοι ορισμοί

Κίνδυνος: Απειλή που μπορεί να επηρεάσει τις δραστηριότητες των ανθρώπων καθώς και την ακεραιότητα/λειτουργικότητα των κατασκευών, όπως για παράδειγμα μια σεισμική δόνηση ή η δράση του ανέμου εξαιτίας μιας καταιγίδας.

Μέτρο έντασης: Μεταβλητή «διεπαφής» που συνδέει την ανάλυση επικινδυνότητας και τη δομική ανάλυση.

Καμπύλη τρωτότητας: Καμπύλη που παρέχει την πιθανότητα μια κατασκευή να υπερβεί μια δεδομένη οριακή κατάσταση βλάβης (Limit State - LS) ή ισοδύναμα να βρίσκεται σε μια κατάσταση βλάβης (Damage State - DS) δεδομένης της τιμής του μέτρου έντασης.

Καμπύλη απωλειών: Καμπύλη που αντιστοιχεί στην κατανομή που ακολουθεί η παράμετρος που χρησιμοποιείται για την μέτρηση των απωλειών δεδομένης της τιμής του μέτρου έντασης.

Μοντέλο έκθεσης: Περιέχει χρήσιμες πληροφορίες για τις κατασκευές που διατρέχουν κίνδυνο, τη θέση τους, την ταξινόμηση τους κ.λπ.

1.5 Εννοιολογικό Πλαίσιο του Ψηφιακού Διδύμου Κοινότητας (CDT)

Η πρώτη έκδοση (V1) του Ψηφιακού Διδύμου Κοινότητας (CDT) είναι ένα δυναμικό σύστημα που έχει σχεδιαστεί για να συνδέει εξωτερικές εισροές δεδομένων με προ-υπολογισμένα σενάρια σεισμού με τις αντίστοιχες απώλειες. Η αρχιτεκτονική του CDT βασίζεται σε τρεις διακριτούς αλλά αλληλένδετους πυλώνες:

- Ενσωμάτωση δεδομένων από διαδικτυακές πηγές (Task 6.1): Υπεύθυνο για τη συλλογή δεδομένων επικινδυνότητας πχ. μετεωρολογικά δεδομένα και σεισμοί.
- Υποκατάστατα μοντέλα (Task 6.2): Περιλαμβάνει μοντελοποίηση για την επίλυση του προβλήματος των ελλিপών δεδομένων.
- Ψηφιακό Δίδυμο αστικής περιοχής (Task 6.3): Δημιουργία δυναμικού ψηφιακού αντιγράφου όλων των υποδομών και των συστημάτων της πόλης.

2 Επίδειξη του CDT V1 στην πόλη της Ρόδου: Σενάριο Σεισμικού Κινδύνου

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει την πλήρη λειτουργική ροή του CDT V1 μέσω ενός λεπτομερούς σεναρίου σεισμικού κινδύνου. Η επίδειξη έχει ως στόχο να παρουσιάσει την ολοκληρωμένη ικανότητα του μοντέλου να εκτιμά ολιστικά τον αντίκτυπο ενός καταστροφικού συμβάντος στην πόλη, χρησιμοποιώντας τα προ-υπολογισμένα αποτελέσματα από το λογισμικό.

2.1 Επιλογή σεισμικού σεναρίου – Σεισμική Επικινδυνότητα

Η διαδικασία προσομοίωσης γίνεται βάση συγκεκριμένου σεισμικού συμβάντος. Επιλέγεται από τον χρήστη ένα πιθανό σεισμικό σενάριο. Ο κώδικας του CDT χρησιμοποιεί τα δεδομένα του υποτιθέμενου συμβάντος (όπως οι γεωγραφικές συντεταγμένες, και το εκτιμώμενο μέγεθος του σεισμού) για να αναγνωρίσει αντίστοιχες σεισμικές πηγές και ρήγματα. Αφού βρεθεί το σχετικό σεισμικό συμβάν τροφοδοτείται το λογισμικό με τα κατάλληλα στοιχεία ώστε να αντιστοιχηθεί με το κατάλληλο προ-υπολογισμένο σενάριο.

Η προσομοίωση του σεισμικού κινδύνου στο CDT V1 μπορεί να γίνει με τέσσερις τρόπους.

- Σε πραγματικό χρόνο: Εάν εκδηλωθεί ένας νέος σεισμός, το σύστημα, μέσω των API συνδέσεων (hooks) που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του D6.1, είναι ικανό να κατεβάσει άμεσα τα χαρακτηριστικά του (επίκεντρο, μέγεθος) και να επιλεγεί το κατάλληλο σενάριο.
- Ιστορικό σενάριο: Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ένα σεισμό που συνέβη στο παρελθόν, είτε με δεδομένα μέσω του API, βάζοντας τις κατάλληλες ημερομηνίες, είτε από άλλη πηγή.
- Υποθετικό σενάριο: Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ένα συγκεκριμένο σενάριο για να προσομοιώσει μια υποθετική κατάσταση με βάση συγκεκριμένα κριτήρια επιλογής του.
- Μακροπρόθεσμη εκτίμηση επιπτώσεων: Ο χρήστης μπορεί να δει τις επιπτώσεις όχι ενός μεμονωμένου σεισμικού γεγονότος αλλά τις επιπτώσεις του σεισμού γενικότερα στην πόλη σε βάθος χρόνου.

Για την επίδειξη της δυνατότητας φιλτραρίσματος ιστορικών γεγονότων, χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία API αναζήτησης σε βάση δεδομένων με συγκεκριμένα κριτήρια. Παρουσιάζεται το παράδειγμα αναζήτησης σεισμών που συνέβησαν σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (π.χ., από 01/01/2024 έως 04/10/2024), με μέγεθος ροπής μεταξύ 3.0 και 6.0 στην κλίμακα Ρίχτερ, και σε απόσταση έως 50 χιλιόμετρα από τις προεπιλεγμένες συντεταγμένες στο κέντρο της πόλης. Από την αναζήτηση αυτή προέκυψαν 4 σεισμικά γεγονότα κοντά στην Ρόδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Με βάση αυτά τα δεδομένα είναι δυνατόν να διαλέξουμε σε ένα json αρχείο του λογισμικού τις αντίστοιχες επιθυμητές παραμέτρους που θέλουμε, και με τη λειτουργία φιλτραρίσματος (Σχήμα 2) του λογισμικού να δούμε ποια είναι τα πιθανά σενάρια που καλύπτουν τις αντίστοιχες παραμέτρους. Από το λογισμικό παράγεται ένα αρχείο τύπου txt με όλα τα πιθανά σενάρια που ικανοποιούν τις παραμέτρους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Από την λίστα των πραγματικών σεισμών (Σχήμα 1) επιλέγεται το μεγαλύτερο πραγματικό ιστορικό σεισμικό συμβάν της περιόδου που εξετάζεται, με μέγεθος 4.7 στην κλίμακα Ρίχτερ, (<https://www.kerkyrasimera.gr/>) και συγκρίνεται με τα σενάρια που παράχθηκαν πιθανοτικά (Σχήμα 3). Ο Πίνακας 1 δείχνει το πιθανοτικά παραγόμενο σενάριο που αντιστοιχεί στον πραγματικό σεισμό αυτό. Στο Σχήμα 4 φαίνεται από ειδησεογραφικός ιστότοπο ο εν λόγω σεισμός και στο Σχήμα 5 τα αποτελέσματα του λογισμικού σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών, Geographic Information Systems (GIS). Για το σεισμικό αυτό γεγονός παρουσιάζονται τα πεδία κίνησης εδάφους (ground motion field, GMF) για διάφορα εντατικά μεγέθη (Σχήμα 6, Σχήμα 7).

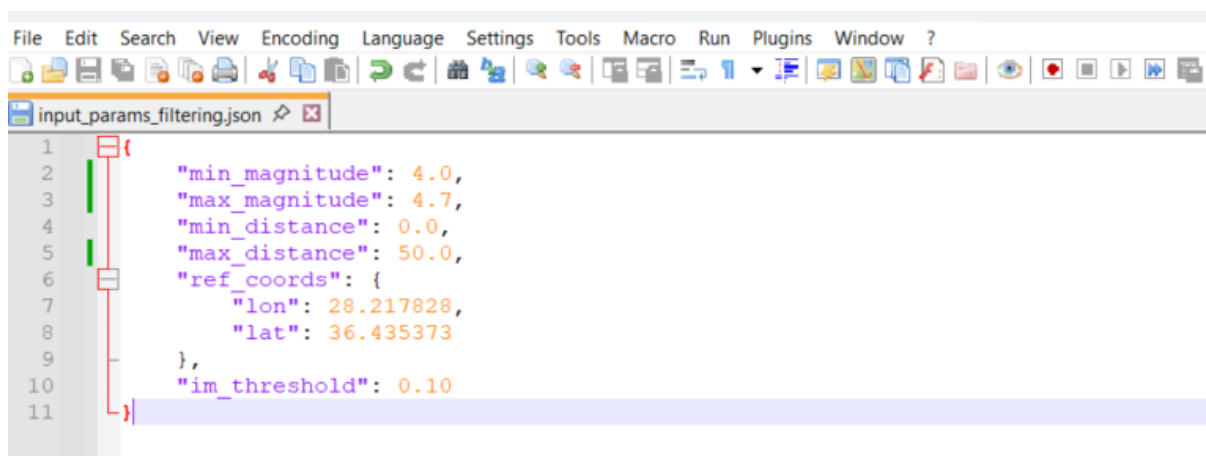
```
>>> structured_earthquake_data["earthquakes"][0]
{'place': '11 km ESE of Archángelos, Greece', 'magnitude': 4, 'time': '2024-07-25 23:59:35', 'coordinates': {'latitude': 36.1746, 'longitude': 28.231}}

>>> structured_earthquake_data["earthquakes"][1]
{'place': '16 km SSW of İcmeler, Turkey', 'magnitude': 4.5, 'time': '2024-07-09 09:11:51', 'coordinates': {'latitude': 36.6658, 'longitude': 28.1421}}

>>> structured_earthquake_data["earthquakes"][2]
{'place': '13 km E of Ródos, Greece', 'magnitude': 4.7, 'time': '2024-03-08 04:27:12', 'coordinates': {'latitude': 36.4248, 'longitude': 28.3727}}

>>> structured_earthquake_data["earthquakes"][3]
{'place': '37 km ESE of Ródos, Greece', 'magnitude': 4.1, 'time': '2024-02-08 23:56:55', 'coordinates': {'latitude': 36.334, 'longitude': 28.6225}}
```

Σχήμα 1: Αποτελέσματα API για σεισμούς κοντά στην πόλη της Ρόδου για μέγιστη απόσταση 50 km, ελάχιστο μέγεθος ροπής 3 και μέγιστο μέγεθος ροπής 6 στην κλίμακα Ρίχτερ.



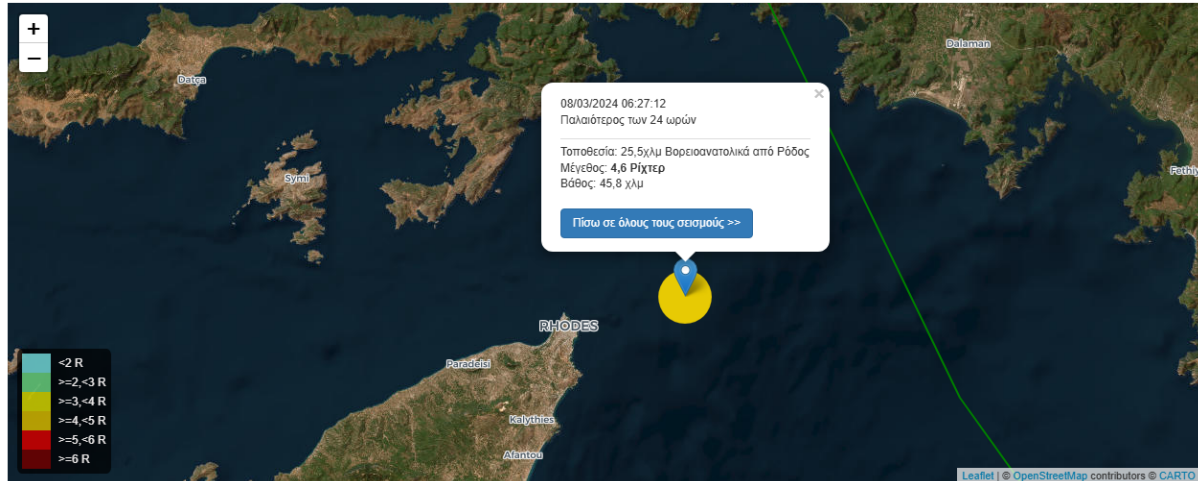
Σχήμα 2: Παράμετροι για φιλτράρισμα σεισμικών γεγονότων.

Event	Magnitude	Longitude	Latitude	Depth
421.0	4.7	28.538559	36.38174	23.75
2429.0	4.7	28.39268	36.353336	37.8125
113613.0	4.7	28.260258	36.621334	13.2
113648.0	4.7	28.147684	36.531403	13.2
113658.0	4.7	28.259605	36.531403	13.2
113660.0	4.7	28.259605	36.531403	13.2
113691.0	4.7	28.035374	36.44147	13.2
113702.0	4.7	28.147165	36.44147	13.2
113708.0	4.7	28.258957	36.44147	13.2
113710.0	4.7	28.258957	36.44147	13.2
113717.0	4.7	28.370749	36.44147	13.2
113752.0	4.7	28.146648	36.35154	13.2
113753.0	4.7	28.146648	36.35154	13.2
113754.0	4.7	28.146648	36.35154	13.2
113756.0	4.7	28.146648	36.35154	13.2
113765.0	4.7	28.25831	36.35154	13.2
113775.0	4.7	28.369972	36.35154	13.2

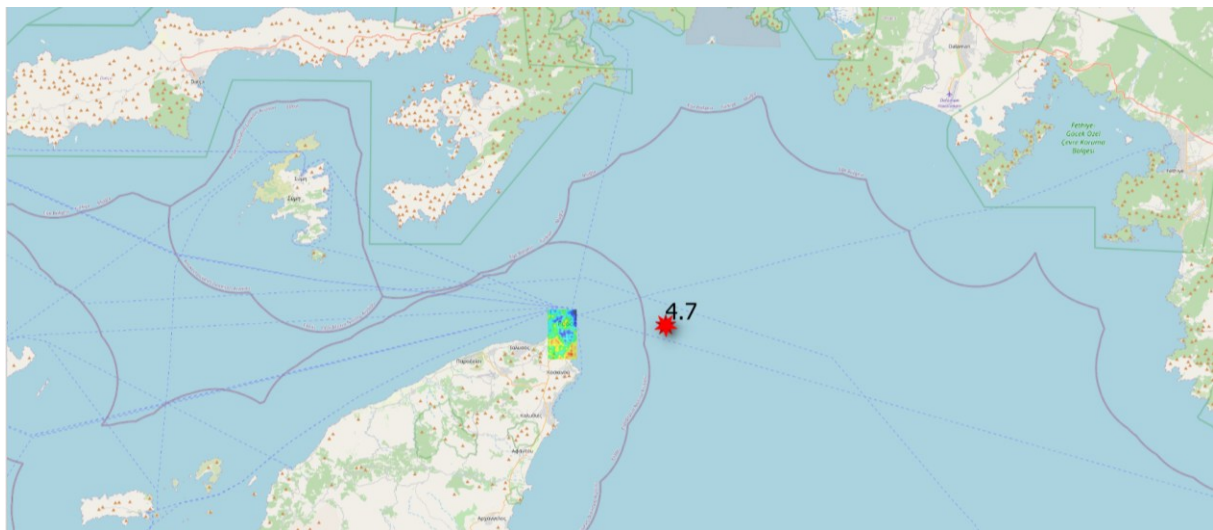
Σχήμα 3: Ενδεικτικά φιλτραρισμένα σεισμικά γεγονότα.

Σεισμός 4,6 Ρίχτερ 25,5χλμ Βορειοανατολικά από Ρόδο στις 08/03/2024 06:27:12

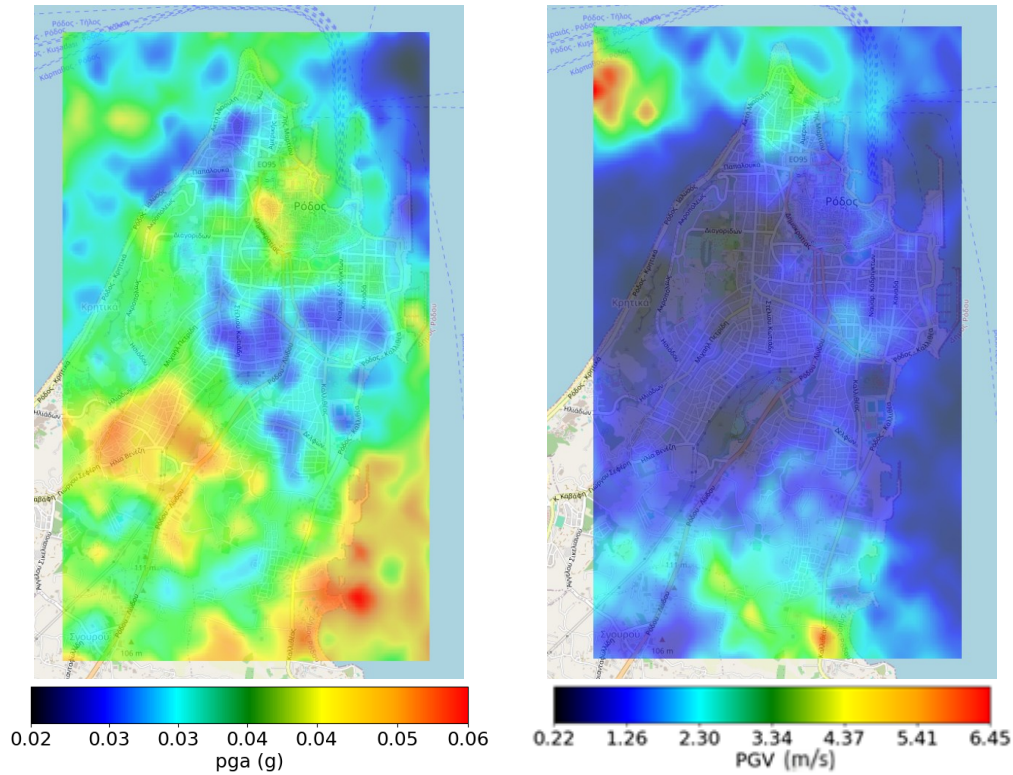
Ισχυρή σεισμική δόνηση 4,6 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ συνέβη στις 08/03/2024 06:27:12, 25,5χλμ Βορειοανατολικά από Ρόδο και σε εστιακό βάθος 45,8 χιλιομέτρων.



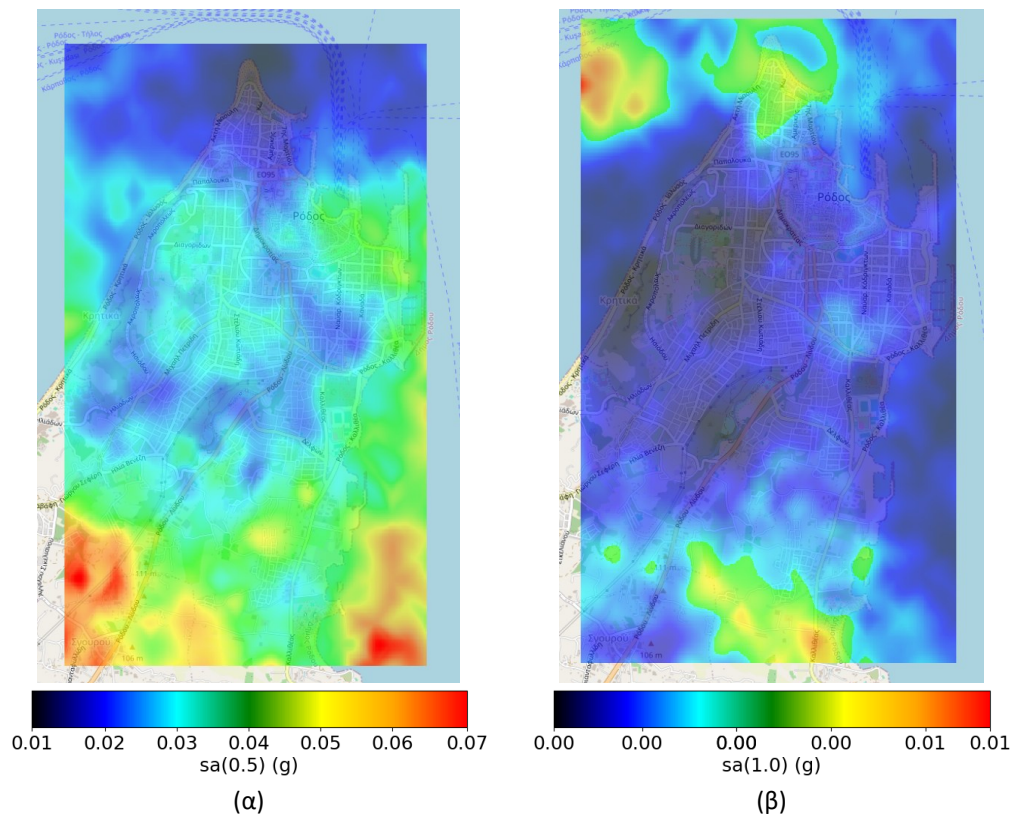
Σχήμα 4: Στιγμιότυπο οθόνης από ειδησεογραφικό ιστότοπο .
(<https://www.seismos.gr/seismos/rodos/448841>)



Σχήμα 5: Στιγμιότυπο οθόνης από τα αποτελέσματα του λογισμικού σε περιβάλλον GIS.



Σχήμα 6: Πεδία εδαφικής κίνησης για τα εντατικά μεγέθη: (α) μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration, PGA), (β) Μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity, PGV)



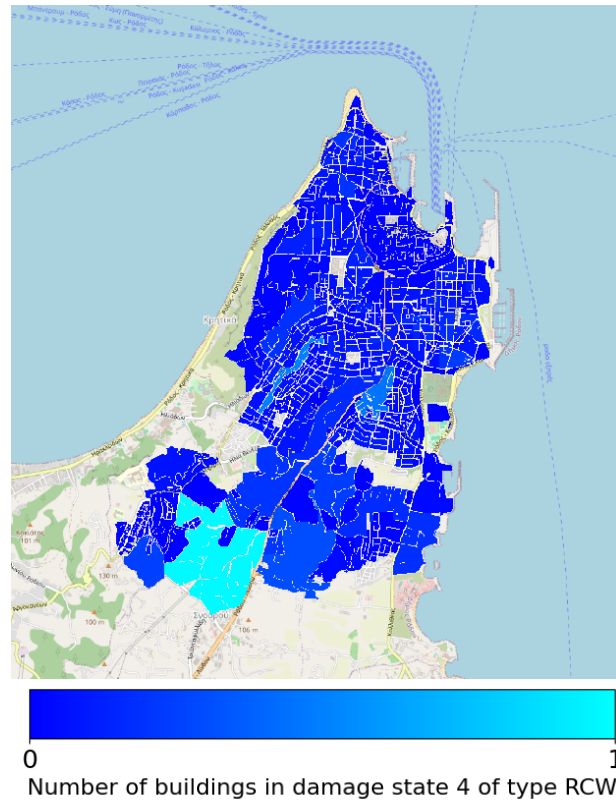
Σχήμα 7: Πεδία εδαφικής κίνησης για τα εντατικά μεγέθη: (α) Φασματική επιτάχυνση για περίοδο 0.5s (Spectral Acceleration at 0.5 seconds, SA(0.5s)), (β) Φασματική επιτάχυνση για περίοδο 1.0s (Spectral Acceleration at 1.0 second, SA(1.0s)).

Πίνακας 1: Επιλεγμένο σεισμικό συμβάν.

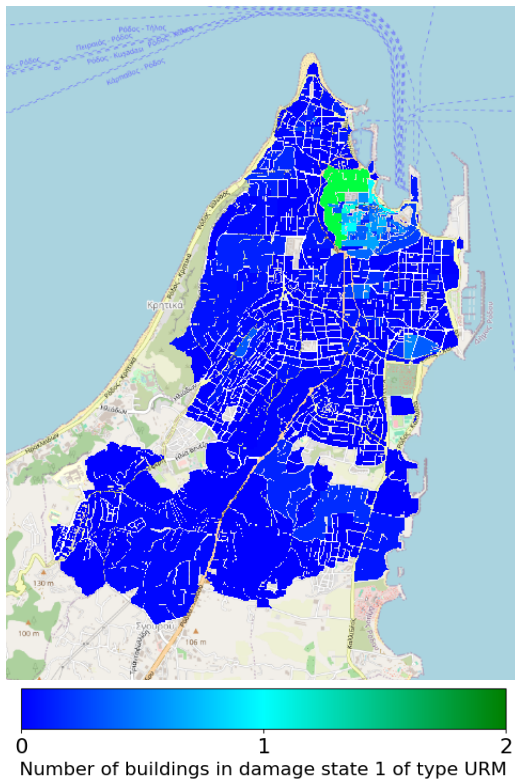
Event Σεισμικό συμβάν σε CDT	Magnitude Μέγεθος	Longitude Γεωγραφικό Μήκος	Latitude Γεωγραφικό Πλάτος	Depth Εστιακό βάθος
114501	4.7	28.370749	36.44147	13.2

2.2 Βλάβες στο κτηριακό απόθεμα

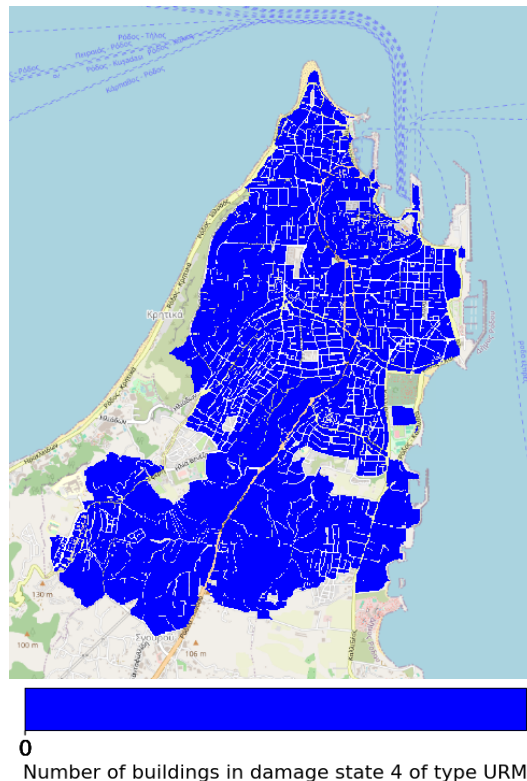
Με τα δεδομένα για τη σεισμική επικινδυνότητα και συγκεκριμένα τους χάρτες εδαφικής κίνησης ο αλγόριθμος του CDT βρίσκει τις αντίστοιχες βλάβες που θα υποστεί η πόλη κατά το συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός. Συνεπώς, έχουμε δεδομένα για διάφορες στάθμες βλάβης των κτηρίων και τα κτήρια χωρίζονται με βάση την κατάστασή τους σε 5 στάθμες βλάβης: (α) DS0: Καμία ζημιά, (β) DS1: ελαφρά ζημιά, (γ) DS2: Μέτρια ζημιά, (δ) DS3: Εκτεταμένες ζημιές, (ε) DS4: Κατάρρευση. Δεδομένου ότι προσομοιώνεται ένα ιστορικό σεισμικό γεγονός, είναι γνωστό ότι δεν υπήρξαν καταρρεύσεις εντός της πόλης, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα, με εξαίρεση κάποιες μεμονωμένες τοιχοποιίες όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τις αναλύσεις σε κτήρια μη ενισχυμένης τοιχοποιίας υπάρχουν αρκετά με βλάβες αλλά ελαφριές που μάλιστα είναι στο κέντρο της μεσαιωνικής πόλης. Δεν μπορούμε να γνωρίζουμε για το πραγματικό περιστατικό ποιες ακριβώς ήταν οι ζημιές καθώς ειδικά οι ελαφρές ζημιές δεν καταγράφονται. Συνήθως αφορούν μικρά ποσά που χειρίζονται ιδιώτες, ενώ πολλές από αυτές δεν χρήζουν άμεσης επέμβασης καθώς δεν καθιστούν κίνδυνο για την δομική ακεραιότητα των κτηρίων. Στο Σχήμα 9 φαίνεται ο χάρτης με την χωρική κατανομή για τα πιο ευάλωτα κτήρια, μη ενισχυμένης τοιχοποιίας, τα οποία βρίσκονται κατά κόρον στη μεσαιωνική πόλη της Ρόδου. Το σχήμα δείχνει τα κτήρια με ελαφρές ζημιές αλλά και τα αποτελέσματα για τα ενδεχόμενα κτήρια που κατέρρευσαν που στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υφίστανται. Στο Σχήμα 10 φαίνεται ο πλήρης πληθυσμός των κτηρίων και πόσα από αυτά είχαν βλάβες σε κάθε μελετούμενο επίπεδο για το συγκεκριμένο σενάριο.



Σχήμα 8: Χωρική κατανομή των κτηρίων υπό κατάρρευση για την πόλη της Ρόδου. RCW: Τοιχώματα Οπλισμένου Σκυροδέματος. Υπάρχει ενδεχόμενο μίας και μόνης κατάρρευσης κτιρίου στη γαλάζια περιοχή.

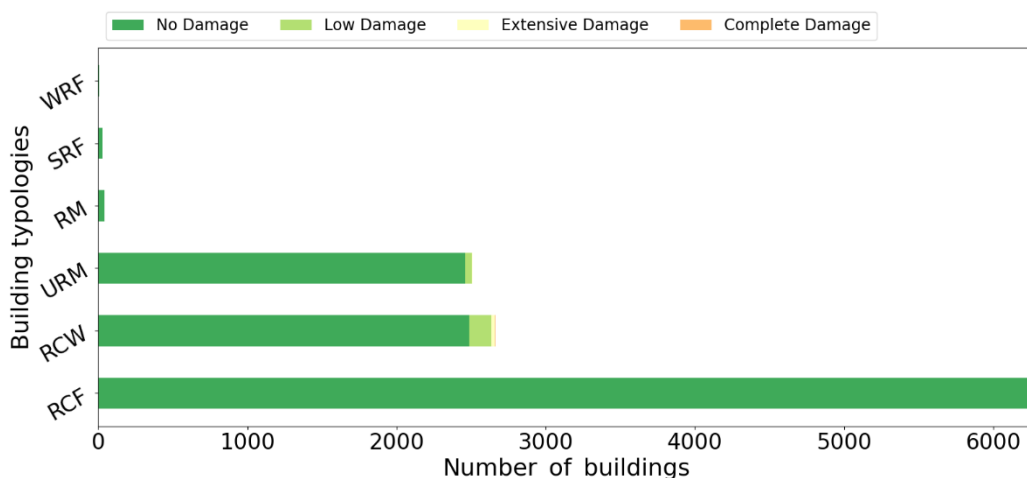


(α)



(β)

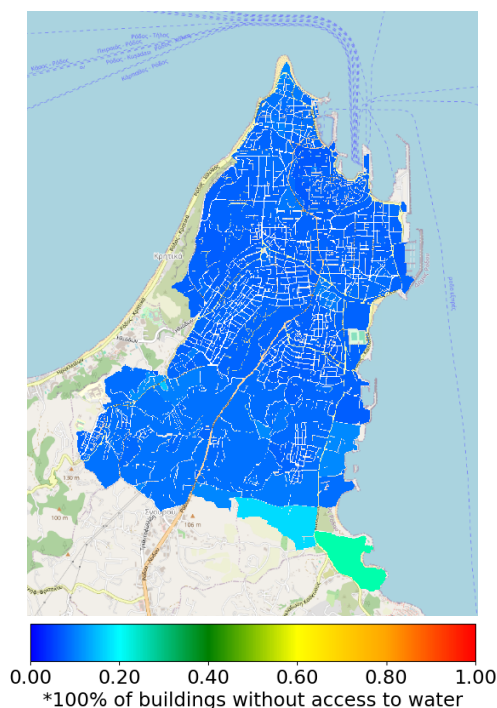
Σχήμα 9: Χωρική κατανομή των κτηρίων από μη ενισχυμένη τοιχοποιία για την πόλη της Ρόδου (α) με ελαφριές ζημιές (DS1) και (β) σε κατάρρευση (DS4). URM: Άοπλη Τοιχοποιία



Σχήμα 10: Αριθμός κτιρίων ανά κατάσταση ζημίας και τυπολογία/είδος κτηρίου. WRF: Ξύλινο Κτήριο, SRF: Κτήριο από Χάλυβα, RM: Ενισχυμένη Τοιχοποιία, URM: Άοπλη Τοιχοποιία, RCW: Τοιχώματα Οπλισμένου Σκυροδέματος, RCF: Πλαίσια Οπλισμένου Σκυροδέματος

2.3 Βλάβες στις υποδομές – Δίκτυο Ύδρευσης

Παράλληλα, εκτελείται ανάλυση τρωτότητας για το δίκτυο ύδρευσης, το οποίο είναι κρίσιμο για τη λειτουργικότητα της κοινότητας μετά το συμβάν. Το μοντέλο υπολογίζει τις αναμενόμενες βλάβες στους αγωγούς ανάλογα με τον τύπο του υλικού (π.χ. χυτοσίδηρος, PVC) για το εντατικό μέγεθος PGV. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την εκτιμώμενη απώλεια λειτουργικότητας του δικτύου (πόσο του πληθυσμού που μένει χωρίς νερό) όπως φαίνεται στο Σχήμα 11. Όπως είναι αναμενόμενο οι βλάβες είναι ελάχιστες και σε αυτή την περίπτωση, με ενδεχόμενες περιορισμένες δυσλειτουργίες κυρίως στο νοτιοανατολικό άκρο της πόλης.



Σχήμα 11: Εκτιμώμενου ποσοστό σωλήνων που δεν παρέχουν νερό σε οικοδομικά τετράγωνα μετά από το σεισμικό συμβάν.

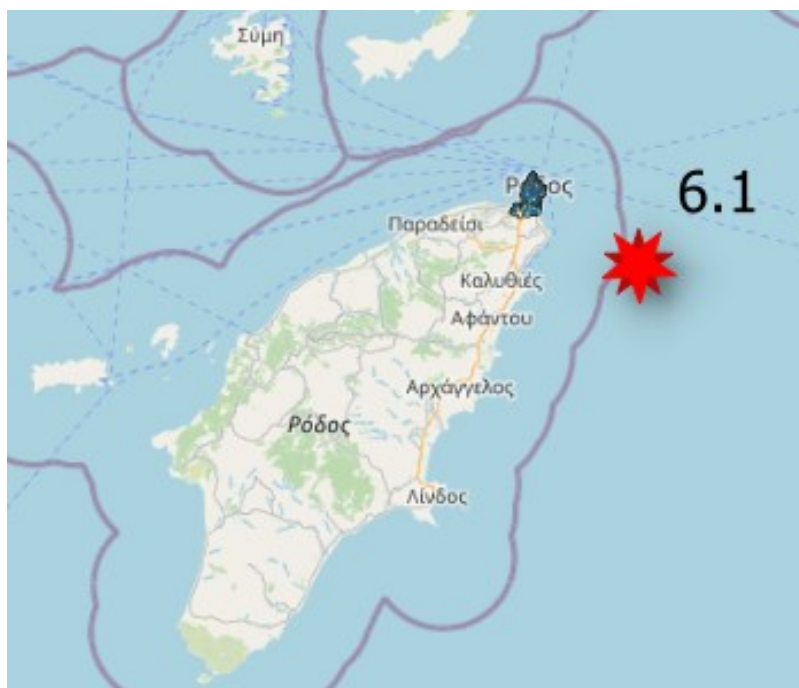
2.4 Οικονομικές Απώλειες

Έχοντας ήδη αναδείξει μέρος των δυνατοτήτων του λογισμικού για αποτελέσματα για ιστορικούς σεισμούς, οι υπόλοιπες δυνατότητες μπορούν να αναδειχθούν και στα πλαίσια ενός υποθετικού σεισμικού γεγονότος. Για την πλήρη ανάδειξη, λοιπόν, των αναλυτικών δυνατοτήτων του συστήματος (βλάβες, απώλειες, δυσλειτουργίες υποδομών), η περαιτέρω επίδειξη σε αυτό το υπό-κεφάλαιο και μετά θα επικεντρωθεί σε ένα ενδεικτικό, μεγαλύτερου μεγέθους σεισμικό γεγονός. Αυτό το υποθετικό καταστροφικό σενάριο επιλέγεται ώστε να αυξήσει την έκθεση της κοινότητας και να καταδείξει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο όλες τις λειτουργίες πρόβλεψης και ανάλυσης του CDT V1. Στην συνέχεια λοιπόν αντί του πρόσφατου σεισμού στις 08/03/2024 που είχε τις παραπάνω αμελητέες απώλειες τα υπόλοιπα παραδείγματα θα γίνουν για ένα σεισμό μεγέθους 6.1 της κλίμακας Ρίχτερ (Πίνακας 2, Σχήμα 12) που δίνει μεγαλύτερες απώλειες.

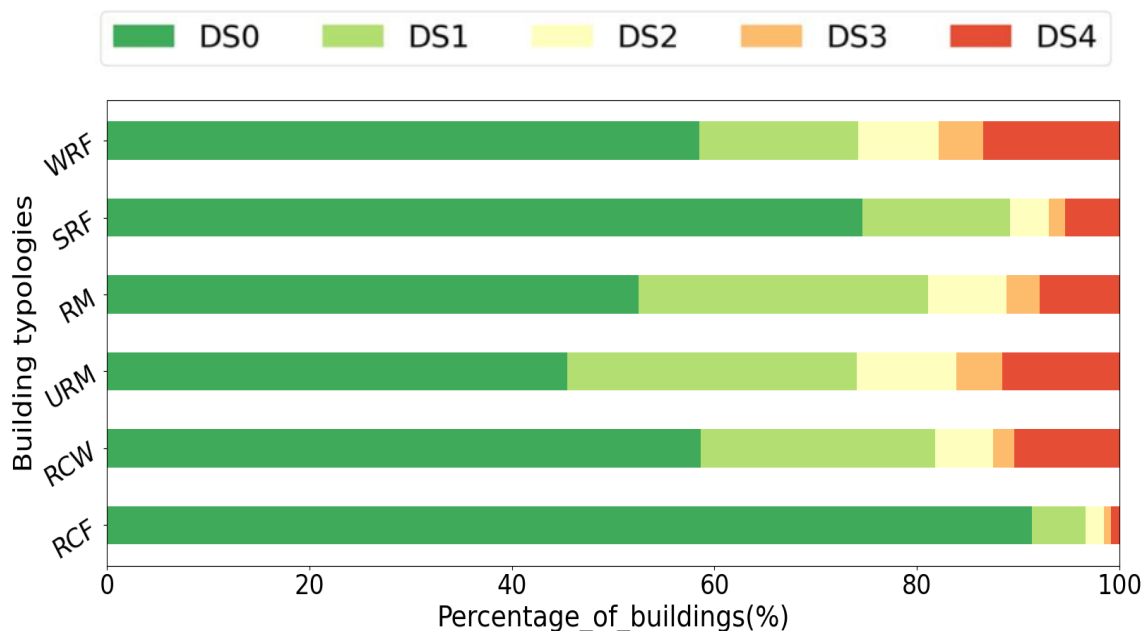
Ολοκληρώνοντας την ολιστική αξιολόγηση, το μοντέλο εκτιμά τις συνολικές οικονομικές επιπτώσεις. Υπολογίζεται το εκτιμώμενο κόστος επισκευής ή αντικατάστασης των δομικών στοιχείων των κτηρίων μετά το σεισμό. Στο Σχήμα 13 φαίνεται το ποσοστό των κτηρίων που είναι σε κάθε στάθμη βλάβης. Με βάση την βλάβη των κτηρίων αυτών προκύπτουν και οι αντίστοιχες οικονομικές απώλειες, οι οποίες δίνονται ανά επιχειρηματική δραστηριότητα στο επίπεδο της πόλης (Σχήμα 14). Επιπλέον, περιλαμβάνονται οι ευρύτερες οικονομικές απώλειες που προκύπτουν από τη διακοπή της λειτουργικότητας των επιχειρήσεων και οι επιπτώσεις στις υπόλοιπες αλληλένδετες επιχειρηματικές δραστηριότητες (Σχήμα 15).

Πίνακας 2: Επιλεγμένο σεισμικό συμβάν για παρουσίαση απωλειών.

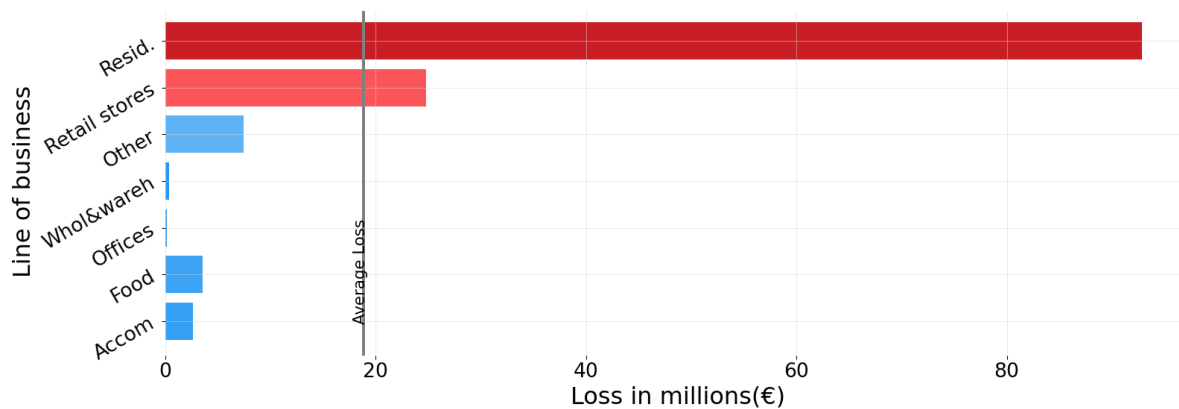
Event Σεισμικό συμβάν σε CDT	Magnitude Μέγεθος	Longitude Γεωγραφικό Μήκος	Latitude Γεωγραφικό Πλάτος	Depth Εστιακό βάθος
113782	6.1	28.369972	36.35154	13.2



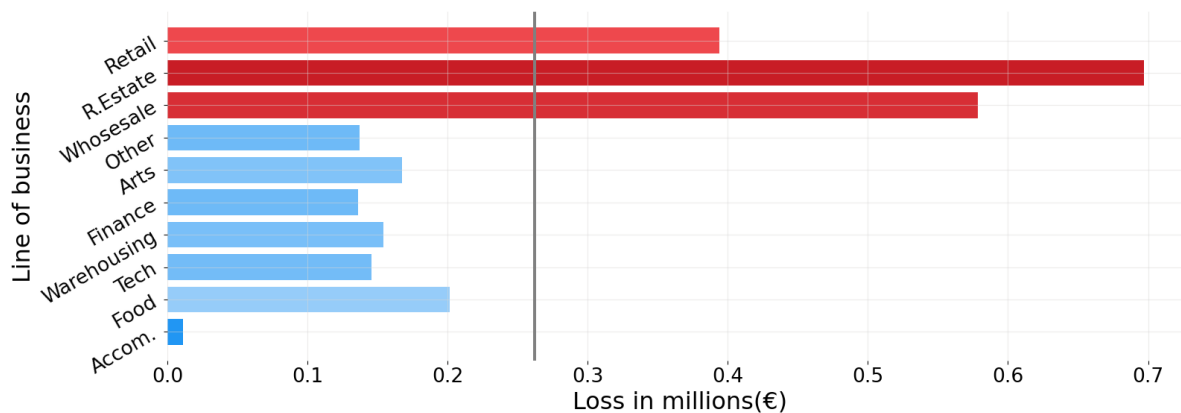
Σχήμα 12: Θέση επικέντρου σεισμικού γεγονότος μεγέθους 6.1 της κλίμακας Ρίχτερ.



Σχήμα 13: Ποσοστό κτηρίων ανά κατάσταση ζημίας και τυπολογία/είδος κτηρίου.



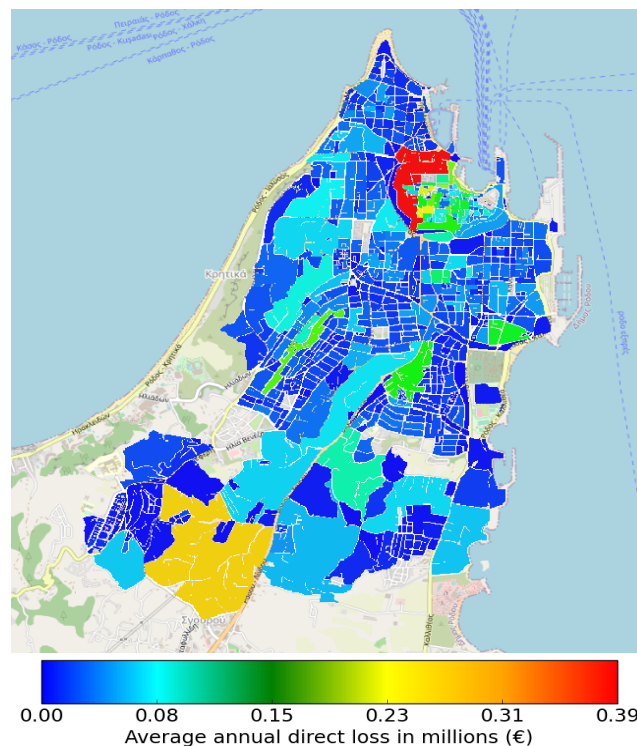
Σχήμα 14: Άμεσες οικονομικές απώλειες ανά επιχειρηματική δραστηριότητα για το σεισμικό σενάριο.



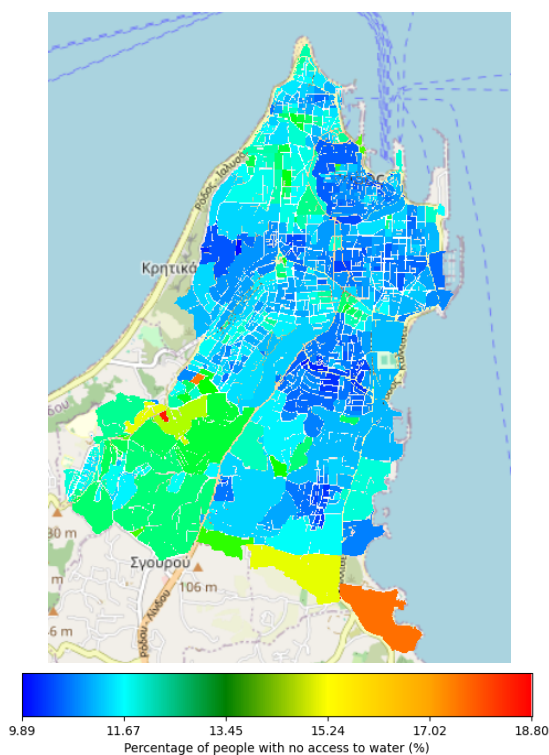
Σχήμα 15: Έμμεσες οικονομικές απώλειες ανά επιχειρηματική δραστηριότητα για το σεισμικό σενάριο.

2.5 Μακροπρόθεσμες επιπτώσεις

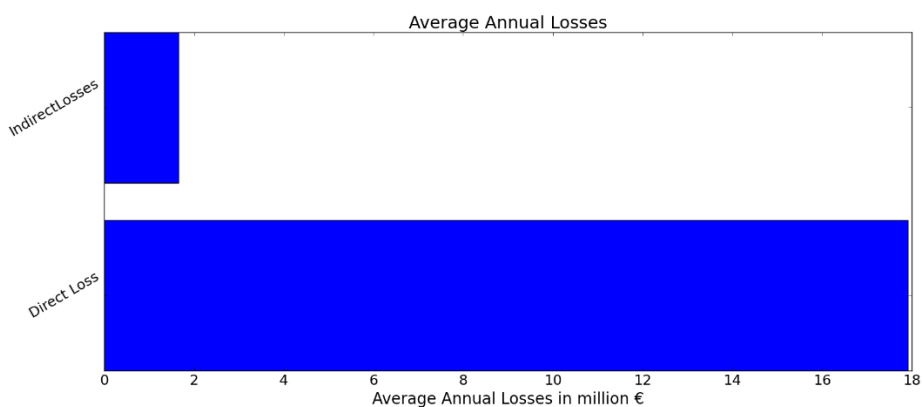
Όπως ήδη αναφέρθηκε προηγουμένως, εκτός από ένα μεμονωμένο σεισμικό γεγονός το λογισμικό επιτρέπει και την εκτίμηση των επιπτώσεων του σεισμού σε βάθος χρόνου, όπως απαιτείται από τις ασφαλιστικές και ανασφαλιστικές εταιρείες. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζονται και οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις του σεισμού στο κτηριακό απόθεμα (Σχήμα 16), όπου φαίνεται ξεκάθαρα πως το πιο ευάλωτο σημείο της πόλης είναι η μεσαιωνική πόλη της Ρόδου, περιοχή εξέχουσας πολιτισμικής σημασίας. Εκτός από το κτηριακό απόθεμα στο Σχήμα 17 φαίνεται το ποσοστό ανά οικοδομικό τετράγωνο που είναι σε κίνδυνο να βρεθεί χωρίς πόσιμο νερό μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Οι μέσες και έμμεσες μέσες απώλειες φαίνονται στο Σχήμα 18 και αθροίζονται σε 18 εκ. ευρώ που αντιστοιχεί στο 3.2% του κόστους πλήρους αντικατάστασης του κτηριακού αποθέματος της πόλης, ποσοστό ιδιαίτερα υψηλό. Τέλος, στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται οι έμμεσες οικονομικές επιπτώσεις ανά επιχειρηματική δραστηριότητα μαζί με τα αντίστοιχα ποσοστά συμβολής στις απώλειες. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τομέας των ακινήτων μαζί με το χονδρεμπόριο περιλαμβάνει το 43% των έμμεσων απωλειών. Με τον τρόπο αυτό γίνονται ξεκάθαρες οι περιοχές υψηλού κινδύνου και οι επιχειρησιακοί τομείς που έχουν μεγαλύτερη ανάγκη για υποστήριξη λόγω σεισμού για χρήση σε επίπεδο πολιτικής προστασίας. Τέλος, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χάρτες επικινδυνότητας για το εντατικό μέγεθος PGA, για πιθανότητα εμφάνισης 2% και 10% στα 50 χρόνια στο Σχήμα 20. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να δημιουργηθούν και για τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.



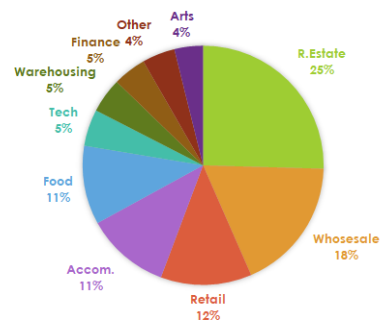
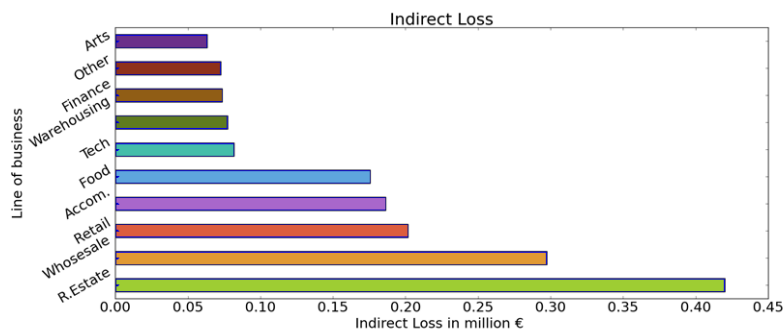
Σχήμα 16: Άμεσες μέσες ετήσιες οικονομικές απώλειες για σεισμό.



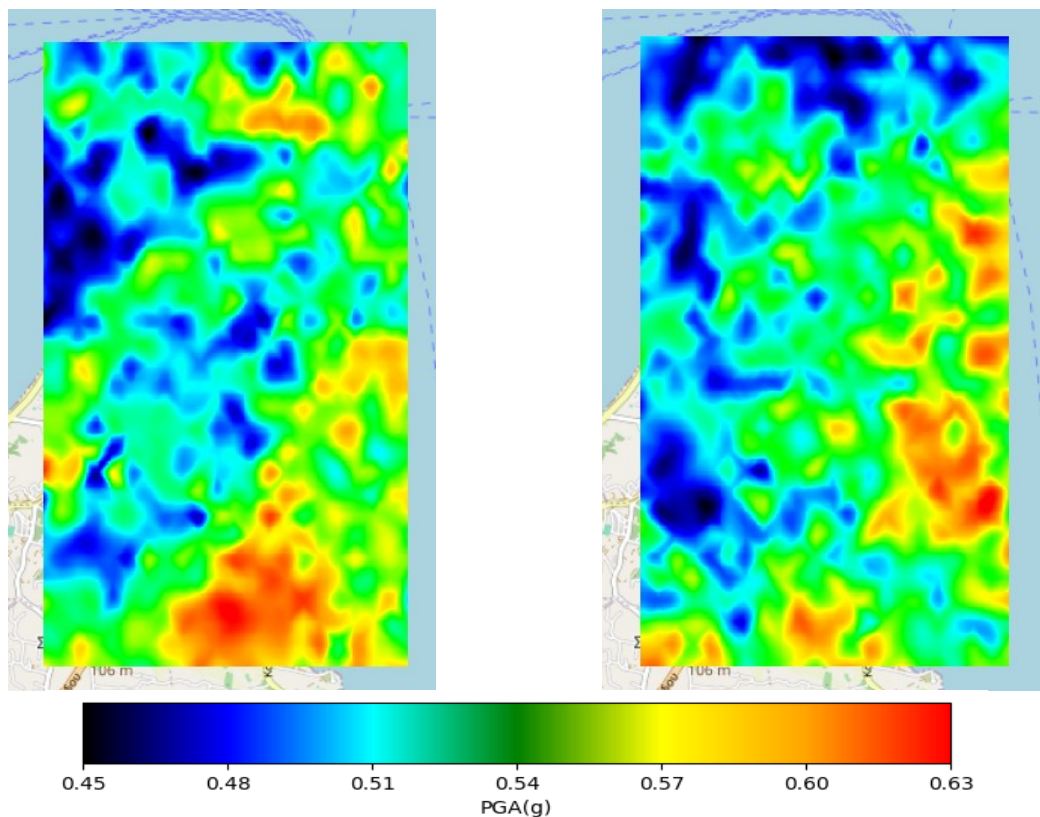
Σχήμα 17: Μέσο ετήσιο ποσοστό πληθυσμού με κίνδυνο μη πρόσβασης σε καθαρό νερό.



Σχήμα 18: Άμεσες και έμμεσες μέσες ετήσιες οικονομικές απώλειες για σεισμό.



Σχήμα 19: Έμμεσες μέσες ετήσιες οικονομικές απώλειες για τον σεισμό ανά επιχειρηματική δραστηριότητα.



Σχήμα 20: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για πιθανότητα (αριστερά) 2% στα 50 χρόνια και (δεξιά) 10% στα 50 χρόνια.

3 Συμπεράσματα

Το Παραδοτέο D6.2 επιβεβαιώνει την ολοκλήρωση ενός πλήρως λειτουργικού πρωτοτύπου του Ψηφιακού Διδύμου Κοινότητας (CDT V1). Η αρχιτεκτονική του έχει δοκιμαστεί επιτυχώς, όπως φαίνεται στην εκτενή επίδειξη του σεισμικού κινδύνου. Τα αποτελέσματα του δε, είναι πολύ σημαντικά για την αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου της πόλης ως σύνολο. Μπορούν να βοηθήσουν τους εκάστοτε ιθύνοντες να πάρουν αποφάσεις και να επιλέξουν τον πιο αποτελεσματικό τρόπο για να μετριάσουν τον σεισμικό κίνδυνο και να προετοιμαστούν καταλλήλως για μελλοντικούς σεισμούς.

Η ολοκλήρωση του Παραδοτέου D6.2 σηματοδοτεί το πέρασμα στην επόμενη κρίσιμη φάση του έργου, όπως αυτή ορίζεται στο Πακέτο Εργασίας 7 (WP7), το οποίο επικεντρώνεται στη προσθήκη και του καιρικού κινδύνου στο CDT V2.

4 Βιβλιογραφία

Ειδησεογραφικός ιστότοπος: <https://www.kerkyrasimera.gr/seismos-sti-rodos-46-richter-me-megali-diarkeia/>

Ειδησεογραφικός ιστότοπος: <https://www.seismos.gr/seismos/rodos/448841>