



D3.1

Climate, weather & seismic hazard

Επικινδυνότητα κλίματος, καιρού & σεισμού

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	R - Document, report
Work package	WP3 – Natural hazard modeling & assessment
Deliverable number	D3.1 Climate, weather/seismic hazard
Status - version, date	Final – V1.0
Deliverable leader	N. Karaferis
Contractual date of delivery	31/07/2023

Ποιοτικός έλεγχος

	Name	Organisation	Date
Peer review 1	Δ. Βαμβάτσικος	ΕΜΠ	12/04/2023
Peer review 2	Β. Μελισσιανός	ΕΜΠ	04/05/2023

Ιστορικό παραδοτέου

Version	Date	Author	Summary of changes
0.1	12/03/2023	N. Καραφέρης	Πρώτο προσχέδιο εγγράφου
1.0	09/06/2023	N. Καραφέρης	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, 2023.

Περιεχόμενα

Ποιοτικός έλεγχος	2
Ιστορικό παραδοτέου.....	2
Νομική διακήρυξη.....	2
Κατάλογος σχημάτων.....	4
Κατάλογος πινάκων	5
Κατάλογος συντομογραφιών και ακρωνύμιων	5
Σύνοψη	6
1 Εισαγωγή	7
1.1 Σκοπός του παραδοτέου	7
1.2 Στοχευόμενο κοινό	7
2 Εκτίμηση διακινδύνευσης λόγω καιρικών συνθηκών	8
2.1 Εισαγωγή	8
2.2 Πλαίσιο ανάλυσης της καιρικής επικινδυνότητας.....	9
2.3 Μεθοδολογία υπολογισμού καιρικής επικινδυνότητας.....	12
3 Εκτίμηση σεισμικής διακινδύνευσης.....	19
3.1 Εισαγωγή	19
3.2 Πλαίσιο ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας.....	19
3.3 Μεθοδολογία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας	24
4 Συμπεράσματα	33
5 Βιβλιογραφία	34

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Τυπικά παραδείγματα δικτύων κατασκευών	9
Σχήμα 2: Παράδειγμα αυτοκινητοδρόμου, με ένα σύστημα κατασκευών να εκτίθεται εν δυνάμει στα ίδια καιρικά φαινόμενα.....	9
Σχήμα 3: Οι ισοδύναμες εκπομπές CO ₂ για τα χαρακτηριστικά σενάρια RCP που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο του EC.	11
Σχήμα 4: Παράδειγμα προβλέψεων βροχόπτωσης, ταχύτητας ανέμου και κατεύθυνσης ανέμου για μια τυχαία ημέρα EC για μία ενότητα του αυτοκινητόδρομου Taracena-Medinaceli στην Ισπανία.	12
Σχήμα 5: Αλγόριθμος FAnimate: Δημιουργία ημερών Frankenstein για ένα EC-κελί και μία μετεωρολογική παράμετρο (Chatzidaki et al. 2024).....	17
Σχήμα 6: Σχηματικό διάγραμμα μεθοδολογίας δημιουργίας των Frankenstein ημερών (Chatzidaki et al. 2024).....	18
Σχήμα 7: Σχηματική αναπαράσταση υπολογισμού της χρονοϊστορίας για μία Frankenstein ημέρα (Chatzidaki et al. 2024).....	18
Σχήμα 8: Βήματα διαδικασίας PSHA (προσαρμοσμένο από Baker 2013)	22
Σχήμα 9: Ενδεικτικό παράδειγμα στοχαστικού συνόλου γεγονότων για μια διάρκεια 10.000 ετών. Τα χρώματα αντιπροσωπεύουν το μέγεθος του ρήγματος, ενώ η θέση των κύκλων δείχνει τη θέση του (προσαρμοσμένο από Pagani et al. 2014).....	23
Σχήμα 10: Ενδεικτικό παράδειγμα σεισμικού χάρτη.....	23
Σχήμα 11: Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεσμάτων της διαδικασίας από-άθροισης.....	23
Σχήμα 12: Το μοντέλο σεισμικών πηγών περιοχής του έργου SHARE που υιοθετήθηκε για την ανάλυση του σεισμικού κινδύνου του παραδείγματος για τοποθεσία στην Ελλάδα.	24
Σχήμα 13: Καμπύλη σεισμικού κινδύνου υπολογισμένη για τη περιοχή της Ρόδου, ως προς τη μέση φασματική επιτάχυνση, AvgSa. Η καμπύλη κινδύνου προκύπτει χρησιμοποιώντας το μοντέλο σεισμικής πηγής SHARE και το GMPE BA08 [83].	25
Σχήμα 14: Σεισμικός χάρτης του της Ρόδου ο οποίος δείχνει χωρικά συσχετισμένες τιμές της σεισμικής έντασης με χρήση της μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (για ένταση σεισμού 7.5).	26
Σχήμα 15: 21 επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές για το επίπεδο κινδύνου 30%/50έτη για τη Ρόδο, Ελλάδα.....	27
Σχήμα 16: Αποτελέσματα ανάλυσης από-άθροισης για το επίπεδο κινδύνου 30%/50έτη που δείχνουν τη συμβολή των συνδυασμών μεγέθους, απόστασης και epsilon, ε, στον σεισμικό κίνδυνο για τη Ρόδο.	28
Σχήμα 17: 21 επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές για το επίπεδο κινδύνου 10%/50έτη για τη Ρόδο.	29
Σχήμα 18: Αποτελέσματα ανάλυσης από-άθροισης για το επίπεδο κινδύνου 10%/50έτη που δείχνουν τη συμβολή των συνδυασμών μεγέθους, απόστασης και epsilon, ε, στον σεισμικό κίνδυνο για τη Ρόδο.	30
Σχήμα 19: 21 επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές για το επίπεδο κινδύνου 2%/50έτη για τη Ρόδο.	31
Σχήμα 20: Αποτελέσματα ανάλυσης από-άθροισης για το επίπεδο κινδύνου 2%/50έτη που δείχνουν τη συμβολή των συνδυασμών μεγέθους, απόστασης και epsilon, ε, στον σεισμικό κίνδυνο για τη Ρόδο.	32

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Τιμές επιλεγμένου IM, μέσου σεισμικού μεγέθους ροπής, απόσταση από το ρήγμα, και απόκλιση epsilon για τη περιοχή της Ρόδου.	25
Πίνακας 2: Ονόματα των 21 επιλεγμένων σεισμικών καταγραφών από τη βάση δεδομένων NGA-West για το επίπεδο κινδύνου 30%/50έτη για τη Ρόδο.	28
Πίνακας 3: Ονόματα των 21 επιλεγμένων σεισμικών καταγραφών από τη βάση δεδομένων NGA-West για το επίπεδο κινδύνου 10%/50έτη για τη Ρόδο.	30
Πίνακας 4: Ονόματα των 21 επιλεγμένων σεισμικών καταγραφών από τη βάση δεδομένων NGA-West για το επίπεδο κινδύνου 2%/50έτη για τη Ρόδο.	32

Κατάλογος συντομογραφιών και ακρωνύμιων

Συντομογραφία	Ολογράφως
EC	Euro-CORDEX
WIMF	Weather Intensity Measure Fields
RCP	Representative Concentration Pathways
WS	Weather Station
FS-day	“Frankenstein” day
CFD	Computational Fluid Dynamics
FAnimate	“Frankenstein Animation” Algorithm
SSHA	Scenario Seismic Hazard Analysis
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Analysis
MAF	Mean annual Frequency
IM	Intensity Measure
GMPE	Ground Motion Prediction Equations
SES	Stochastic Event Sets
PGA	Peak Ground Acceleration
PGV	Peak Ground Velocity

Σύνοψη

Το παραδοτέο 3.1 “Climate, weather & seismic hazard” παρουσιάζει προηγμένα και αξιόπιστα μοντέλα για ένα ευρύ φάσμα φυσικών και ανθρωπογενών κινδύνων που αφορούν στις εφαρμογές του προγράμματος TwinCity. Επικεντρώνεται στη ποσοτικοποίηση του κινδύνου που αφορά σε ενδεχόμενα ακραία καιρικά και σεισμικά γεγονότα σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και παρουσιάζει αξιόπιστες μεθοδολογίες ποσοτικοποίησης των δράσεων των φαινομένων αυτών στις κατασκευές, για χρήση τους σε αναλύσεις εκτίμησης της διακινδύνευσης. Συνεπώς σχεδιάζεται ένα συνολικό πλαίσιο συμβατό με τα μοντέλα και τις μεθοδολογίες του δομοστατικού μηχανικού και της σεισμολογίας, προσφέροντας πρακτικές λύσεις για την όσο δυνατόν ορθότερη και πιο στοιχειοθετημένη εκτίμηση της διακινδύνευσης.

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός του παραδοτέου

Σκοπός του παραδοτέου D3.1 με τίτλο “Climate, weather & seismic hazard” είναι η ποσοτικοποίηση του κινδύνου που διατρέχουν οι κατασκευές ενδιαφέροντος, υπό την επίδραση διαφόρων περιβαλλοντικών ή άλλων δράσεων. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται μεθοδολογίες που καλούνται να προσδιορίσουν και να ποσοτικοποιήσουν τους κινδύνους που αφορούν σε ακραία καιρικά/κλιματικά φαινομένων και σεισμούς μεγάλης έντασης. Οι μεθοδολογίες αυτές είναι που θα χρησιμοποιηθούν κατά βάση στις εφαρμογές του προγράμματος TwinCity, στοχεύοντας στην αξιολόγηση της διακινδύνευσης στις κατασκευές ενδιαφέροντος.

1.2 Στοχευόμενο κοινό

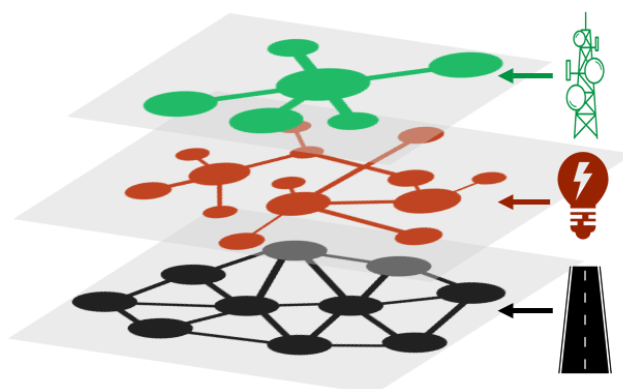
Το έγγραφο D3.1 είναι ένα δημόσιο έγγραφο και θα είναι προσβάσιμο από όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς, και συμμετέχοντες στο πρόγραμμα TwinCity. Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον για ερευνητές και υπηρεσίες που εμπλέκονται στην εκτίμηση διακινδύνευσης κατασκευών ή και ολόκληρων περιοχών. Οι μεθοδολογίες που παρουσιάζονται μπορούν μάλιστα να βοηθήσουν και σε τυχόν εκπαιδευτικούς σκοπούς που αφορούν σε νέους επιστήμονες που ενδιαφέρονται για τις εν λόγω θεματικές.

2 Εκτίμηση διακινδύνευσης λόγω καιρικών συνθηκών

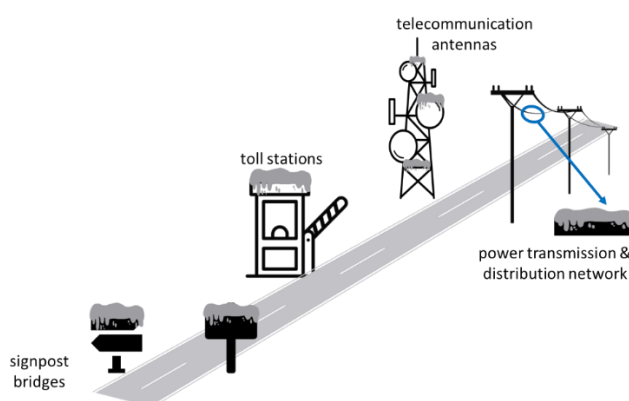
2.1 Εισαγωγή

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των περισσότερων μοντέλων κλίματος αναφέρονται συνήθως σε μεγάλες χωρικές και χρονικές κλίμακες, όπως εκατοντάδες χιλιόμετρα και χρόνια. Από την άλλη πλευρά, στο αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού, οι κατασκευές και οι υποδομές χαρακτηρίζονται σε επίπεδο εκατοστών ή μέτρων, ενώ αντιδρούν δυναμικά σε χρονοϊστορίες φορτίων που το χρονικό τους βήμα είναι σε κλάσματα του δευτερολέπτου. Η γεφύρωση του χάσματος ανάμεσα σε αυτές τις δύο κλίμακες είναι εξαιρετικά σημαντική για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των κλιματικών συνθηκών, σε μακροπρόθεσμη κλίμακα, σε οποιαδήποτε μεμονωμένη κατασκευή. Επιπλέον προκλήσεις προκύπτουν όταν εξετάζονται πολλαπλά κτιρίων ή κατασκευές, καθώς και διασυνδεδεμένα δίκτυα υποδομών και κατασκευών (π.χ. δίκτυα πυλώνων τηλεφωνίας ή ενέργειας ή δίκτυα αυτοκινητοδρόμων, Σχήμα 1) τα οποία απαιτούν, εκτός των άλλων, ταυτόχρονα χωρικά συσχετισμένα πεδία μετεωρολογικών δεδομένων, π.χ. για να αξιολογηθούν οι απώλειες και ο χρόνος επανεργοποίησης του συστήματος που μπορεί να έχει πληγεί λόγω κάποιου μεμονωμένου καιρικού επεισοδίου/γεγονότος. Αυτό συμβαίνει, για παράδειγμα, στην αξιολόγηση ενός δικτύου μεταφοράς ενέργειας ή μιας οδικής αρτηρίας η οποία περιλαμβάνει πινακίδες κυκλοφορίας, φωτισμός, διόδους, κεραίες και ηλεκτρογεννήτριες που εκτίθενται στο ίδιο περιβάλλον, πράγμα που σημαίνει πως κατά τους χειμερινούς μήνες όλες οι κατασκευές μπορεί να εκτίθενται ταυτόχρονα σε συνθήκες παγετού και ανεπιθύμητων ταχυτήτων ανέμου πέραν των τιμών σχεδιασμού (Σχήμα 2). Αυτό θα μπορούσε φυσικά να συμβαίνει και στο πλαίσιο μίας ολόκληρης πόλης, όπου κλιματολογικές συνθήκες όπως η υγρασία, οι βροχοπτώσεις, οι ισχυροί άνεμοι και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικού είδους βλάβες και προβλήματα σε πολλές κατασκευές (τυπικές, κρίσιμες ή ειδικού ενδιαφέροντος) είτε άμεσα είτε με την πάροδο του χρόνου.

Στη περίπτωση του παρόντος προγράμματος, οι επιπτώσεις του μελλοντικού κλίματος στις κατασκευές ενδιαφέροντος αξιολογούνται εκμεταλλευόμενοι τις γενικευμένες προβλέψεις κλίματος που παρέχονται από τη βάση δεδομένων Euro-CORDEX (EC, Jacob et al, 2014). Αυτή η βάση δεδομένων προσφέρει αποτελέσματα σε πλέγμα κελιών 12.5×12.5 χιλιομέτρων (0.11°) για κάθε ημέρα έως το έτος 2100. Αυτά μετατρέπονται σε τεχνητές, χωρικά και χρονικά συσχετισμένες σειρές χρόνου 10 λεπτών σε κάθε γεωγραφικό σημείο ενδιαφέροντος, που ονομάζονται σειρές χρόνου «Frankenstein» (Chatzidaki 2023, Chatzidaki et al. 2024). Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη προσέγγιση αναλογικού τύπου (Dehn 1999, Zorita and Von Storch 1999). Ειδικότερα, χρησιμοποιείται μια υβριδική, δυναμική, στατιστική προσέγγιση για τον κλιματικό χαρακτηρισμό, που συνδυάζει τις μακροκλιματικές προβλέψεις των EC με τις ιστορικές μετρήσεις καιρού από μετεωρολογικούς σταθμούς στις περιοχές ενδιαφέροντος, καθώς και χωρικά συσχετισμένα πεδία μέτρησης έντασης καιρού (Weather Intensity Measure Fields - WIMFs), δηλαδή ταυτόχρονες τιμές των μεταβλητών ενδιαφέροντος σε όλες τις τοποθεσίες. Τα συσχετισμένα WIMFs προκύπτουν συνήθως μέσω πολύπλοκων αριθμητικών μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη τους τοπικούς παράγοντες και μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τις καιρικές παραμέτρους ενδιαφέροντος σε τοπικό επίπεδο. Η προτεινόμενη μεθοδολογία για τη δημιουργία των «Frankenstein» χρονοϊστοριών με μέσο όρο 10-λέπτων και των WIMFs χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του κλιματικού κινδύνου και της συνδεδεμένης διακινδύνευσης στις κατασκευές ενδιαφέροντος.



Σχήμα 1: Τυπικά παραδείγματα δικτύων κατασκευών



Σχήμα 2: Παράδειγμα αυτοκινητοδρόμου, με ένα σύστημα κατασκευών να εκτίθεται εν δυνάμει στα ίδια καιρικά φαινόμενα.

2.2 Πλαίσιο ανάλυσης της καιρικής επικινδυνότητας

Το Euro-CORDEX (EC) παρέχει μελλοντικές προβλέψεις για διάφορες κλιματικές παραμέτρους, όπως η βροχόπτωση, η ταχύτητα του ανέμου κ.ά., οι οποίες βασίζονται σε εναλλακτικά σενάρια για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία ονομάζονται μονοπάτια αντιπροσωπευτικής συγκέντρωσης (Representative Concentration Pathways - RCPs, Moss et al. 2008). Οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ για τα χαρακτηριστικά σενάρια RCP που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο του EC παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Το RCP8.5 αντιπροσωπεύει ένα σενάριο υψηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τα RCP6.0 και RCP4.5 είναι σενάρια σταθεροποίησης, ενώ το RCP2.6 αντιπροσωπεύει ένα σενάριο μείωσης των εκπομπών σε μεγάλο βαθμό. Κατά την προσομοίωση της χρονικής εξέλιξης του μελλοντικού κλίματος, εισάγονται αβεβαιότητες που σχετίζονται με το επιλεγμένο σενάριο, την εσωτερική κλιματική μεταβλητότητα και την αβεβαιότητα του μοντέλου (Hawkins και Sutton 2009 και 2011). Έτσι, για κάθε σενάριο RCP προκύπτουν πολλαπλές πραγματοποιήσεις των κλιματικών παραμέτρων. Αυτό δημιουργεί την ονομαζόμενη μεταξύ των μοντέλων διακύμανση, ένα σημαντικό στοιχείο επιστημικής αβεβαιότητας (Der Kiureghian και Ditlevsen 2009) στη μοντελοποίηση του κλίματος και των καιρικών συνθηκών. Κάθε πραγματοποίηση καθορίζεται από διαφορετικό συνδυασμό ενός παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου κυκλοφορίας και του τοπικού κλιματικού μοντέλου. Τα πρώτα είναι αριθμητικά μοντέλα που αναπαριστούν τις κλιματικές διεργασίες του κλιματικού συστήματος του πλανήτη και παρέχουν παγκόσμιες/διηπειρωτικές κλιματικές πληροφορίες που βασίζονται σε πραγματικές καταγραφές με βάση το κλίμα κατά το παρελθόν και

διαφορετικά σενάρια RCP για τις μελλοντικές προβλέψεις, με τυπικά γραμμική χωρική ανάλυση 100–500km και χρονική ανάλυση 6–24 ώρες. Τα παγκόσμια μοντέλα κυκλοφορίας μετατρέπονται στη συνέχεια σε τοπικά μοντέλα μέσω τοπικών κλιματικών μοντέλων που παράγονται ως συνέπεια αυτών. Τα τοπικά μοντέλα κλίματος μπορούν να περιγράψουν τις δυναμικές διαδικασίες στην ατμόσφαιρα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και συνήθως μπορούν να παρέχουν πληροφορίες με χωρική ανάλυση 10-50 χιλιομέτρων σε υποημερήσια χρονική κλίμακα. Αυτή η υποκλιμάκωση των παγκόσμιων μοντέλων κυκλοφορίας μέσω των τοπικών μοντέλων κλίματος βασίζεται στην υπόθεση ότι το τοπικό κλίμα εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ μακροκλιματικών χαρακτηριστικών και τοπικών χαρακτηριστικών, π.χ., τις ιδιότητες των επιφανειών στο έδαφος.

Γενικά χρησιμοποιείται το μεγαλύτερο δυνατό σύνολο μοντέλων για να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα στις προβλέψεις για την κλιματική αλλαγή και να αποκτηθούν αξιόπιστα αποτελέσματα. Αυτή η αβεβαιότητα αγνοείται πλήρως όμως όταν χρησιμοποιείται μια μόνο πραγματοποίηση μοντέλου, ή αγνοείται εν μέρει όταν χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές του συνόλου (Knutti 2010, Semenov και Stratonovitch 2010). Εναλλακτικά, το μέγεθος του συνόλου μπορεί να μειωθεί μέσω υποδειγματοληψίας, όπως π.χ., από τους Christensen et al (2010).

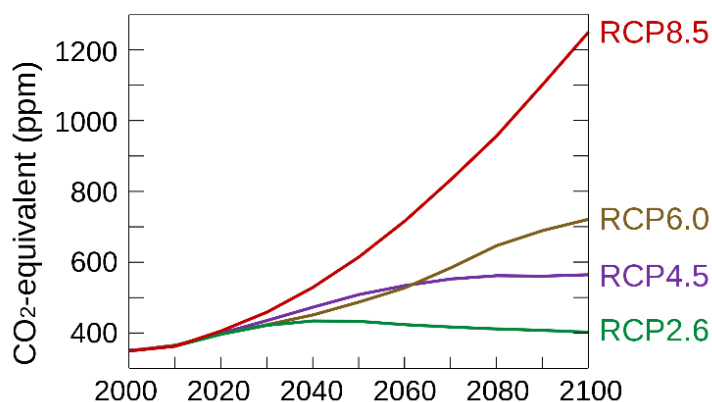
Η χωρική ανάλυση των περισσότερων μοντέλων του EC είναι $0,11^\circ$ ή περίπου $12,5 \times 12,5$ χλμ (διαιρώντας την Ευρώπη σε "κελιά EC" του εν λόγω μεγέθους) και η τυπική χρονική ανάλυση που είναι διαθέσιμη στους χρήστες είναι 1 ημέρα. Με άλλα λόγια, κάθε ημέρα μέσα στα έτη 1980 έως 2100, αποκαλείται "ημέρα Euro-CORDEX" ή "ημέρα EC" και αναπαρίσταται εντός κάθε μοντέλου EC μέσω μιας μόνο εκτίμησης κάθε μετεωρολογικής παραμέτρου. Ένα παράδειγμα προβλέψεων βροχοπτώσης, ταχύτητας ανέμου και κατεύθυνσης ανέμου που έχουν ληφθεί για μια τυχαία ημέρα EC για μία ενότητα του αυτοκινητόδρομου Taracena-Medina del Campo στην Ισπανία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.

Οι διευρυμένες χωρικές και χρονικές κλίμακες των δεδομένων του EC δεν επιτρέπουν την άμεση χρήση τους για την αξιολόγηση της διακινδύνευσης κατασκευών, επομένως και οι δύο αναλύσεις χρειάζεται να προσαρμοστούν. Η μείωση κλίμακας σε υψηλότερη χρονική ανάλυση, για παράδειγμα στη βάση των 10 λεπτών, πραγματοποιείται εκμεταλλευόμενοι τις ιστορικές μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών που ανήκουν σε κάθε κελί EC. Συγκεκριμένα, για κάθε ημέρα EC, χρησιμοποιούνται εργαλεία μηχανικής μάθησης για να εντοπίσουν δύο ή περισσότερες ημέρες με μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών, που ονομάζονται ημέρες WS (Weather Station – WS), οι οποίες ταιριάζουν καλύτερα με τις προβλέψεις του EC για τη συγκεκριμένη ημέρα. Αφού βρεθούν αυτές οι ημέρες WS πραγματικών δεδομένων, τα δεδομένα υψηλότερης ανάλυσης (π.χ. 10 λεπτών), συνδυάζονται για να παράγουν μια τεχνητή χρονοσειρά για ολόκληρη την ημέρα, που ονομάζεται μέρα Frankenstein (ή FS-day), λόγω της τεχνικής προσδιορισμού που αφορά στον συνδυασμό αρχικά ασυμβίβαστων πραγματικών ημερών WS για να αναπαραστήσουν πιο λεπτομερώς μια ημέρα EC. Αυτή η συνθετική, ρεαλιστική αλλά όχι πραγματική ημέρα έχει ως στόχο να μοιάζει αρκετά σε μια πραγματική ημέρα ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί αναλόγως στο πλαίσιο μιας ανάλυσης διακινδύνευσης.

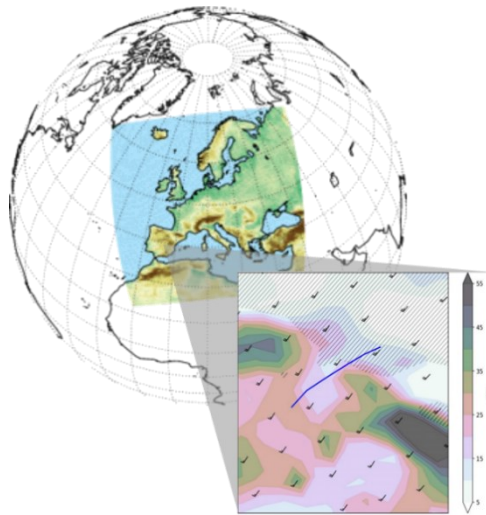
Η παραγόμενη μέρα FS του παραδείγματός μας αποτελείται από 144 τιμές 10 λεπτών για κάθε παράμετρο ενδιαφέροντος, οι οποίες διατηρούν (όσο το δυνατόν καλύτερα) την συσχέτιση των μετρήσεων των μετεωρολογικών σταθμών στο χρόνο και το χώρο. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την απόκτηση μελλοντικών προβλέψεων για όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους με ανάλυση 10 λεπτών στη θέση οποιουδήποτε μετεωρολογικού σταθμού για τον οποίο υπάρχουν αντίστοιχες

μετρήσεις. Αυτό το σύνολο δεδομένων για συγκεκριμένο σημείο μπορεί να διευρυνθεί για να καλύψει ολόκληρο το κελί EC 12.5×12.5χλμ αν είναι γνωστό το χωρικό πρότυπο των μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως αυτό παρέχεται για παράδειγμα από τις WIMFs, ως το προϊόν ειδικών προσομοιώσεων σε κάθε σημείο. Αυτές παρέχουν χωρικά συσχετισμένες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων για ένα πλέγμα σημείων και στο (σύντομο πλέον) χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος (π.χ., τα 10 λεπτά του παραδείγματός μας) και συνεπώς επιτρέπουν τη διεύρυνση των τοπικών μετεωρολογικών παραμέτρων σε όλα τα σημεία ενδιαφέροντος εντός του πλέγματος WIMF. Ένα παράδειγμα των WIMFs είναι μια συλλογή πεδίων ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου που υπολογίζονται μέσω προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) που λαμβάνουν υπόψη την τοπογραφική πολυπλοκότητα του χώρου για να προσομοιώσουν τις τυρβώδεις ροές του ανέμου. Ενώ οι άνεμοι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις τοπικές επιδράσεις του χώρου και τις λεπτομέρειες της προσομοίωσης, άλλες μετεωρολογικές παράμετροι όπως η βροχόπτωση, η περιβαλλοντική θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία είναι σημαντικά λιγότερο ευαίσθητες, έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα λιγότερο λεπτομερές (ακόμη και χωρικά ομοιόμορφο) WIMF σε ολόκληρο το κελί, αντί για μια προσομοίωση με μεγάλη απαίτηση πόρων. Εναλλακτικά, ένα άλλο μεσοκλιματικό μοντέλο (Dudhia 2014) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επεκτείνει το τοπικό σύνολο δεδομένων σε ένα μεγαλύτερο πλέγμα σημείων και να μας βοηθήσει να κερδίσουμε κάποια επιπλέον ακρίβεια στο χώρο.

Οι τεχνητές χρονοσειρές που παράγονται για τις μετεωρολογικές παραμέτρους ενδιαφέροντος έχουν ως στόχο να συμμορφωθούν με τις ημερήσιες τιμές που παρέχονται από το EC ενώ ταυτόχρονα να διατηρήσουν, όσο το δυνατόν καλύτερα, τη χωρική διακύμανση των WIMFs, καθώς και τη χρονική συσχέτιση που παρατηρείται στις μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών. Αυτές οι χρονοσειρές δεν είναι προβλέψεις, δηλαδή δεν αναμένεται να παρατηρηθούν πραγματικά στο μέλλον, αλλά είναι πιθανές πραγματοποιήσεις μακροπρόθεσμων προβλέψεων σχετικά με αυτό που ενδέχεται να συμβεί, στατιστικώς μιλώντας, σε μια μελλοντική μέρα. Αν και δεν πιστεύουμε απαραίτητα κάθε μοναδικό 10λεπτο των χρονοσειρών, αυτά αναμένεται να συνάδουν με τα μακροπρόθεσμα στατιστικά που παρέχονται από το EC και να έχουν τη σωστή χρονική και χωρική συσχέτιση, πράγμα που επιτρέπει την εκτίμηση του κινδύνου μακροπρόθεσμα. Συνεπώς, παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για να συνδέσουν τις γενικές προβλέψεις καιρικών φαινομένων σε περιφερειακό επίπεδο με την ανάλυση διακινδύνευσης που απαιτείται για κατασκευές και υποδομές, όπως αυτή προσδιορίζεται στις αντίστοιχες δομοστατικές και γεωτεχνικές μελέτες.



Σχήμα 3: Οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ για τα χαρακτηριστικά σενάρια RCP που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο του EC.



Σχήμα 4: Παράδειγμα προβλέψεων βροχόπτωσης, ταχύτητας ανέμου και κατεύθυνσης ανέμου για μια τυχαία ημέρα EC για μία ενότητα του αυτοκινητόδρομου Tarazona-Medina del Campo στην Ισπανία.

2.3 Μεθοδολογία υπολογισμού καιρικής επικινδυνότητας

Για να γίνουν καλύτερα κατανοητά τα δεδομένα που χρειάζονται για τον προσδιορισμό των ημερών Frankenstein, στη συνέχεια παρουσιάζεται η εννοιολογική προσέγγιση παράλληλα με ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Θα προσαρμόσουμε τα δεδομένα του EC για την ταχύτητα του ανέμου και την κατεύθυνση του ανέμου σε υψηλό υψόμετρο για χρονική κλίμακα μιας ημέρας, σε χωρικές και χρονικές διακριτοποιήσεις των 100μ και 10 λεπτών, αντίστοιχα. Για να το πράξουμε αυτό, χρησιμοποιούμε αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης CFD για την ταχύτητα του ανέμου με χωρική ανάλυση στα 100μ, για μια προσομοιωμένη χρονική διάρκεια 60 λεπτών. Αυτά παραμετροποιούνται με βάση την κατεύθυνση του ανέμου σε υψηλό υψόμετρο, όπου το φαινόμενο είναι εντονότερο και προκύπτει από ένα μοντέλο μεγάλης κλίμακας με διακριτοποίηση στις 30°. Επιτρέπουμε τη γραμμική κλιμάκωση των εν λόγω WIMFs για να αντιπροσωπεύσουμε διαφορετικά επίπεδα της ταχύτητας του ανέμου (π.χ., Shu et al. 2020).

Θα χρησιμοποιήσουμε το σύμβολο r για να υποδείξουμε τις τιμές των περιόδων μεγάλης διάρκειας των επιλεγμένων μετεωρολογικών παραμέτρων (π.χ., ημερήσιες) και το q για να αναπαραστήσουμε εκείνες των περιόδων μικρής διάρκειας (π.χ., 10 λεπτά). Υποθέτουμε ότι αυτές οι μετεωρολογικές παράμετροι είναι ένας συνδυασμός μίας ή περισσότερων μεταβλητών που είναι άγνωστες, δηλαδή μη ανιχνεύσιμες από τον σταθμό WS, και αντίστοιχα $m = 1, \dots, M$ μεταβλητών που μπορούν να ανιχνευθούν. Στο παράδειγμά μας, η κατεύθυνση του ανέμου σε υψηλό υψόμετρο δεν μπορεί να ανιχνευθεί από έναν WS, αλλά αποτελεί ένα παράγοντα σημαντικής επιρροής για τις αναλύσεις CFD, ενώ η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να ανιχνευθεί αξιόπιστα (ή να εκτιμηθεί) από έναν WS, συνεπώς το $m = 1$ υποδεικνύει την τοπική ταχύτητα του ανέμου. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν N_{gp} τέτοιοι συνδυασμοί κρυφών παραμέτρων που αντιστοιχούν σε δείκτη $v = 1, \dots, N_{gp}$, κάθε συνδυασμός αντιστοιχεί σε ένα σύνολο A_v των WIMFs που έχουν παραχθεί για τον δεδομένο συνδυασμό κρυφών τιμών παραμέτρων. Στο παράδειγμά μας, δεδομένων των τομέων 30° που χρησιμοποιούνται, έχουμε $N_{gp} = 12$ πιθανές τιμές κατεύθυνσης του ανέμου. Δεδομένου ότι οι προσομοιώσεις CFD έχουν πραγματοποιηθεί για μια περίοδο 60 λεπτών, αυτές μπορούν να διαμοιραστούν σε έξι 10λεπτες μέσες τιμές WIMFs ανά δεδομένη κατεύθυνση του ανέμου v , οι οποίες αποτελούν το αντίστοιχο σύνολο A_v .

Στη συνέχεια, για τη περίπτωση μιας περιοχής εντός ενός μόνο κελιού EC, τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου για την ανάλυση προκύπτουν από τρεις διακριτές πηγές:

- Δεδομένα Euro-CORDEX, $r(j_{ec}, v, m)$, παρέχοντας μια μοναδική τιμή για ολόκληρο το κελί EC ανά παράμετρο m και διάστημα j_{ec} μεγάλης διάρκειας, που συσχετίζεται με την άγνωστη παράμετρο v . Για παράδειγμα, όταν λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα EC με χρονική ανάλυση μιας ημέρας, $j_{ec}=1, \dots, N_{ec}$ είναι ο δείκτης της EC-ημέρας και N_{ec} είναι το σύνολο των EC-ημερών.
- Χωρικά συσχετισμένα WIMFs, $q_n(x, y, v, m)$, που παρέχουν πληροφορίες για κάθε παράμετρο m σε μικρά χρονικά διαστήματα και υπολογίζονται με βάση την άγνωστη παράμετρο v σε κάθε σημείο πλέγματος (x, y) εντός του κελιού EC. Το $n = 1, \dots, N_{WIMF,v}$ υποδεικνύει το δείκτη του WIMF με $N_{WIMF,v}$ να αποτελεί το συνολικό αριθμό των WIMFs, για την παράμετρο m , που ανήκουν στο A_v . Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, αυτά θα ήταν μόνο έξι. Υποθέτοντας ότι τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης είναι διαθέσιμα για όλες τις γνωστές μετεωρολογικές παραμέτρους, m , το συνολικό των WIMF περιλαμβάνει πίνακες 2D που εκφράζονται ως $q_n(x, y, v, 1), \dots, q_n(x, y, v, M)$, οι οποίοι είναι συσχετισμένοι μεταξύ τους στο χρόνο και το χώρο. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, προκύπτουν έξι πραγματοποιήσεις ενός 2D πίνακα για κάθε κατεύθυνση του ανέμου που κυριαρχεί, v , για την ταχύτητα του ανέμου σε κάθε σημείο (x, y) στο πλέγμα που προσδιορίστηκε στα $100 \times 100 \mu$. Το μικρό χρονικό διάστημα των WIMFs πρέπει να είναι ίσο με το μικρό χρονικό διάστημα στο οποίο θέλουμε να μειώσουμε τα δεδομένα του EC; π.χ., ένα διάστημα 10 λεπτών στο παράδειγμά που εξετάστηκε.
- Δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού, $q_{ws}(j_{ws}, i, x_s, y_s, m)$, δηλαδή ιστορικές μετρήσεις των ανιχνεύσιμων παραμέτρων m σε μία μικρή χρονική κλίμακα για έναν ή περισσότερους σταθμούς εντός της περιοχής ενδιαφέροντος. Το $i = 1, \dots, N_{sub}$, είναι το i μικρής κλίμακας χρονικό διάστημα (δηλαδή 10 λεπτών) στο οποίο θέλουμε να χωρίσουμε το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα j_{ws} , με το N_{sub} να είναι ο αριθμός των μικρών χρονικών διαστημάτων που αποτελούν το μεγαλύτερο διάστημα (συνήθως θεωρείται σταθερό, π.χ., 144 διαστήματα των 10 λεπτών μέσα σε μια ημέρα), ενώ $j_{ws} = 1, \dots, N_{ws}$, με το N_{ws} να είναι ο αριθμός των μεγαλύτερων χρονικών διαστημάτων (π.χ. ημέρες) που αναφέρονται από τον συγκεκριμένο μετεωρολογικό σταθμό. Το σημείο (x_s, y_s) υποδεικνύει τη θέση του αντίστοιχου μετεωρολογικού σταθμού, (βέλτιστα) προοριζόμενο να βρίσκεται εντός του κελιού EC και του πλέγματος WIMF.

Η συνολική διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία των ημερών Frankenstein περιγράφεται μέσω του αλγορίθμου Frankenstein Animation (FAnimate, Σχήμα 5) καθώς και μέσω της σχηματικής απεικόνισης της διαδικασίας μέσω του διαγράμματος στο Σχήμα 6. Η μεθοδολογία μπορεί να διακριθεί σε δύο βήματα: (i) τη δημιουργία των ημερών Frankenstein στις θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις των EC, τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών και τα προ-υπολογισμένα WIMFs, υπολογίζοντας έτσι τεχνητές παρατηρήσεις, παρόμοιες με τους μετεωρολογικούς σταθμούς για το μέλλον (σειρές FAnimate 13-19), και (ii) την επέκταση των ημερών Frankenstein από τις θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών σε ένα πλέγμα σημείων που καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος χρησιμοποιώντας τα προ-υπολογισμένα WIMFs (σειρές FAnimate 20-22). Γενικά, τα δεδομένα των EC μπορεί να αναφέρονται τόσο στο παρελθόν όσο και στο μέλλον, ενώ οι μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών αναφέρονται μόνο στο παρελθόν, επομένως αυτά τα δύο επικαλύπτονται μόνο εν μέρει. Τέτοιες επικαλύψεις προβλέψεων των EC και μετρήσεων των μετεωρολογικών σταθμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιωθεί η ακρίβεια του συνόλου δεδομένων των EC όπως π.χ., με την βελτίωση της όποιας μεροληψίας μπορεί να υπάρχει στα δεδομένα των EC (Addor και Seibert 2014), αλλά αυτό βρίσκεται εκτός του πεδίου εφαρμογής της εν λόγω διαδικασίας. Παρόλα αυτά, είναι προφανές ότι οι μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τις προβλέψεις των EC εκεί όπου συμβαίνουν τέτοιες επικαλύψεις. Στη περίπτωση αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι πολύ πιο απλοποιημένη καθώς χρειάζεται μόνο το βήμα (ii).

Στη συνέχεια, για λόγους απλότητας, θα επικεντρωθούμε σε ημέρες όπου δεν συμβαίνει τέτοια επικάλυψη. Συνολικά, τα δεδομένα εξόδου αυτής της διαδικασίας είναι οι ημέρες Frankenstein, $q_{fs}(j_{ec}, i, x, y, m)$, που υπολογίζονται συνδυάζοντας:

(α) Τη χρονοσειρά των δεικτών $n(j_{ec}, i, v)$ ως προς τα προσομοιωμένα WIMFs που υποδεικνύουν ποιο WIMF να χρησιμοποιηθεί ανά j_{ec} και το μικρής χρονικής διακριτοποίησης i , το οποίο από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως n' .

(β) Τους παράγοντες κλίμακας $sf(j_{ec}, i, v, m)$ που καθορίζουν πόσο θα κλιμακωθεί ομοιόμορφα το αντίστοιχο WIMF της παραμέτρου m για να εξασφαλιστεί η αντιστοίχιση με τους στόχους των EC.

Ιδανικά, θα έπρεπε να υπάρχουν αρκετά WIMFs ώστε να μπορεί να καταγραφεί οποιοσδήποτε συνδυασμός παραμέτρων καιρού, έτσι ώστε να προκύπτει $sf(j_{ec}, i, v, m) \approx 1$. Στην πραγματικότητα, λόγω του κόστους των λεπτομερών προσομοιώσεων, συχνά θα προκύπτει $sf(j_{ec}, i, v, m) \neq 1$. Αυτό επιβάλλει την εφαρμογή μιας μετέπειτα επεξεργασίας κλιμάκωσης, που μπορεί μεν να εισάγει κάποια μεροληψία αλλά θα στοχεύει να προσεγγίσει καλύτερα κάποιες συγκεκριμένες τιμές ενδιαφέροντος. Συνεπώς, για την m παράμετρο καιρού που μας ενδιαφέρει έχουμε:

$$q_{fs}(j_{ec}, i, x, y, m) = sf(j_{ec}, i, v, m) \cdot q_{n'}(x, y, v, m) \quad (1)$$

όπου το (x, y) υποδεικνύει μια θέση ενδιαφέροντος εντός της περιοχής, $n' = n(j_{ec}, i, v)$ είναι ο εξαρτώμενος από το χρόνο δείκτης στο WIMF που παραμένει ίδιος για όλες τις παραμέτρους καιρού m , ώστε να διατηρηθεί η συσχέτισή τους και v είναι ο συνδυασμός άγνωστων παραμέτρων που χαρακτηρίζει καλύτερα το μακράς χρονικής κλίμακας διάστημα j_{ec} .

Στο παράδειγμά μας, υποθέτουμε ότι τα δεδομένα μακροχρόνιας περιόδου είναι καθημερινά ενώ τα δεδομένα μικρής χρονικής περιόδου αναφέρονται σε διαστήματα των 10 λεπτών. Για λόγους απλότητας, λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο έναν μετεωρολογικό σταθμό εντός της περιοχής και μία μόνο παράμετρο καιρού (π.χ., μόνο η ταχύτητα του ανέμου). Το σημαντικότερο στοιχείο κατά την επέκταση σε πολλαπλές παραμέτρους είναι να διασφαλιστεί ότι επιλέγεται ένα μόνο WIMF για όλες τις παραμέτρους σε κάθε χρονικό σημείο και πως αυτό χρησιμοποιείται με συνέπεια στην επέκταση των τοπικών δεδομένων σε ένα ολόκληρο πλέγμα. Εντός του FAnimate, υποθέτουμε ότι υπάρχουν αρκετές ημέρες στους σταθμούς WS οι οποίες θα επιτρέψουν μια τέλεια αντιστοίχιση των μελλοντικών EC-ημερών στις WS-ημέρες που έχουν καταγραφεί. Η εφαρμογή μπορεί να επεκταθεί και για το (σύννηθες) σενάριο όπου αυτό δεν συμβαίνει.

Γενικότερα, η βασική υπόθεση που βρίσκεται πίσω από την προσέγγιση των Frankenstein δεδομένων είναι ότι τα παρελθοντικά καθημερινά μετεωρολογικά πρότυπα αναμένεται να παρατηρηθούν και στο μέλλον, και μάλιστα με μεγαλύτερη συχνότητα και ένταση λόγω της κλιματικής αλλαγής. Η εύρεση της ημέρας WS που αντιπροσωπεύει καλύτερα κάθε κελί του EC είναι όντως δύσκολο να βρεθεί και απαιτεί μία γεφύρωση των διαφορετικών χωρικών και χρονικών αναλύσεων των δεδομένων WS και EC. Η πρώτη μας δουλειά λοιπόν είναι να χαρακτηρίσουμε κάθε ημέρα WS στο επίπεδο του κελιού EC για τη χρονική κλίμακα μίας ημέρας (Φάση 2 του FAnimate). Θεωρητικά θα έπρεπε να κάνουμε αυτό τον χαρακτηρισμό ανεξάρτητα από τα δεδομένα του EC με απλό μετασχηματισμό των ημερών WS σε συνολικό και ημερήσιο επίπεδο. Παρ' όλα αυτά, αυτή η αντιστοίχιση δεν είναι πάντα προφανής καθώς οι ίδιες οι τοπικές και πληροφορίες σε χαμηλή χρονική κλίμακα που προέρχονται από τα WS μπορεί να σημαίνουν διαφορετικά πράγματα για κοντινές τοποθεσίες εντός του κελιού, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με την ταχύτητα του ανέμου σε γειτονικές τοποθεσίες που μπορεί να διαφέρουν βάσει, για παράδειγμα, της (υψηλού υψόμετρου) κατεύθυνσης του ανέμου. Με άλλα λόγια, η κάθε μετατροπή θα έπρεπε να επαναλαμβάνεται για τις διαφορετικές παραμέτρους, δηλαδή τις λεγόμενες "κρυφές" παραμέτρους, οι οποίες ενδέχεται να μην είναι ανιχνεύσιμες στο επίπεδο του WS αλλά μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης CFD. Ως προεπεξεργασία (Φάση 1 του FAnimate), όλα τα προ-υπολογισμένα WIMFs χαρακτηρίζονται από τις τιμές στο επίπεδο του κελιού EC, $g_n(v, m)$, επιτρέποντας έτσι τη γεφύρωση των διαφορετικών περιπτώσεων χωρικής κλίμακας για τα δεδομένα των WS και EC. Στη συνέχεια, για

κάθε υποσύνολο των WIMFs, N_{gp} , δηλαδή για κάθε κρυφή παράμετρο v , τα δεδομένα WS 10 λεπτών συνδέονται με το πλησιέστερο WIMF μέσα στο υποσύνολο. Αν όμως για οποιοδήποτε σύντομο χρονικό διάστημα δεν μπορεί να προσδιοριστεί ένα μόνο WIMF που να ταιριάζει τέλεια με τις μετρήσεις του WS, τότε επιλέγεται το πλησιέστερο WIMF που, για παράδειγμα, είναι αυτό που ελαχιστοποιεί την απόλυτη απόσταση του WIMF και των δεδομένων WS σύμφωνα με το βήμα 9 του FAnimate όπου η ελαχιστοποίηση γίνεται για το WS που υποδεικνύεται από το δείκτη s . Σε αυτήν την περίπτωση, το επιλεγμένο WIMF κλιμακώνεται με βάση το $sf(j_{ws}, i, v, m)$ (ή γενικά μετασχηματίζεται) για να επιτρέψει την ταύτιση των δεδομένων του σύντομου διαστήματος των WS.

Όταν περισσότεροι από έναν σταθμό πέφτουν εντός του πλέγματος WIMF, το επιλεγμένο WIMF είναι αυτό για το οποίο οι τιμές των IM σε όλες τις θέσεις WS ταιριάζουν καλύτερα με τις αντίστοιχες τιμές WIMF. Βασικά, αυτό σημαίνει ότι η ελαχιστοποίηση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς εντός του πλέγματος WIMF. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των μετεωρολογικών σταθμών, υπάρχει πιθανότητα να μην μπορεί να βρεθεί ένα WIMF που να ταιριάζει τέλεια με τις μετρήσεις των WS, επομένως πρέπει να υιοθετηθεί ένα σχέδιο βελτιστοποίησης, όπως για παράδειγμα η απόκτηση του WIMF που ελαχιστοποιεί το συσσωρευτικό σφάλμα/απόκλιση των τιμών στις θέσεις των WS. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει επίσης την εισαγωγή βαρών επιλογής από τον χρήστη στα κριτήρια ελαχιστοποίησης σφάλματος, πράγμα που αντιπροσωπεύει τη δυνατότητα του κάθε WS να παρακολουθεί αξιόπιστα την παράμετρο ενδιαφέροντος και εξασφαλίζει την καλύτερη ταύτιση του WS με την υψηλότερης βαρύτητας.

Η μέση τιμή σε ολόκληρο το κελί, $c(j_{ws}, i, v, m)$, καθορίζεται στη συνέχεια βασιζόμενη στο επιλεγμένο WIMF (βήμα 10 του FAnimate). Αυτό επιτρέπει το χαρακτηρισμό των τοπικών δεδομένων WS 10 λεπτών στο επίπεδο του κελιού EC. Συνδυάζοντας τα δεδομένα WS 10 λεπτών στο επίπεδο του κελιού EC για την ημέρα WS, μπορεί να καθοριστεί η αντίστοιχη ημερήσια τιμή σε επίπεδο κελιού EC για ολόκληρη την ημέρα, $r'(j_{ws}, v, m)$, για κάθε παράμετρο m (βήμα 12 του FAnimate). Για παράδειγμα, για ακραίες προβλέψεις του EC (π.χ., μέγιστα), η αντίστοιχη τιμή μεγάλης διάρκειας των δεδομένων WS υπολογίζεται ως:

$$r'(j_{ws}, v, m) = \max_{all i \in j_{ws}} \{c(j_{ws}, i, v, m)\} \quad (2)$$

ενώ για αθροιστικές παραμέτρους μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$r'(j_{ws}, v, m) = \sum_{all i \in j_{ws}} c(j_{ws}, i, v, m) \quad (3)$$

Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των διαφορετικών χωρικών και χρονικών αναλύσεων των δεδομένων WS και EC. Το σύνολο των $\{r'(j_{ws}, v, m)\}$ περιλαμβάνει τις τιμές σε επίπεδο κελιού EC που χαρακτηρίζουν τις δειγματοληπτικές ιστορικές ημέρες WS που χρησιμοποιούνται αργότερα για την αντιστοίχιση κάθε ημέρας EC.

Για κάθε ημέρα EC, j_{ec} , πρέπει να καθοριστεί το υποσύνολο v' που είναι αυτό που ταιριάζει καλύτερα με τις άγνωστες παραμέτρους των EC (βήμα 16 του FAnimate) μαζί με το υποσύνολο $A_{v'}$. Για το παράδειγμά μας που εξετάζουμε ένα σύνολο από WIMFs ταχύτητας ανέμου που υπολογίζονται μέσω προσομοιώσεων CFD, το υποσύνολο $A_{v'}$ αποτελείται από εκείνα που υπολογίζονται για την κατεύθυνση του ανέμου που προκύπτει από τις προβλέψεις του EC. Αφού οριστεί το υποσύνολο $A_{v'}$, επιλέγουμε την ημέρα j'_{ws} του WS με όμοιες τιμές μεγάλης διάρκειας, $r'(j'_{ws}, v', m)$, που ταιριάζει καλύτερα με τις ημερήσιες τιμές στόχου του EC (βήμα 17 του FAnimate). Στην περίπτωση μας, υποθέτουμε ότι το σύνολο των ημερών WS είναι "ολοκληρωμένο", που σημαίνει πως μπορούν να καθοριστούν αντίστοιχες WS ημέρες για κάθε ημέρα EC, έτσι η χρονική κλίμακα της ημέρας EC μειώνεται κάνοντας χρήση των μετρήσεων της πλησιέστερης ημέρας WS (βήμα 19 του FAnimate) Συνεπώς, δημιουργούνται τεχνητές Frankenstein χρονοϊστορίες στη θέση του WS. Στη συνέχεια, οι χρονοϊστορίες αυτές επεκτείνονται σε ολόκληρο το πλέγμα για κάθε ένα 10-λεπτο χρησιμοποιώντας τα ήδη υπολογισμένα WIMF που ταιριάζουν καλύτερα με τη μέτρηση του WS των 10 λεπτών, $n(j_{ws}, i, v')$. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την επέκταση των τοπικών τιμών σε ολόκληρο το πλέγμα των (x, y)

σημείων, παράγοντας έτσι τα επιθυμητά Frankenstein WIMFs (FS-WIMFs) όπως περιγράφεται στο βήμα 21 του FAnimate. Η παραγόμενη ημέρα Frankenstein (FS-ημέρα) και τα FS-WIMFs είναι χρονικά συσχετισμένα με βάση τις μετρήσεις WS.

Ένα επιπλέον ζήτημα που πρέπει να συζητηθεί είναι το τι αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα του FAnimate σε σχέση με το προσδιορισμό μιας FS-ημέρας, όταν φαινομενικά ο αλγόριθμος απλά αναπαράγει μια ημέρα WS στο μέλλον. Αυτό όμως είναι ανακριβές καθώς δεν υπάρχει κάποιος "ολοκληρωμένο" ιστορικό καταλόγου παρατηρήσεων, ικανό να ταιριάζει σε οποιαδήποτε μελλοντική κατάσταση που μπορεί να εξετάζεται. Στην πραγματικότητα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μέρη των "κοντινότερων" ημερών WS και να προσδιοριστούν νέες FS-ημέρες, καθώς το να βρεθεί μια μεμονωμένη ημέρα που να ταιριάζει επαρκώς στα διαθέσιμα δεδομένα WS είναι εξαιρετικά δύσκολο. Για να το επιτύχουμε αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος k-Nearest Neighbors (k-NN) που επιτρέπει την προσδιορισμό των k πιο αντιπροσωπευτικών ημερών WS που είναι πιο κοντά στον "στόχο" της EC-ημέρας που εξετάζεται, καθώς και τον προσδιορισμό των αντίστοιχων βαρών p_j ανά ημέρα $j = 1, \dots, k$, με τους συντελεστές να μειώνονται όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από τον στόχο. Στη συνέχεια, η FS-ημέρα διαμορφώνεται συνδυάζοντας τα δεδομένα των k επιλεγμένων ημερών WS, χρησιμοποιώντας το βάρος p_j ως κριτήριο για το πόσα συνεχής χρονικά διαστήματα μικρής χρονικής κλίμακας θα επιλεγούν από κάθε πηγή.

Για να το επιτύχουμε αυτό, πρώτα δημιουργείται μια τυχαία διάταξη (permutation) του $\{1, \dots, k\}$, που υποδεικνύει τη σειρά με την οποία οι k ημέρες WS θα καθορίσουν την FS-ημέρα, ανεξάρτητα από το βάρος της συμβολής τους. Έτσι, η πρώτη ημέρα που υποδεικνύεται από τη συγκεκριμένη μετάθεση θα καθορίσει την έναρξη της ημέρας, ενώ η τελευταία θα καθορίσει το τέλος της. Έτσι, όλες οι επιμέρους ημέρες k από τα WS διαιρούνται σε k συνεχείς ιστορίες, των οποίων η θέση και το μήκος τους καθορίζεται από το αντίστοιχο βάρος του αλγορίθμου k-NN. Ένα παράδειγμα για $k = 3$ παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 7, με τις τρεις πλησιέστερες ημέρες να παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 7α-γ με τη διάταξη να ακολουθεί τη σειρά $\{3, 1, 2\}$. Η FS-ημέρα αποτελείται από τρία μέρη, με μήκη $\{\text{round}(144p_3), \text{round}(144p_1), \text{round}(144p_2)\}$ ως συνεχή διαστήματα 10 λεπτών (όπου το "round" σημαίνει στρογγυλοποίηση στον πλησιέστερο ακέραιο). Κατά βάση, οι τρεις αυτές χαρακτηριστικές ημέρες, που υποδεικνύονται από το δείκτη $m \in \{3, 1, 2\}$, διαιρούνται στα μέρη A_m , B_m και C_m τα οποία προσδιορίζονται με βάση τα προαναφερθέντα μήκη. Η FS-ημέρα λοιπόν, δημιουργείται με τον ίδιο τρόπο με τα A, B, C μέρη της, να προέρχονται από τις επιμέρους ημέρες με βάση την τυχαία σειρά τοποθέτησης που προσδιορίστηκε. Στο παρόν παράδειγμα, τα A3, B1 και C2 είναι αυτά που εν τέλει συνδυάζονται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7δ. Γενικά μπορούν να υπάρξουν $k!$ τέτοιοι πιθανοί συνδυασμοί. Μια εναλλακτική περίπτωση θα μπορούσε να είναι η A2, B1, C3, ή η A1, B3, C2, αλλά δεν θα μπορούσε να είναι μια περίπτωση όπως η A2, B2, C1, όπου δύο μέρη προέρχονται από την ίδια ημέρα (π.χ. εδώ την ημέρα 2).

Το αποτέλεσμα αυτό θα είναι συνήθως ασυνεχές, επομένως πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια διαδικασία μετατόπισης και/ή κλιμάκωσης για να αποκατασταθεί η συνεχεία της ιστορίας, όπως γίνεται για παράδειγμα στο Σχήμα 7ε όπου τα στοιχεία A και C μετατοπίζονται για να κλείσουν το κενό με το B. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να πραγματοποιηθεί η διαδικασία αυτή, ενώ η βέλτιστη επιλογή μετατόπισης και κλιμάκωσης εξαρτάται από την μετεωρολογική παράμετρο που κάθε φορά εξετάζεται. Παρά ταύτα, δεδομένης της συνήθους έλλειψης επαρκών παρατηρήσεων, υπάρχει μια καλή πιθανότητα ότι οι παραγόμενες ιστορίες δεν θα μπορούν να ανταποκριθούν ικανοποιητικά στις χαρακτηριστικές τιμές στόχου της EC. Σε αυτήν την περίπτωση, συνολικά η ιστορία μπορεί να κλιμακωθεί για να ταιριάζει σε αυτές, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 2f όπου οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές είναι γνωστές (όπως μπορεί να συμβαίνει π.χ. με τη θερμοκρασία). Η παραγόμενη ιστορία του Σχήματος 7f είναι τελικά η FS-ημέρα, η οποία στη συνέχεια συνδυάζεται με τα προεπιλεγμένα WIMFs για να προκύψουν τα FS-WIMFs.

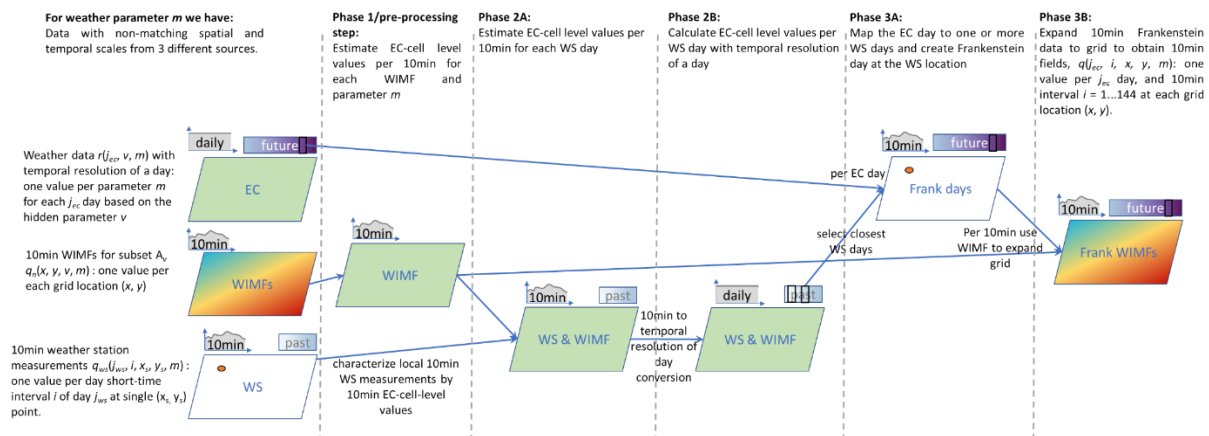
Τέλος πρέπει να αναφερθεί, πως για κάθε παράμετρο και διαφορετική περίπτωση μπορούν να ενσωματωθούν επιπλέον παράμετροι και εξειδικεύσεις για την καλύτερη περιγραφή των διαφορετικών εφαρμογών. Παρ' όλα αυτά, ακόμα και η βασική προσέγγιση που προτείνεται εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια στις περισσότερες εφαρμογές που στοχεύουν στη δημιουργία Frankenstein ημερών, οι οποίες θα είναι, όπως προαναφέρθηκε, βασισμένες στα δεδομένα του EC, τις ιστορικές μετρήσεις από τους σταθμούς WS και τα προκαθορισμένα WIMFs, ώστε αυτές με τη σειρά τους να χρησιμοποιηθούν στις αντίστοιχες αναλύσεις που αφορούν στις εκτιθέμενες στα καιρικά φαινόμενα αυτά κατασκευές.

```

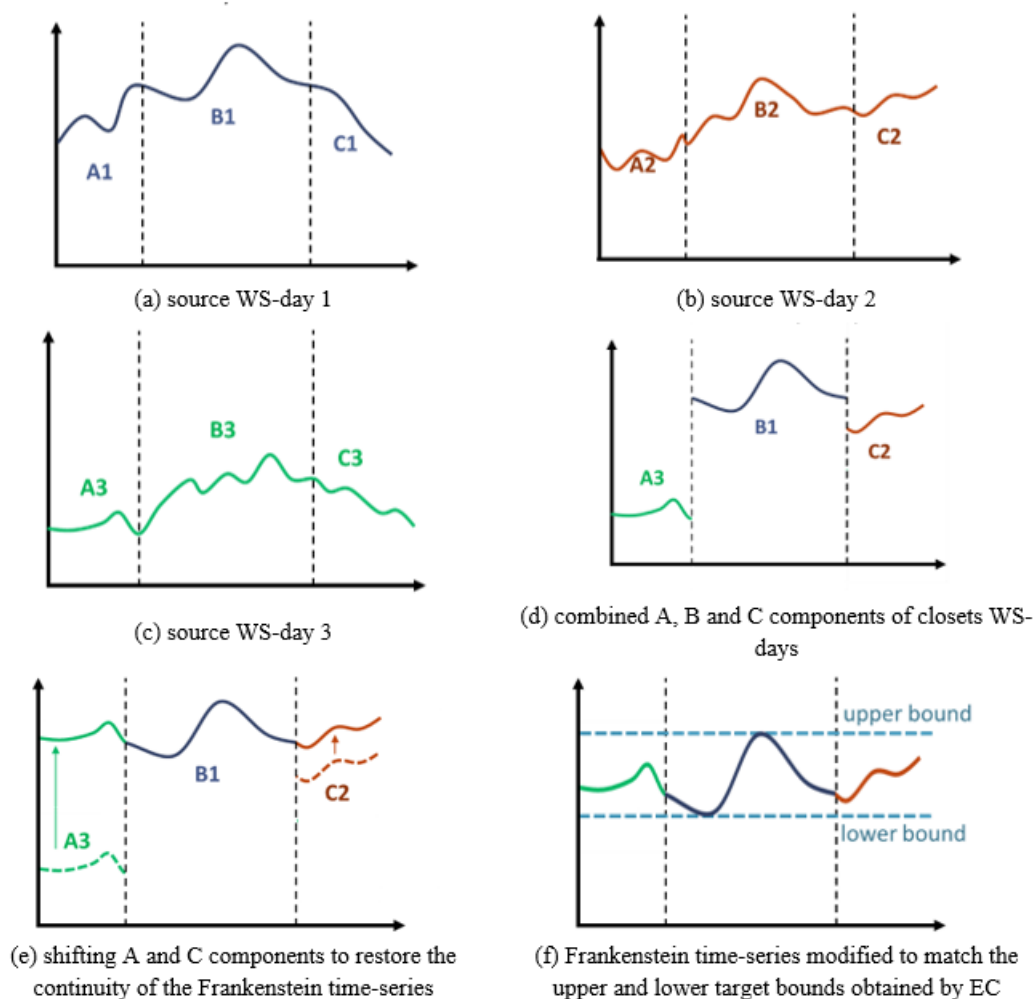
1  % Phase 1 – pre-processing step: estimate the EC-cell value of the weather parameter m per pre-computed WIMF
2  for each subset  $A_v$  with  $v = 1:N_{gp}$ 
3    for each WIMF  $n = 1:N_{WIMF,v}$ 
4      characterize the  $n^{th}$  WIMF by an EC-cell level value  $g_n(v, m)$ :
5       $g_n(v, m) = \text{"summary"}$  (e.g., average) of  $q_n(x, y, v, m)$  estimated over all  $(x, y)$  WIMF points within the cell
6    end
7  end
8  % Phase 2: map each WS-day to EC-cell-level values for each day different possible sets of "hidden" parameters. In the process, match each WS-day subinterval to a single WIMF.
9  for each subset  $A_v$  with  $v = 1:N_{gp}$ 
10   for each WS-day  $j_{ws} = 1:N_{ws}$ 
11     for each subinterval  $i = 1:N_{sub}$ 
12       % Phase 2A: match each subinterval of the WS to closest WIMF, scale the selected WIMF to match the WS measurements and compute the corresponding EC-cell-level values
13       find WIMF of subset  $A_v$  that is closest to WS subinterval measurements and estimate any needed scale factor:
14        $[n(j_{ws}, i, v), sf(j_{ws}, i, v, m)] = \text{argmin} |sf(j_{ws}, i, v, m) \cdot q_n(x_s, y_s, v, m) - q_{ws}(j_{ws}, i, x_s, y_s, m)|$ 
15       characterize  $i^{th}$  subinterval WS data by EC-cell values based on the selected  $n'$  WIMF:
16        $c(j_{ws}, i, v, m) = sf(j_{ws}, i, v, m) \cdot g_{n'}(m)$ , where  $n' = n(j_{ws}, i, v)$ 
17     end
18     % Phase 2B: calculate EC-cell values for each day per WS-day,  $r'(j_{ws}, v, m)$ , where the prime is added to distinguish it from the EC days
19     combine all  $i = 1:N_{sub}$  subinterval values of  $c(j_{ws}, i, v, m)$  to calculate the daily value of  $r'(j_{ws}, v, m)$  characterizing the EC-cell for WS-day  $j_{ws}$  and hidden global parameter combination  $v$ 
20   end
21 end
22 % Phase 3: create FS-day by mapping each EC-day to one WS-day, and use the subinterval-matched WIMFs to spatially expand
23 for each EC-day  $j_{ec} = 1:N_{ec}$ 
24   % Phase 3A: create the FS-day at the WS location
25   find matching global parameter combination  $v'$  for the given EC-day
26   find WS-day  $j'_{ws}$  closest to EC-day  $j_{ec}$  for the given  $k'$ :  $j'_{ws} = \text{argmin} |r'(j_{ws}, v', m) - r(j_{ec}, v', m)|$ 
27   for each subinterval  $i = 1:N_{sub}$ 
28     set the FS-day subinterval values at the station location to be equal to the station observations:
29      $q_n(j_{ec}, i, x_s, y_s, m) = q_{ws}(j'_{ws}, i, x_s, y_s, m)$ 
30   % Phase 3B: expand FS-day spatially to entire grid
31   for all  $(x, y)$ 
32     use  $n(j'_{ws}, i, v')$  WIMF and scale factor  $sf(j'_{ws}, i, v', m)$  from step 9 to estimate the  $m^{th}$  parameter at  $(x, y)$ :
33      $q_n(j_{ec}, i, x, y, m) = sf(j'_{ws}, i, v', m) \cdot q_n(x, y, v', m)$ 
34   end
35 end
36 end

```

Σχήμα 5: Αλγόριθμος FAnimate: Δημιουργία ημερών Frankenstein για ένα EC-κελί και μία μετεωρολογική παράμετρο (Chatzidaki et al. 2024)



Σχήμα 6: Σχηματικό διάγραμμα μεθοδολογίας δημιουργίας των Frankenstein ημερών (Chatzidaki et al. 2024)



Σχήμα 7: Σχηματική αναπαράσταση υπολογισμού της χρονοϊστορίας για μία Frankenstein ημέρα (Chatzidaki et al. 2024)

3 Εκτίμηση σεισμικής διακινδύνευσης

3.1 Εισαγωγή

Ο κίνδυνος λόγω σεισμού μπορεί συνήθως να ποσοτικοποιηθεί ακολουθώντας είτε την ανάλυση επικινδυνότητας ανά σενάριο (Scenario Seismic Hazard Analysis - SSHA) είτε με την πιθανοτική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας (Probabilistic Seismic Hazard Analysis - PSHA). Η κύρια διαφορά μεταξύ αυτών των προσεγγίσεων είναι ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζουν την αβεβαιότητα που σχετίζεται με την πιθανότητα εμφάνισης μελλοντικών σεισμών ως προς το χρόνο, τον χώρο και την ένταση. Στην ανάλυση διακινδύνευσης σεναρίων (SSEA) τα χαρακτηριστικά του σεισμού, όπως η ένταση, η απόσταση από το επίκεντρο κ.λπ., θεωρούνται συγκεκριμένα και αντίστοιχα των σεναρίων που εξετάζονται και συνεπώς οι σχετικές αβεβαιότητες αγνοούνται. Η SSHA είναι απλή και εύκολη στην εφαρμογή και συνήθως λαμβάνει υπόψη το «χειρότερο» πιθανό σενάριο που επίκειται να επηρεάσει περισσότερο το εκάστοτε σημείο ενδιαφέροντος. Αντίθετα, η πιθανοτική ανάλυση σεισμικού κινδύνου (PSHA) συμπεριλαμβάνει τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με την εμφάνιση του σεισμού, με το κόστος υπολογισμού βέβαια να είναι μεγαλύτερο από τη SSHA, καθώς λαμβάνει υπόψη όλες τις πιθανές πηγές σεισμών σε μια περιοχή κατά τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου. Στο πλαίσιο του προγράμματος ο σεισμικός κίνδυνος θα αξιολογηθεί ακολουθώντας τις αρχές της PSHA, με βάση τρεις προσεγγίσεις: την κλασική PSHA, την ανάλυση σεισμικού κινδύνου με βάση συγκεκριμένα συμβάντα και τη διαδικασία αποάθροισης (Disaggregation) των αποτελεσμάτων της PSHA (Bazzurro και Cornell 1999, McGuire 2007). Η κλασική PSHA προσφέρει μια χρονικά ανεξάρτητη εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου που επιτρέπει την πραγματοποίηση συγκριτικής αξιολόγησης της επικινδυνότητας σε διαφορετικές τοποθεσίες. Αντίθετα, η αναλυτική προσέγγιση η οποία βασίζεται στα συμβάντα, προσομοιώνει σε βάση αυτά τη σεισμικότητα μιας περιοχής για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα όπως περιγράφεται από το μοντέλο σεισμικής πηγής. Η αναλυτική PSHA παρέχει χωρικά συσχετισμένες πληροφορίες για τον σεισμικό κίνδυνο, επομένως είναι πιο κατάλληλη για την αξιολόγηση της διακινδύνευσης πολλαπλών και πιθανώς συσχετισμένων κατασκευών οι οποίες είναι ευάλωτες στον σεισμικό κίνδυνο. Η ανάλυση από-άθροισης του σεισμικού κινδύνου είναι μια επέκταση της κλασικής PSHA και επιτρέπει την αναγνώριση του βαθμού στον οποίο σεισμοί με διαφορετικά επίκεντρα, εντάσεις κ.λπ. συμβάλλουν στον συνολικό σεισμικό κίνδυνο.

3.2 Πλαίσιο ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας

Η κλασική PSHA στοχεύει στον ποσοτικοποίηση της μέσης ετήσιας συχνότητας (Mean annual Frequency - MAF) υπέρβασης κάποιου επιπέδου σεισμικής έντασης, με βάση το μέτρο έντασης (Intensity Measure - IM, βλέπε PANOPTIS Consortium 2020, Kohrangi 2015) που κάθε φορά επιλέγεται. Λαμβάνει υπόψη τις ενσωματωμένες αβεβαιότητες στη σεισμική εμφάνιση, οι οποίες σχετίζονται με τη θέση θραύσης του ρήγματος, την ένταση του σεισμού, το ρυθμό εμφάνισης κ.λπ. Η κλασική PSHA μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα πέντε βήματα, τα οποία παρουσιάζονται και στο Σχήμα 8:

- Αναγνωρίζονται όλες οι πηγές που μπορούν να παραγάγουν ισχυρούς σεισμούς στη περιοχή ενδιαφέροντος, όπου βρίσκονται οι κατασκευές που μελετώνται. Συνήθως, στην ανάλυση περιλαμβάνονται δύο τύποι σεισμικών πηγών: τα διακριτά ρήγματα και οι σεισμικές περιοχές. Η πρώτη περίπτωση αφορά γνωστά/διακριτά ρήγματα τα οποία έχουν καθοριστεί με βάση παρελθοντικές παρατηρήσεις. Οι περιοχές χρησιμοποιούνται για να

μοντελοποιήσουν τη διανεμημένη σεισμικότητα σε μία περιοχή όπου οι θέσεις (ή ακόμα και ο αριθμός) των ρηγμάτων είναι πιο ασαφής, και έτσι λαμβάνουν υπόψη τη δυνατότητα να εμφανιστούν σεισμοί οπουδήποτε εντός της περιοχής. Στα πιο λεπτομερή μοντέλα σεισμικών πηγών που χρησιμοποιούνται στην κλασική PSHA λαμβάνονται υπόψη και οι δύο περιπτώσεις (Σχήμα 8a).

- Για κάθε σεισμική πηγή αναγνωρίζεται η κατανομή των εντάσεων των σεισμών που μπορεί να παραγάγει. Αυτή περιγράφει τον ετήσιο ρυθμό εμφάνισης σεισμών μεγαλύτερων ή ίσων από το μέγεθος m . Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 8b για μια κατανομή που ακολουθεί τον δεσμευμένο νόμο επανεμφάνισης Gutenberg-Richter, ο οποίος καθορίζει ένα ανώτατο όριο στο μέγεθος του σεισμού, ώστε να λάβει υπόψη τους φυσικούς περιορισμούς που επιβάλλονται από το πεπερασμένο μέγεθος του εκάστοτε ρήγματος.
- Για κάθε σεισμική πηγή αναγνωρίζεται η κατανομή της απόστασης της θέσης ενδιαφέροντος από την σεισμική πηγή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8c. Αφού οι σεισμικές πηγές έχουν καθοριστεί ήδη, η κατανομή της απόστασης μπορεί να υπολογιστεί γεωμετρικά υποθέτοντας ότι οι σεισμοί αναμένεται να συμβούν οπουδήποτε εντός της πηγής (ρήγμα ή περιοχή) με ίση πιθανότητα.
- Καθορίζεται η κατανομή της έντασης της κίνησης του εδάφους ως μια συνάρτηση των μεταβλητών του σεισμού, όπως η ένταση, η απόσταση, η παράμετρος έψιλον κ.λπ. Οι συναρτήσεις που περιγράφουν αυτήν την κατανομή είναι οι λεγόμενες εξισώσεις πρόβλεψης κίνησης του εδάφους (Ground Motion Prediction Equations - GMPEs). Συνήθως δημιουργούνται μέσω ανάλυσης παλαιότερων παρατηρήσεων πραγματικών σεισμών. Οι GMPEs παρέχουν τη στατιστική κατανομή της έντασης της κίνησης του εδάφους αντί για μονοσήμαντες προσδιοριστικές τιμές, πράγμα που επιτρέπει στα προγνωστικά μοντέλα να προβλέπουν τα άνω και κάτω όρια και όχι μόνο τις μέσες τιμές της εδαφικής κίνησης. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 8d, όπου η προσαρμοσμένη κατανομή αναπαρίσταται από τη μέση τιμή της (συνεχής γραμμή) και την τυπική απόκλιση (διπλές παύλες) του φυσικού λογαρίθμου των δεδομένων.
- Οι πληροφορίες από τα παραπάνω βήματα συνδυάζονται χρησιμοποιώντας το θεώρημα ολικής (total probability theorem), ώστε να υπολογιστεί η μέση ετήσια συχνότητα (MAF) υπέρβασης της έντασης κίνησης του εδάφους x ως εξής:

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{N_{srcs}} v_i \int_{M_{min}}^{M_{max,i}} \int_0^{R_{max,i}} P(IM > x | M, R, site) f_i(M, R) dM dR \quad (4)$$

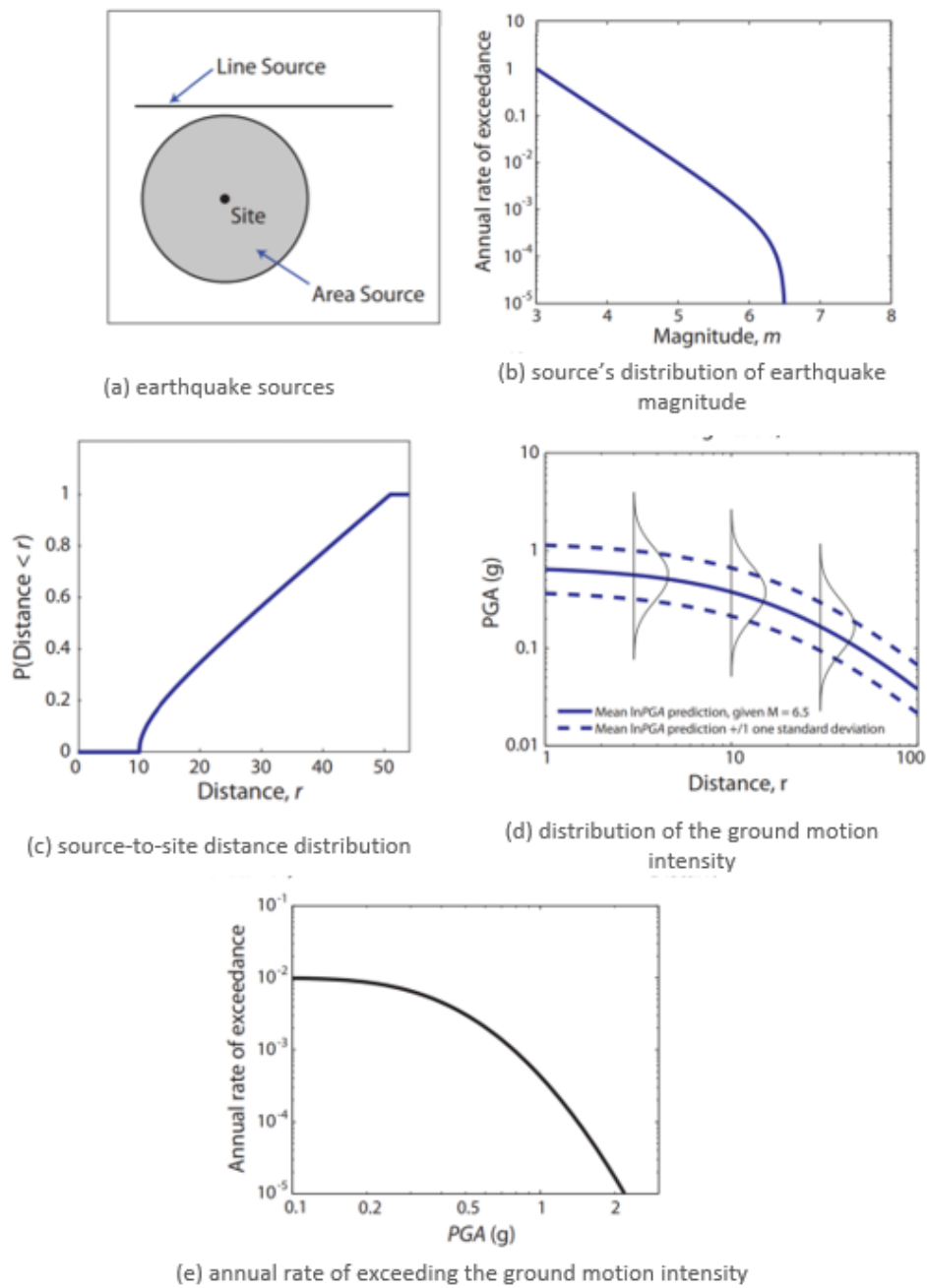
όπου N_{srcs} είναι ο αριθμός των σεισμικών πηγών, M είναι το μέγεθος ροπής του σεισμού, R είναι η απόσταση, $P(IM > x | M, R, site)$ είναι η πιθανότητα υπέρβασης της έντασης x δεδομένης της εμφάνισης ενός σεισμού με μέγεθος M , σε απόσταση R , $f_i(M, R)$ είναι η δεσμευμένη, με βάση την ένταση και την απόσταση, εξίσωση πυκνότητας πιθανότητας της πηγής i , $M_{max,i}$ είναι το μέγιστο μέγεθος ροπής της πηγής i και v_i είναι η ετήσια συχνότητα εμφάνισης συμβάντων με $m > M_{min}$ που προκαλούνται από πηγή i . Η συνάρτηση $\lambda(IM > x)$ είναι η λεγόμενη καμπύλη σεισμικού κινδύνου που παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 8e και παρέχει τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης του IM.

Η ανάλυση του σεισμικού κινδύνου με βάση τα συμβάντα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό στοχαστικών συνόλων συμβάντων (Stochastic Event Sets - SES) για μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος, καθένα από αυτά θα αντιπροσωπεύουν μια πιθανή ρεαλιστική απεικόνιση της σεισμικότητας που αφορά σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπως περιγράφεται από το μοντέλο σεισμικής πηγής. Τα SES είναι συνθετικοί κατάλογοι σεισμικών φαινομένων για τα οποία η

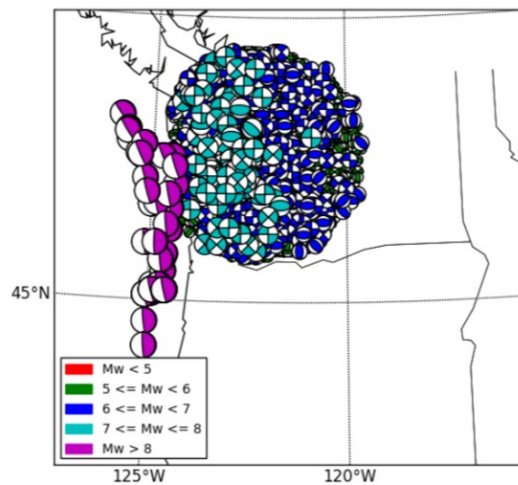
έντασή τους καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που συνεπάγονται από τις εξισώσεις πρόβλεψης κίνησης του εδάφους του μοντέλου σεισμικής πηγής. Για κάθε ρήγμα στο SES προκύπτουν αρκετά εναλλακτικά πεδία κίνησης του εδάφους, τα οποία αντιπροσωπεύουν διαφορετικές πραγματοποιήσεις των χωρικά κατανεμημένων τιμών IM που προκαλούνται από το συγκεκριμένο ρήγμα. Ένα παράδειγμα ενός SES παρουσιάζεται στο Σχήμα 9 για ένα διάστημα αναφοράς 10.000 ετών, όπου οι κύκλοι υποδεικνύουν την τοποθεσία του ρήγματος και το χρώμα υποδεικνύει το μέγεθος του σεισμού. Ένα παράδειγμα ενός χάρτη κίνησης του εδάφους παρουσιάζεται στο Σχήμα 10 με βάση μέγιστη επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους (Peak Ground Acceleration - PGA) ως μέτρο έντασης, δείχνοντας χωρικά συσχετισμένες τιμές της σεισμικής έντασης στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Σε αντίθεση με την κλασική PSHA που παρέχει μια ανεξάρτητη του χρόνου αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου, η ανάλυση με βάση τα συμβάντα διακρίνει τον κίνδυνο σε ξεχωριστά συμβάντα και επιτρέπει την εκτίμηση των ταυτόχρονων ζημιών σε πολλαπλές χωρικά κατανεμημένες κατασκευές. Αυτό καθιστά την ανάλυση με βάση τα συμβάντα την προτιμώμενη επιλογή για την αξιολόγηση της σεισμικής διακινδύνευσης, ειδικά σε περιπτώσεις χωρικά εκτεταμένων συστημάτων όπως ένα σύστημα ύδρευσης ή ένα δίκτυο μεταφορών. Παρόλο που η κλασική PSHA και η ανάλυση με βάση τα συμβάντα φαίνεται να είναι διαφορετικές, στην πραγματικότητα είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους, καθώς τα σεισμικά γεγονότα που παράγονται από τη δεύτερο θα πρέπει να είναι σε θέση να αναπαράγουν τις μέσες τιμές της πρώτης. Αυτό απαιτεί το βέβαια το διάστημα αναφοράς της ανάλυσης με βάση τα συμβάντα να είναι αρκετά μεγάλο, δηλαδή να μοντελοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός SES για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

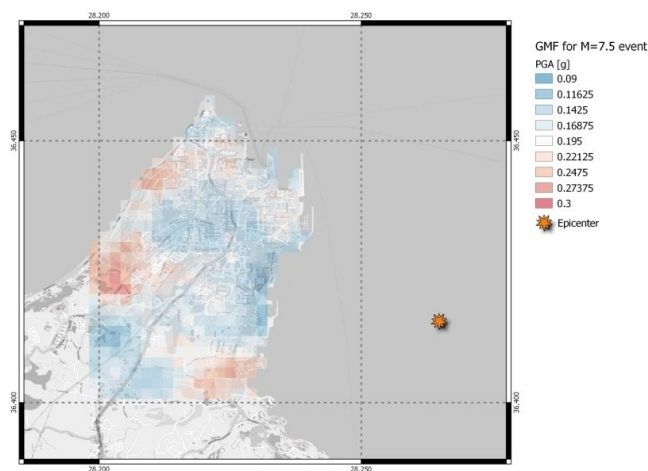
Ένα άλλο ζήτημα που αφορά στην κλασική PSHA, είναι πως συγκεντρώνει όλα τα σεισμικά σενάρια κατά τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου, με αποτέλεσμα να μην είναι απλό να προσδιοριστεί ποιο είναι το πιο πιθανό να προκαλέσει υπέρβαση μιας συγκεκριμένης έντασης π.χ. εδαφικής κίνησης του εδάφους. Για αυτόν τον λόγο, πραγματοποιείται ανάλυση αποάθροισης του σεισμικού κινδύνου για να προσδιοριστεί πώς διαφορετικές πηγές σεισμών και διαφορετικές σεισμικές εντάσεις συνεισφέρουν στο ρυθμό υπέρβασης μιας συγκεκριμένης έντασης εδαφικής κίνησης σε μία τοποθεσία. Η διακριτοποίηση αυτή πραγματοποιείται συνήθως ως προς το μέτρο έντασης του σεισμού, την απόσταση της σεισμικής πηγής από την τοποθεσία ενδιαφέροντος και συχνά την τιμή έψιλον (ϵ), που είναι μια μέτρηση της απόκλισης του μέσου από την προβλεπόμενη τιμή της εξίσωσης πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης. Ένα παράδειγμα αποτελεσμάτων ανάλυσης αποάθροισης παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 11, όπου η συνεισφορά διαφορετικών συνδυασμών σεισμικής έντασης-απόστασης ως προς τον σεισμικό κίνδυνο παρουσιάζεται σε αντιστοιχία με ομαδοποιημένες τιμές ίσων διαστημάτων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης από-άθροισης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή ενός αριθμού χρονοϊστοριών εδαφικής κίνησης που θα είναι συμβατές με τον σεισμικό κίνδυνο στη συγκεκριμένη τοποθεσία ενδιαφέροντος. Οι χρονοϊστορίες λειτουργούν ως σύνδεσμος μεταξύ της ανάλυσης της σεισμικής διακινδύνευσης και της πιθανοτικής ανάλυσης της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών. Ένας από τους πλέον ολοκληρωμένους τρόπους επιλογής χρονοϊστοριών εδαφικής κίνησης βασίζεται στο δεσμευμένο φάσμα (Conditional Spectrum, Lin et al. 2013, Kohrangi et al. 2017) που συχνά καθορίζεται για ένα μέσο σενάριο της αποάθροισης και χρησιμοποιείται ως το βασικό κριτήριο που καλείται να διασφαλίσει πως οι χρονοϊστορίες αυτές είναι συμβατές με τη σεισμικότητα της εν λόγω περιοχής.



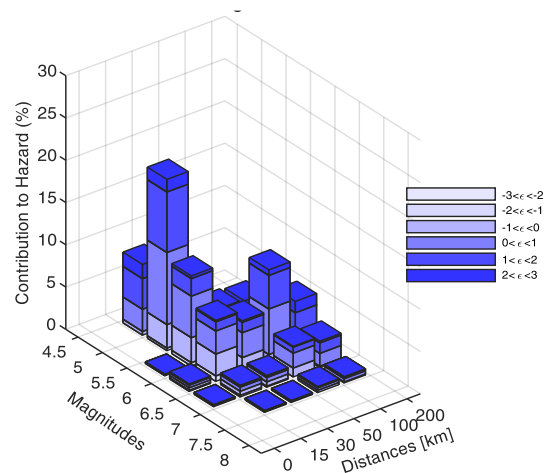
Σχήμα 8: Βήματα διαδικασίας PSHA (προσαρμοσμένο από Baker 2013)



Σχήμα 9: Ενδεικτικό παράδειγμα στοχαστικού συνόλου γεγονότων για μια διάρκεια 10.000 ετών. Τα χρώματα αντιπροσωπεύουν το μέγεθος του ρήγματος, ενώ η θέση των κύκλων δείχνει τη θέση του (προσαρμοσμένο από *Ragani et al. 2014*).



Σχήμα 10: Ενδεικτικό παράδειγμα σεισμικού χάρτη.



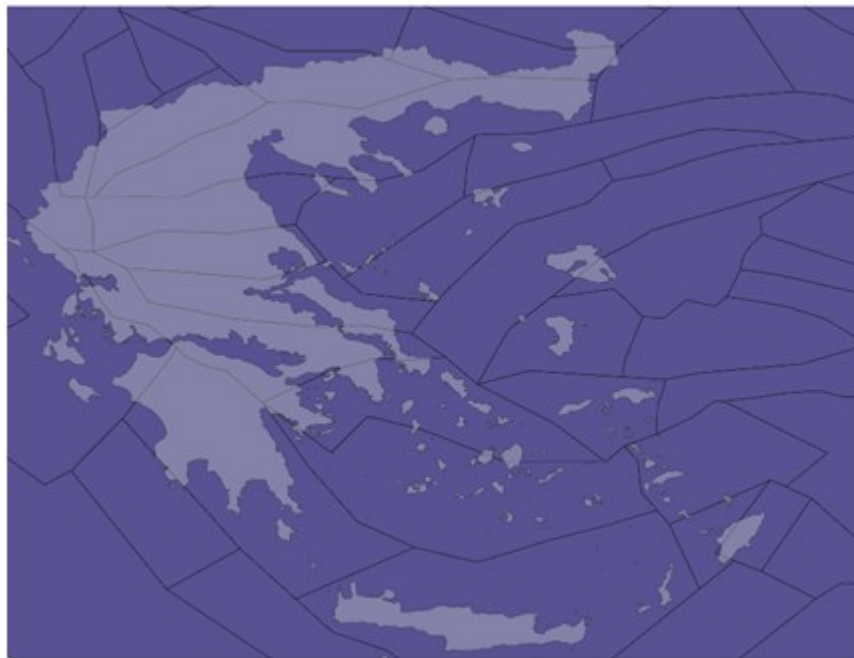
Σχήμα 11: Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεσμάτων της διαδικασίας από-άθροισης.

3.3 Μεθοδολογία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας

Η σεισμική επικινδυνότητα εκτιμάται μέσω της πλατφόρμας ανοικτού κώδικα OpenQuake (βλέπε GEM 2020), ενώ στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ως παράδειγμα η εφαρμογή της μεθοδολογίας για τη πόλη της Ρόδου. Το μοντέλο σεισμικής πηγής περιοχής SHARE (Giardini et al. 2013, Woessner et al. 2015, Hiemer et al. 2013) είναι αυτό που χρησιμοποιείται για την ανάλυση (Σχήμα 12) μαζί με την εξίσωση πρόβλεψης κίνησης του εδάφους που προτείνεται από τους Boore και Atkinson 2008. Ως IM επιλέγεται η μέση επιτάχυνση σε ένα διάστημα περιόδων του φάσματος, AvgSa, (Cordova et al. 2001, Vamvatsikos και Cornell 2005, Kazantzi και Vamvatsikos 2015) η οποία ορίζεται ως εξής:

$$AvgSa(T_{Ri}) = \left(\prod_{i=1}^n Sa(T_{Ri}) \right)^{1/n} \quad (5)$$

όπου T_{Ri} οι περίοδοι που λαμβάνονται υπόψη. Ενώ υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος της επιτάχυνσης φάσματος με 5% απόσβεση λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο οριζόντιες συνιστώσες. Στο παράδειγμα, υιοθετείται το εύρος περιόδου [0,2, 2,0] sec, με βήμα αύξησης 0,1 sec. Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, (Peak Ground Acceleration - PGA), καθώς και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity – PGV), χρησιμοποιούνται επίσης ως επιπλέον IMs.



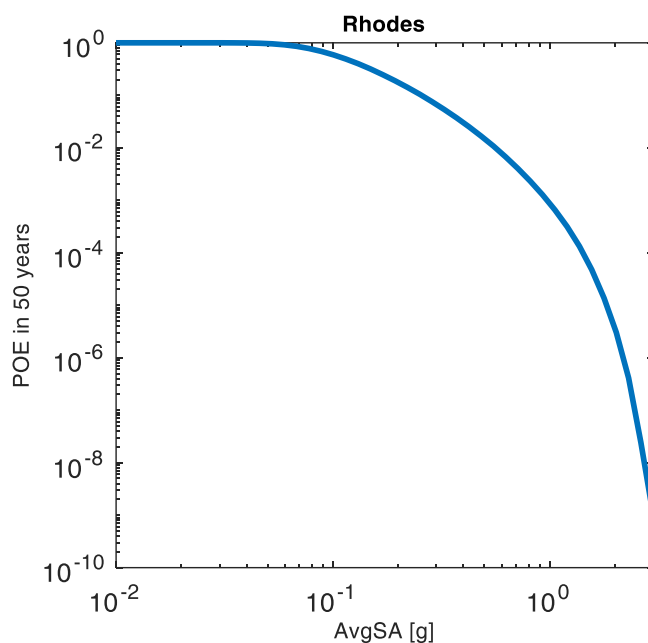
Σχήμα 12: Το μοντέλο σεισμικών πηγών περιοχής του έργου SHARE που υιοθετήθηκε για την ανάλυση του σεισμικού κινδύνου του παραδείγματος για τοποθεσία στην Ελλάδα.

Το κλασικό PSHA πραγματοποιείται για 3 σεισμικά ενεργές περιοχές κοντά στη πόλη της Ρόδου προκειμένου να υπολογιστούν οι καμπύλες σεισμικού κινδύνου. Τα αποτελέσματα για τη Ρόδο παρουσιάζονται στο Σχήμα 13, ως προς το AvgSa. Χαρακτηριστικές τιμές του AvgSa που αντιστοιχούν σε πιθανότητες υπέρβασης π.χ. του 2%, 10% ή 30% (μεταξύ άλλων), σε $T = 50$ χρόνια, ή ισοδύναμα τα

MAF = $-\ln(1-P) / T=0.0004$, 0.0021 και 0.0044, περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1 μαζί με επιπλέον σημαντικά στοιχεία/αποτελέσματα της ανάλυσης της σεισμικότητας της περιοχής ενδιαφέροντος.

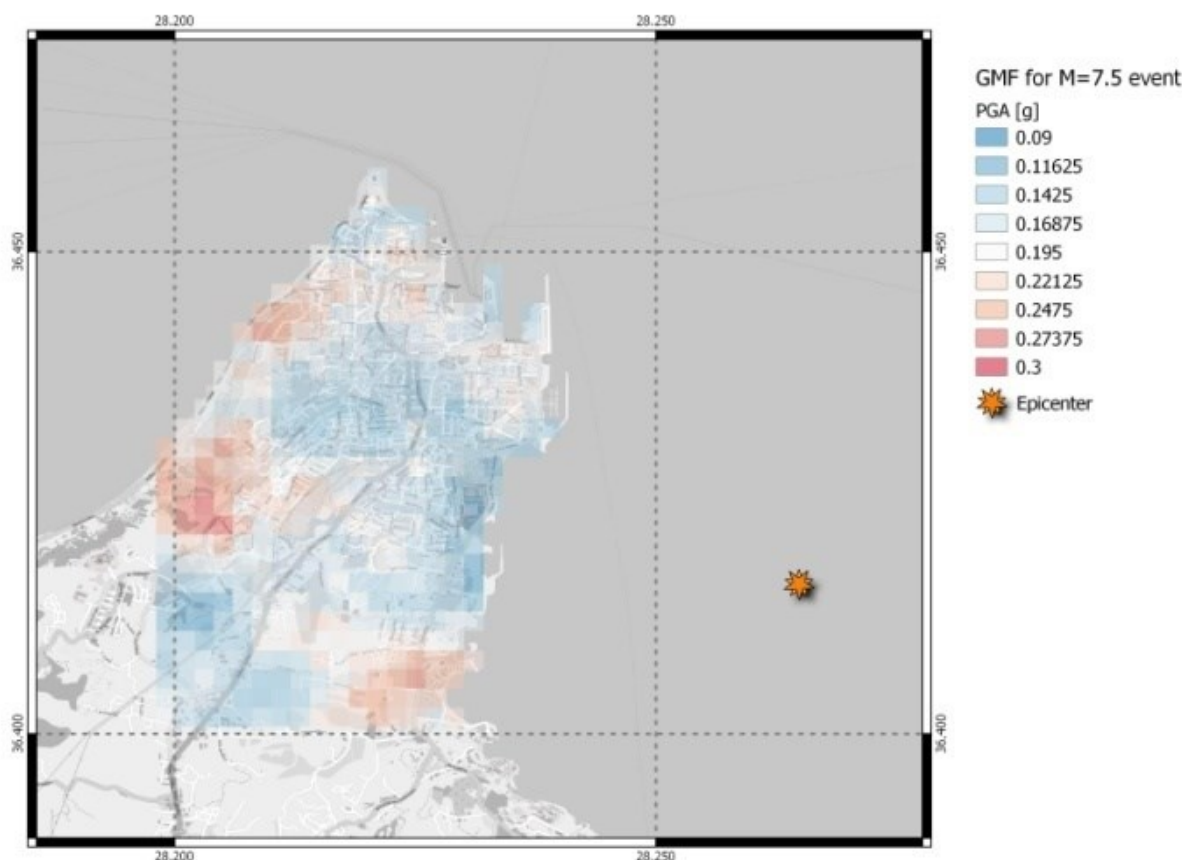
Πίνακας 1: Τιμές επιλεγμένου IM, μέσου σεισμικού μεγέθους ροπής, απόσταση από το ρήγμα, και απόκλιση epsilon για τη περιοχή της Ρόδου.

IM Level	% in 50 years	Rhodes			
		AvgSA [g]	$\bar{M}$	$\bar{R}$ [km]	$\bar{\epsilon}$
1	70	0.087	6.59	80.26	1.08
2	50	0.113	6.70	77.00	1.13
3	30	0.154	6.82	73.78	1.19
4	10	0.256	7.05	69.84	1.35
5	5	0.334	7.17	68.53	1.47
6	2	0.456	7.30	67.60	1.67
7	1.5	0.498	7.34	67.46	1.73
8	1	0.561	7.39	67.32	1.82
9	0.6	0.644	7.44	67.26	1.93
10	0.2	0.839	7.55	67.45	2.17



Σχήμα 13: Καμπύλη σεισμικού κινδύνου υπολογισμένη για τη περιοχή της Ρόδου, ως προς τη μέση φασματική επιτάχυνση, AvgSa. Η καμπύλη κινδύνου προκύπτει χρησιμοποιώντας το μοντέλο σεισμικής πηγής SHARE και το GMPE BA08 [83].

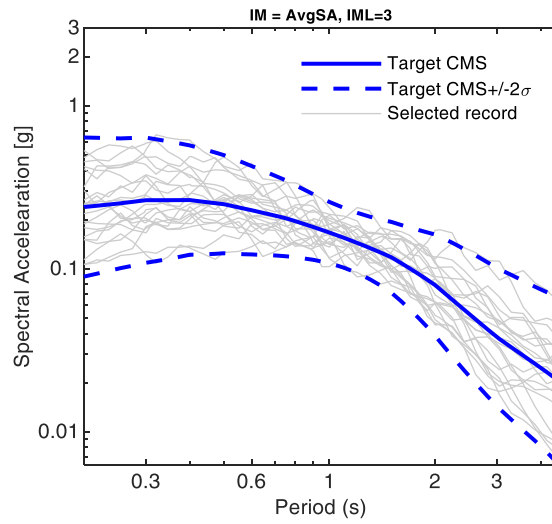
Η ανάλυση σεισμικού κινδύνου με βάση τα διαφορετικά γεγονότα πραγματοποιείται επίσης για τη Ρόδο, ενώ προσδιορίστηκαν τα SES καθώς και οι αντίστοιχοι σεισμικοί χάρτες. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 14.



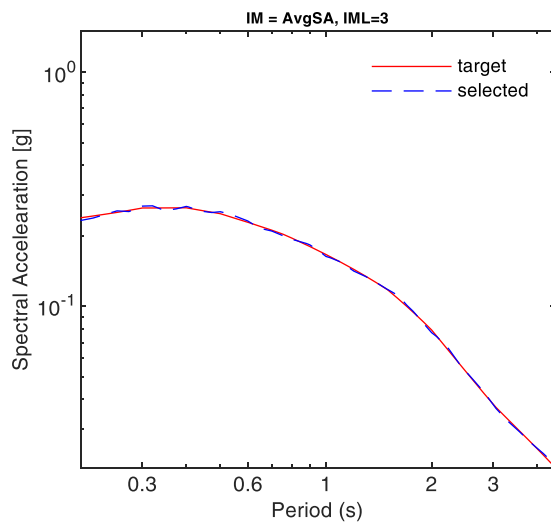
Σχήμα 14: Σεισμικός χάρτης του της Ρόδου ο οποίος δείχνει χωρικά συσχετισμένες τιμές της σεισμικής έντασης με χρήση της μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (για ένταση σεισμού 7.5).

Στη συνέχεια τα τελικά αποτελέσματα για τη Ρόδο παρουσιάζονται για τρία επίπεδα κινδύνου, δηλαδή εκείνα με πιθανότητα υπέρβασης 30%, 10% και 2% σε 50 χρόνια, εφεξής αναφερόμενα ως 30%/50ετ, 10%/50ετ και 2%/50ετ, αντίστοιχα, ενώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 14 έως 19. Αντίστοιχα τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποάθροισης για τις ίδιες πιθανότητες υπέρβασης εμφανίζονται στα Σχήματα 16, 18 και 20 αντίστοιχα. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, επιλέγεται ένα σύνολο 21 σεισμικών καταγραφών που είναι συμβατές με το που καθορίζεται για το μέσο σενάριο από-άθροισης. Το δεσμευμένο φάσμα που αφορά στη περιοχή καθώς και τα φάσματα των 21 επιλεγμένων καταγραφών για τη Ρόδο φαίνονται στα Σχήματα 15, 17 και 19, ενώ οι επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές που επιλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων NGA-West (Ancheta et al. 2014) εμφανίζονται στους Πίνακες 2,3 και 4 αντίστοιχα μαζί με τους κατάλληλους συντελεστές κλιμάκωσης με τους οποίους πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι τιμές των χρονοϊστοριών για να αντιστοιχούν στο αντίστοιχο επίπεδο κινδύνου που προσδιορίστηκε.

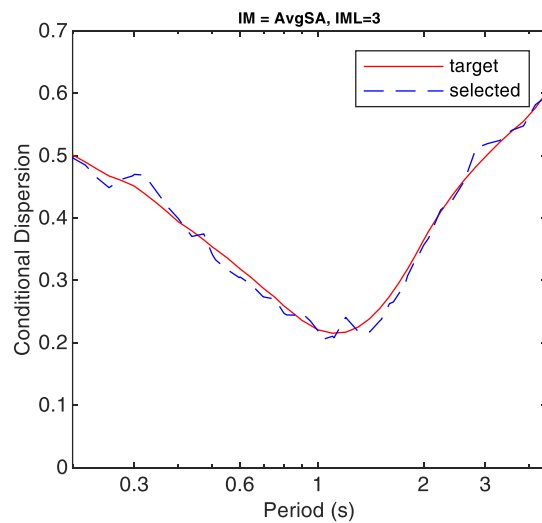
Hazard level: 30%/50yr



(a) response spectra

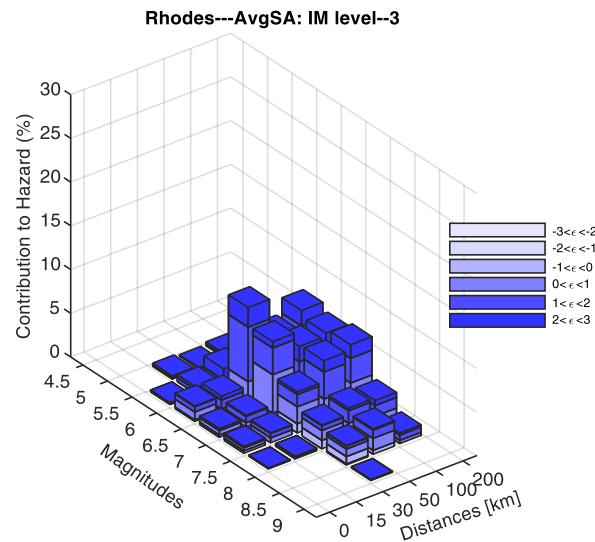


(b) target and sample means



(c) target and sample standard deviations

Σχήμα 15: 21 επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές για το επίπεδο κινδύνου 30%/50έτη για τη Ρόδο, Ελλάδα.

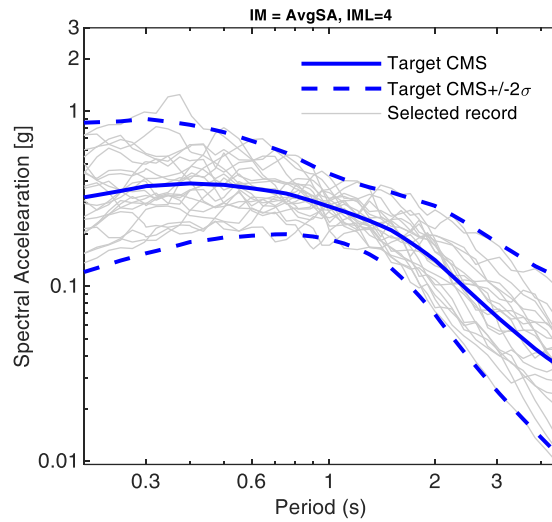


Σχήμα 16: Αποτελέσματα ανάλυσης από-άθροισης για το επίπεδο κινδύνου 30%/50έτη που δείχνουν τη συμβολή των συνδυασμών μεγέθους, απόστασης και ϵ , στον σεισμικό κίνδυνο για τη Ρόδο.

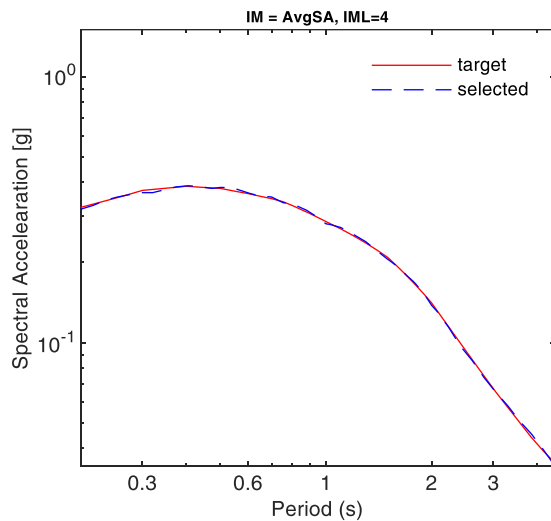
Πίνακας 2: Ονόματα των 21 επιλεγμένων σεισμικών καταγραφών από τη βάση δεδομένων NGA-West για το επίπεδο κινδύνου 30%/50έτη για τη Ρόδο.

Record names per the NGA-West [87] database		Scale factor
X	Y	
'CHICHI/TAP094-N.at2'	'CHICHI/TAP094-E.at2'	0,96
'CHICHI/TTN044-N.at2'	'CHICHI/TTN044-W.at2'	1,53
'SFERN/SBF042.at2'	'SFERN/SBF132.at2'	4,47
'CHICHI06/ILA055-N.at2'	'CHICHI06/ILA055-W.at2'	4,35
'HECTOR/11625090.at2'	'HECTOR/11625180.at2'	0,94
'CHICHI/ILA052-E.at2'	'CHICHI/ILA052-N.at2'	3,04
'NORTHR/VEN090.at2'	'NORTHR/VEN360.at2'	1,13
'CHICHI06/KAU064-N.at2'	'CHICHI06/KAU064-E.at2'	3,46
'CHICHI/CHY086-E.at2'	'CHICHI/CHY086-N.at2'	0,77
'VICT/CPE045.at2'	'VICT/CPE315.at2'	0,50
'LANDERS/SER000.at2'	'LANDERS/SER270.at2'	2,64
'CHICHI05/ILA012-N.at2'	'CHICHI05/ILA012-W.at2'	4,00
'COALINGA/H-VC2000.at2'	'COALINGA/H-VC2090.at2'	1,70
'COALINGA/H-C02000.at2'	'COALINGA/H-C02090.at2'	1,07
'DUZCE/1062-N.at2'	'DUZCE/1062-E.at2'	1,08
'CHICHI/HWA026-E.at2'	'CHICHI/HWA026-N.at2'	1,63
'CHICHI06/CHY114-N.at2'	'CHICHI06/CHY114-W.at2'	2,58
'NORTHR/TAR090.at2'	'NORTHR/TAR360.at2'	0,18
'LANDERS/FTI000.at2'	'LANDERS/FTI090.at2'	1,64
'CHICHI05/HWA041-N.at2'	'CHICHI05/HWA041-E.at2'	2,00
'HECTOR/22170090.at2'	'HECTOR/22170360.at2'	0,72

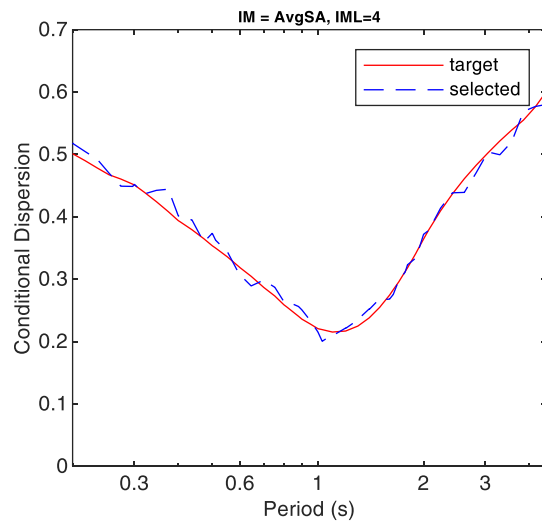
Hazard level: 10%/50yr



(a) response spectra

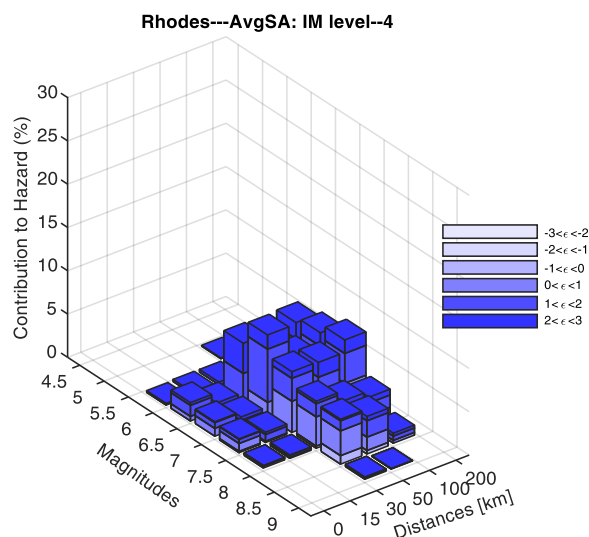


(b) target and sample means



(c) target and sample standard deviations

Σχήμα 17: 21 επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές για το επίπεδο κινδύνου 10%/50έτη για τη Ρόδο.

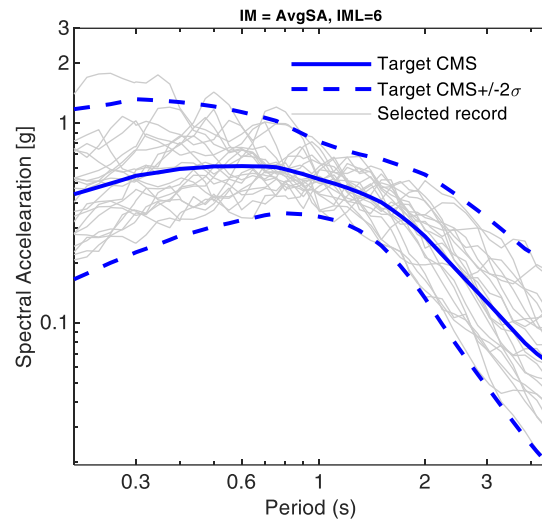


Σχήμα 18: Αποτελέσματα ανάλυσης αποάθροισης για το επίπεδο κινδύνου 10%/50έτη που δείχνουν τη συμβολή των συνδυασμών μεγέθους, απόστασης και ϵ , στον σεισμικό κίνδυνο για τη Ρόδο.

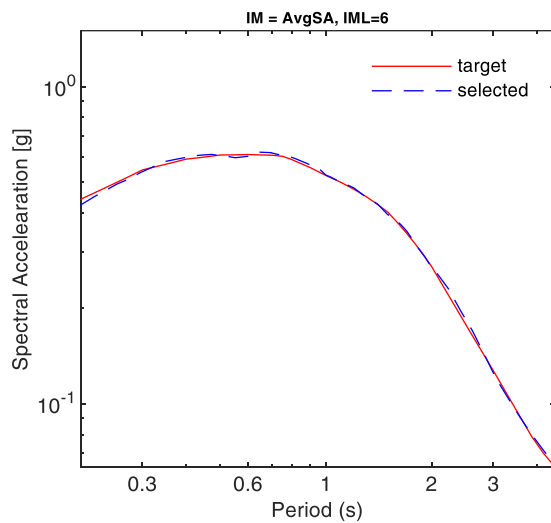
Πίνακας 3: Ονόματα των 21 επιλεγμένων σεισμικών καταγραφών από τη βάση δεδομένων NGA-West για το επίπεδο κινδύνου 10%/50έτη για τη Ρόδο.

Record names per the NGA-West [87] database		Scale factor
X	Y	
'NENANA/1736090.at2'	'NENANA/1736360.at2'	9,40
'CHICHI05/TTN008-N.at2'	'CHICHI05/TTN008-E.at2'	6,73
'CHICHI/CHY039-E.at2'	'CHICHI/CHY039-N.at2'	1,18
'CHICHI/TTN004-N.at2'	'CHICHI/TTN004-W.at2'	2,75
'CHICHI/STY-E.at2'	'CHICHI/STY-N.at2'	4,83
'HECTOR/11625090.at2'	'HECTOR/11625180.at2'	1,57
'CHICHI/KAU022-E.at2'	'CHICHI/KAU022-N.at2'	3,59
'CHICHI05/KAU087-N.at2'	'CHICHI05/KAU087-W.at2'	4,90
'LIVERMOR/B-FRE075.at2'	'LIVERMOR/B-FRE345.at2'	6,29
'CHICHI05/CHY088-N.at2'	'CHICHI05/CHY088-E.at2'	3,11
'CHICHI04/KAU074-N.at2'	'CHICHI04/KAU074-E.at2'	9,06
'LOMAP/DFS270.at2'	'LOMAP/DFS360.at2'	1,82
'CHICHI06/HWA014-N.at2'	'CHICHI06/HWA014-E.at2'	2,83
'CHICHI05/ILA012-N.at2'	'CHICHI05/ILA012-W.at2'	6,68
'CHICHI/ILA064-N.at2'	'CHICHI/ILA064-W.at2'	3,24
'CHICHI/CHY086-E.at2'	'CHICHI/CHY086-N.at2'	1,28
'CHICHI/KAU058-E.at2'	'CHICHI/KAU058-N.at2'	4,55
'CHICHI04/CHY052-N.at2'	'CHICHI04/CHY052-W.at2'	5,81
'NORTHR/LBR000.at2'	'NORTHR/LBR090.at2'	3,03
'NORTHR/SBG000.at2'	'NORTHR/SBG090.at2'	2,90
'KOBE/FUK000.at2'	'KOBE/FUK090.at2'	3,73

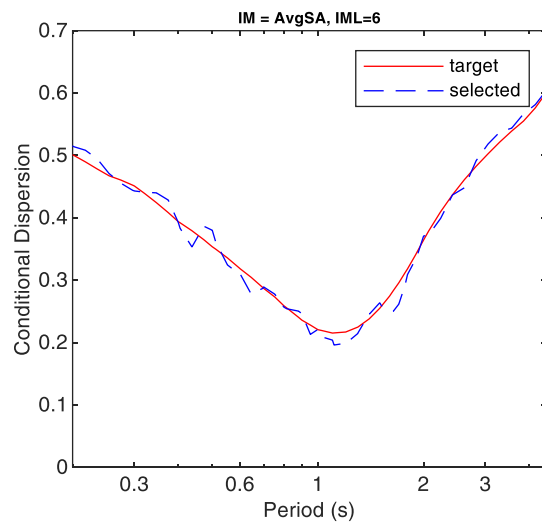
Hazard level: 2%/50yr



(a) response spectra

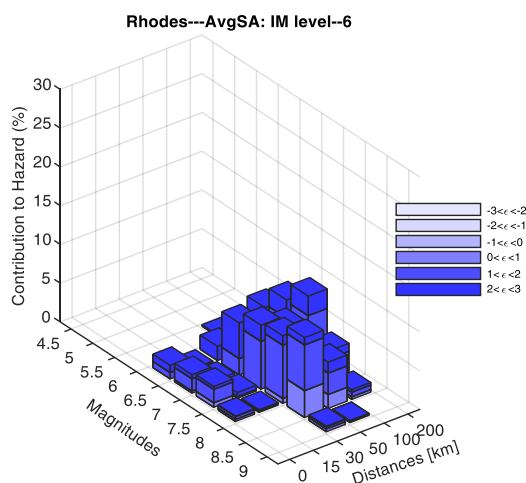


(b) target and sample means



(c) target and sample standard deviations

Σχήμα 19: 21 επιλεγμένες σεισμικές καταγραφές για το επίπεδο κινδύνου 2%/50έτη για τη Ρόδο.



Σχήμα 20: Αποτελέσματα ανάλυσης από-άθροισης για το επίπεδο κινδύνου 2%/50έτη που δείχνουν τη συμβολή των συνδυασμών μεγέθους, απόστασης και ϵ , στον σεισμικό κίνδυνο για τη Ρόδο.

Πίνακας 4: Ονόματα των 21 επιλεγμένων σεισμικών καταγραφών από τη βάση δεδομένων NGA-West για το επίπεδο κινδύνου 2%/50έτη για τη Ρόδο.

Record names per the NGA-West [87] database		Scale factor
X	Y	
'CHICHI/KAU033-E.at2'	'CHICHI/KAU033-N.at2'	8,04
'CHICHI/KAU074-E.at2'	'CHICHI/KAU074-N.at2'	5,73
'CHICHI05/KAU030-N.at2'	'CHICHI05/KAU030-E.at2'	7,78
'CHICHI06/ILA007-N.at2'	'CHICHI06/ILA007-W.at2'	9,43
'CHICHI/TTN010-E.at2'	'CHICHI/TTN010-N.at2'	8,00
'CHICHI/ILA044-N.at2'	'CHICHI/ILA044-W.at2'	2,49
'CHICHI/KAU022-E.at2'	'CHICHI/KAU022-N.at2'	6,39
'CHICHI/KAU073-E.at2'	'CHICHI/KAU073-N.at2'	6,28
'LOMAP/OLEM000.at2'	'LOMAP/OLEM090.at2'	2,39
'ITALY/A-TRC000.at2'	'ITALY/A-TRC270.at2'	7,98
'CHICHI06/KAU012-N.at2'	'CHICHI06/KAU012-E.at2'	8,89
'CHICHI05/TTN009-N.at2'	'CHICHI05/TTN009-E.at2'	10,00
'SMART1/25E01EW.at2'	'SMART1/25E01NS.at2'	9,08
'HECTOR/1442c090.at2'	'HECTOR/1442a360.at2'	7,94
'KOBE/TAZ000.at2'	'KOBE/TAZ090.at2'	0,51
'CHICHI/CHY086-E.at2'	'CHICHI/CHY086-N.at2'	2,28
'CHICHI/HSN-E.at2'	'CHICHI/HSN-N.at2'	3,06
'CHICHI03/CHY041-N.at2'	'CHICHI03/CHY041-E.at2'	5,34
'HECTOR/0292c090.at2'	'HECTOR/0292a360.at2'	9,58
'KOBE/KJM000.at2'	'KOBE/KJM090.at2'	0,51
'CHICHI06/TTN044-N.at2'	'CHICHI06/TTN044-W.at2'	8,11

4 Συμπεράσματα

Η ανάλυση της διακινδύνευσης απαιτεί μια λογική και συνάμα αντιπροσωπευτική ποσοτικοποίηση του κινδύνου που αφορά είτε σε πιθανά ακραία καιρικά φαινόμενα είτε σε πιθανά σεισμικά γεγονότα σε μια περιοχή. Στο πλαίσιο λοιπόν του TwinCity αξιοποιούνται και αναπτύσσονται καινοτόμες μεθοδολογίες για την εύρεση των παραμέτρων και των χαρακτηριστικών των εκάστοτε δράσεων, πράγμα που θα επιτρέψει στον μελετητή να εκτιμήσει την διακινδύνευση των κατασκευών ενδιαφέροντος.

Για τη εκτίμηση του κινδύνου σε όρους καιρικών φαινομένων αναπτύσσεται μια μεθοδολογία κατά την οποία οι κλιματικές παράμετροι προκύπτουν από τη βάση δεδομένων πρόβλεψης Euro-CORDEX σε συνδυασμό με πραγματικές ιστορικές μετρήσεις σε μετεωρολογικούς σταθμούς. Η πιο χαρακτηριστική καινοτομία είναι οι χρονοϊστορίες ανέμου τύπου Frankenstein που συνδυάζουν τα παραπάνω δεδομένα ώστε να παραγάγουν τεχνητές χρονοϊστορίες, με χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα σε όρους αναλύσεων, ως δράσεις στα μοντέλα των κατασκευών που εξετάζονται.

Αντίστοιχα ο κίνδυνος σεισμού μπορεί να αξιολογηθεί με δύο προσεγγίσεις: την ανάλυση διακινδύνευσης ανά σενάριο, και τη πιθανοτική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας. Ο στόχος και εδώ είναι να προσδιοριστούν οι σεισμικές δράσεις που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να αξιολογηθεί η διακινδύνευση των κατασκευών στη περιοχή ενδιαφέροντος. Το σημαντικότερο σημείο λοιπόν των αναλύσεων αυτών είναι η επιλογή σεισμικών καταγραφών, εδώ από τη βάση δεδομένων NGA-West, συμβατών με τη περιοχή όπου βρίσκονται οι κατασκευές που εξετάζονται, για διαφορετικά επίπεδα κινδύνου και περιόδους επαναφοράς. Με τις σεισμικές αυτές καταγραφές και πάλι δίνεται η δυνατότητα να αξιοποιηθούν αυτές άμεσα, ως δράσεις στις αναλύσεις των κατασκευών ενδιαφέροντος.

5 Βιβλιογραφία

- Addor N, Seibert J (2014). Bias correction for hydrological impact studies—beyond the daily perspective. *Hydrological Processes*, 28(17), 4823-4828. DOI: 10.1002/hyp.10238
- Ancheta TD, Darragh RB, Stewart JP, Seyhan E, Silva WJ, Chiou BSJ, Wooddell KE, Graves RW, Kottke AR, Boore DM. Kishida T (2014). NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*, 30(3), 989-1005.
- Bazzurro P, Cornell CA (1999). Disaggregation of Seismic Hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(2), 501-520.
- Boore DM, Atkinson GM (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 99-138.
- Chatzidaki A (2023). Risk and resilience assessment of highways under multiple natural hazards. PhD Thesis, National Technical University of Athens (NTUA), Greece.
- Chatzidaki A, Vamvatsikos D, Barmpas F, Hellsten A, Auvinen M, Tsegas G. (2024). Correlated spatiotemporal downscaling of Euro-CORDEX climatic data for infrastructure resilience assessment. *International Journal of Climatology*, 44(10): 3380–3404. DOI: 10.1002/joc.8529
- Christensen JH, Kjellström E, Giorgi F, Lenderink G, Rummukainen M (2010). Weight assignment in regional climate models. *Climate Research*, 44, 179-194. DOI: 10.3354/cr00916
- Cordova P, Deierlein G, Mehanny SF, Cornell CA (2001). Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure. The Second U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Sapporo, Hokkaido, Japan.
- Dehn M (1999) Application of an analog downscaling technique to the assessment of future landslide activity—a case study in the Italian Alps. *Climate Research*, 13(2), 103–113. DOI: 10.3354/cr013103
- Der Kiureghian A, Ditlevsen O (2009). Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural safety*, 31(2), 105-112. DOI: 10.1016/j.strusafe.2008.06.020
- Dudhia J (2014). A history of mesoscale model development. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50, 121-131. DOI: 10.1007/s13143-014-0031-8
- GEM (2020). The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.10.1. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.10.1.
- Giardini D, Woessner J, Danciu L, Crowley H, Cotton F, Grünthal G et al. (2013). Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource, <http://www.share-eu.org/node/61.html>, doi: 10.12686/SED-00000001-SHARE, 2013.
- Hawkins E, Sutton R (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 1095-1107. DOI: 10.1175/2009BAMS2607.1
- Hawkins E, Sutton R (2011). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, 37, 407-418, DOI: 10.1007/s00382-010-0810-6

Hiemer, S., Jackson, D.D., Wang, Q. et al., (2013). A stochastic forecast of California earthquakes based on fault slip and smoothed seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A): 799–810. doi:10.1785/0120120168.

Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, et al. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Changes*, 14(2), 563-578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2

Kazantzi AK, Vamvatsikos D (2015). Intensity measure selection for vulnerability studies of building classes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 44(15), 2677-2694.

Knutti R (2010). The end of model democracy? An editorial comment. *Climatic Change*, 102(3-4), 395-404. DOI: 10.1007/s10584-010-9800-2

Kohrangi M. (2015). Beyond simple scalar ground motion intensity measures for seismic risk assessment. PhD Thesis, University of Pavia, Italy.

Kohrangi M, Bazzurro P, Vamvatsikos D, Spillatura A (2017). Conditional spectrum based ground motion record selection using average spectral acceleration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(10):1667-1685. DOI: 10.1002/eqe.2876.

Lin T, Haselton CB, Baker JW (2013). Conditional spectrum-based ground motion selection. Part I: Hazard consistency for risk-based assessments. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 42(12), 1847-1865. DOI: 10.1002/eqe.2301.

McGuire RK (2007). Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(3), 329-338.

Moss RH, Babiker M, Brinkman S et al. (2008). Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies (No. PNNL-SA-63186). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).

Pagani M, Monelli D, Weatherill GA, Garcia J (2014). The OpenQuake-engine Book: Hazard. Global Earthquake Model (GEM) Technical Report 2014-08, doi: 10.13117/-GEM.OPENQUAKE.TR2014.08.

PANOPTIS Consortium (2020): Deliverable D4.7: D4.3.2 Multi-Hazard Vulnerability Modules for RI and related non-RI elements – V2. URL: https://panoptis.eu/wp-content/uploads/2018/Deliverables/D4.3.2_Multi-Hazard_Vulnerability_Modules_for_RI_and_related_non-RI_elements_V2.pdf

Semenov MA, Stratonovitch P (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41(1), 1-14. DOI: 10.3354/cr00836

Shu C, Wang L, Mortezaazadeh M (2020). Dimensional analysis of Reynolds independence and regional critical Reynolds numbers for urban aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 203. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104232

Vamvatsikos D, Cornell CA (2005). Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(13), 1573-1600.

Woessner J, Danciu L, Giardini D, Crowley H, Cotton F, Grünthal G et al, (2015). The 2013 European seismic hazard model: key components and results. *Bulletin of Earthquake Engineering* 13(12): 3553–3596.

Zorita, E. & Von Storch, H. (1999) The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *Journal of Climate*, 12(8), 2474–2489. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2474:TAMAAS>2.0.CO;2