



D4.2

Multi-hazard vulnerability modules

Μονάδες τρωτότητας υπό πολλαπλή
επικινδυνότητα

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	OTHER
Work package	WP4 – Vulnerability & physical impact assessment
Deliverable number	D4.2 Multi-hazard vulnerability modules
Status - version, date	Final – V1.0
Deliverable leader	A. Gerontati
Contractual date of delivery	31/07/2023

Ποιοτικός έλεγχος

	Name	Organisation	Date
Peer review 1	Δ. Βαμβάτσικος	ΕΜΠ	02/04/2023
Peer review 2	Β. Μελισσιανός	ΕΜΠ	05/05/2023

Ιστορικό παραδοτέου

Version	Date	Author	Summary of changes
0.1	04/03/2023	A. Γεροντάτη	Πρώτο προσχέδιο εγγράφου
1.0	01/06/2023	A. Γεροντάτη	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 Γενικές πληροφορίες.....	7
1.2 Σκοπός	7
1.3 Χρήσιμοι ορισμοί	7
2 Μεθοδολογία.....	8
2.1 Μέτρο έντασης.....	8
2.2 Μέτρο δομικής απόκρισης.....	9
2.3 Σχέση μέτρου έντασης απόκρισης	9
3 Πλαίσιο σεισμικής μηχανικής βάσει επιτελεστικότητας.....	11
3.1 Καμπύλες τρωτότητας.....	11
3.2 Καμπύλες απωλειών	13
4 Ανάλυση κατασκευών.....	16
4.1 Κατασκευές στη Ρόδο	16
4.2 Δίκτυο συγκοινωνιών	18
4.3 Δίκτυο ύδρευσης και αποχέτευσης	19
4.4 Δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	19
4.5 Πύργοι τηλεπικοινωνιών.....	21
4.6 Τερματικός σταθμός αεροδρομίου Ρόδου	23
(α)	24
(β)	24
5 Περιγραφή των ΜΗVM	25
5.1 Αρχείο Metadata	26
5.2 Αρχείο MSA	31
6 Συμπεράσματα	33
7 Βιβλιογραφία	33

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Αποτελέσματα single-stripe analysis (Cornell and Jalayer 2002).	10
Σχήμα 2: (α) Αποτελέσματα MSA για πολλαπλές σεισμικές καταγραφές και (β) κλιμακούμενες σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιούνται για να ληφθούν τα ζεύγη μέτρου έντασης-απόκρισης που υποδεικνύονται με κύκλους.	10
Σχήμα 3: Ανάλυση κινδύνου φυσικής καταστροφής (Porter 2019).	11
Σχήμα 4: Καμπύλες τρωτότητας για τρεις διαδοχικές οριακές καταστάσεις. Οι μαύρες γραμμές βέλους υποδεικνύουν την πιθανότητα η κατασκευή να βρίσκεται σε κάθε κατάσταση βλάβης για δεδομένη τιμή του IM.	12
Σχήμα 5: Παράδειγμα αποτελεσμάτων MSA και (β) διακριτή έναντι καμπύλης τρωτότητας κατάρρευσης (Baker 2015).	13
Σχήμα 6: Πλαίσιο αναλυτικής εκτίμησης των απωλειών μιας κατασκευής (Porter 2019).	13
Σχήμα 7: Παράδειγμα αξιολόγησης απωλειών δεδομένης της τρωτότητας και των συνεπειών (D'Ayala et al. 2015).	15
Σχήμα 8: Μέση, 16% και 84% των καμπυλών τρωτότητας σε όρους κόστους που υπολογίζεται με χρήση πιθανολογικών κατανομών κόστους.	15
Σχήμα 9: Αριστερά: Κρίσιμα μέρη του συγκοινωνιακού δικτύου της Ρόδου. Δεξιά: Πλημμύρες που διαταράσσουν την πρόσβαση στο αεροδρόμιο (γέφυρα Κρεμαστής).	19
Σχήμα 10: (α) Κρίσιμα στοιχεία του δικτύου ύδρευσης και αποχέτευσης της Ρόδου, (β) αστοχία γραμμών διανομής νερού	19
Σχήμα 11: (α) Επίπαγος στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και (β) Κατάρρευση της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω επίπαγου	20
Σχήμα 12: Αστοχία στύλων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (Vivek et al. 2017)	21
Σχήμα 13: Βλάβες σε ηλεκτρικούς υποσταθμούς και εξαρτήματά τους από σεισμούς (Liu et al. 2012).	21
Σχήμα 14: Συσσώρευση επίπαγου στον πύργο (Sundin and Makkonen 1998).	22
Σχήμα 15: Ενίσχυση υφιστάμενων μελών.	23
Σχήμα 16: (α) Κάτοψη αεροδρομίου και (β) κτίρια αεροδρομίου της Ρόδου.	24
Σχήμα 17: Εκτίμηση πριν από το συμβάν για «όλα» τα πιθανά σενάρια της για τη περιοχή μελέτης συνδυάζοντας το MHVM με τα πεδία μέτρησης έντασης.	25
Σχήμα 18: Παράδειγμα τυπικού αρχείου μεταδεδομένων για κατασκευές μέσω της προσέγγισης βασισμένης στα επιμέρους στοιχεία.	26
Σχήμα 19: Παράδειγμα τυπικού σχήματος σειριακής αρίθμησης και περιγραφής στοιχείων για μια γέφυρα (αποθηκευμένο στο πεδίο .SerialNumberingFig του αρχείου asset_name.mtdata.mat).	27
Σχήμα 20: Παράδειγμα ορισμού δεδομένων στοιχείου για μια γέφυρα (asset_name.mtdata.mat, .ComponentsData πεδίο).	28
Σχήμα 21: Παράδειγμα (α) καταστάσεων βλάβης (DS) και (β) ορισμού καμπυλών τρωτότητας για ένα στοιχείο (fragpar) (πεδίο asset_name.mtdata.mat, .ComponentsData.DS και .ComponentsData.fragpar).	28
Σχήμα 22: Παράδειγμα ορισμού μονάδων των καμπυλών συνέπειας (asset_name.mtdata.mat, πεδίο .Units).	28
Σχήμα 23: Παράδειγμα ορισμού των στοιχείων για μια γέφυρα (asset_name.mtdata.mat, πεδίο .Components).	28

Σχήμα 24: Παράδειγμα του αρχείου mtdata.json για ένα πλασματικό στοιχείο μέσω της προσέγγισης μελέτης που βασίζεται σε επιμέρους στοιχεία.	29
Σχήμα 25: Τυπική δομή ενός αρχείου mtdata.mat για στοιχεία που αντιμετωπίζονται μέσω της μελέτης σε επίπεδο κατασκευής.	30
Σχήμα 26: Τυπικό παράδειγμα της δομής του πεδίου .AssetsData για μελέτη σε επίπεδο κατασκευής.	30
Σχήμα 27: Τυπικό παράδειγμα της δομής του πεδίου .Units για μελέτη σε επίπεδο κατασκευής.	30
Σχήμα 28: Παράδειγμα του αρχείου mtdata.json για ένα πλασματικό στοιχείο που μελετάται σε επίπεδο κατασκευής.	31
Σχήμα 29: (α) Τυπικό παράδειγμα αρχείου MSA και (β) μεταβλητών που είναι αποθηκευμένες σε αρχείο MSA.	31

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Εξεταζόμενες κατασκευές στη Ρόδο και απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση της διακινδύνευσης.	17
---	----

Κατάλογος συντομογραφιών και ακρωνύμιων

Συντομογραφία	Ολογράφως
DM	Damage measure
DS	Damage state
DV	Decision variable
EDP	Engineering demand parameter
IM	Intensity measure
LS	Limit State
MHVM	Multi hazard vulnerability model
MSA	Multi stripe analysis
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Analysis
PBEE	Performance-based earthquake engineering

Σύνοψη

Το παραδοτέο D4.2 «Multi-hazard vulnerability modules» περιλαμβάνει τη δομή, τον σκοπό και τη χρήση των μοντέλων απωλειών πολλαπλών κινδύνων των κατασκευών του TwinCity. Ειδικότερα, τα μοντέλα απωλειών είναι βιβλιοθήκες λογισμικού και δεδομένων με τυποποιημένη μορφή που κωδικοποιούν τα αποτελέσματα της αξιολόγησης δομικής τρωτότητας και επιτρέπουν την ενσωμάτωση πιθανών κινδύνων, των αποτελεσμάτων της δομικής ανάλυσης και μοντέλων συνεπειών των κατασκευών για την περιοχή μελέτης της Ρόδου.

Στην πρώτη Βαθμίδα εντάσσονται οι κατασκευές υψίστης σημασίας για τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς της Ρόδου για τις οποίες γίνεται λεπτομερής προσομοίωση της συμπεριφοράς τους. Στη Βαθμίδα 2 ανήκουν κτίρια ιστορικής αξίας τα οποία έχουν και λειτουργική χρήση για τα οποία χρησιμοποιούνται χαμηλότερης λεπτομέρειας μοντέλα. Για τη Βαθμίδα 3, παρέχεται ένα γενικό μοντέλο και επιλέγεται μόνο ένας περιορισμένος αριθμός χαρακτηριστικών κατασκευών που αντιπροσωπεύουν καλύτερα ολόκληρη την κατηγορία και χρησιμοποιούνται γενικές καμπύλες τρωτότητας και απωλειών για την αξιολόγηση κινδύνου.

Παρουσιάζονται οι πιθανοί σημαντικοί κίνδυνοι που λαμβάνονται υπόψη για κάθε κατασκευή. Όλο το φάσμα των φυσικών και καιρικών κινδύνων εφαρμόζεται στα δομικά μοντέλα για την αξιολόγηση της απόκρισης των κατασκευών και των επακόλουθων ζημιών. Τα αποτελέσματα κωδικοποιούνται στο μοντέλο απωλειών πολλαπλών κινδύνων. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιασμός δράσης αποκατάστασης/έκτακτης ανάγκης υλοποιείται μέσα από την αξιολόγηση της τρωτότητας, των απωλειών και του χρόνου διακοπής λειτουργίας.

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

Το παραδοτέο D4.2 «Multi-Hazard Vulnerability Models» καθιερώνει το πλαίσιο που επιτρέπει τη ροή πληροφοριών από την επικινδυνότητα προς την απόκριση μιας κατασκευής και τον κίνδυνο/ανθεκτικότητα του συστήματος. Όλες οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται σ' αυτό το έγγραφο κωδικοποιούνται σε βιβλιοθήκες λογισμικού που επιτρέπουν την απρόσκοπτη ενσωμάτωση κινδύνων και αποτελεσμάτων τρωτότητας στη πλατφόρμα του συστήματος. Ο στόχος είναι να εκτιμηθούν οι απώλειες των κατασκευών που οφείλονται σε πολλαπλούς κινδύνους, όπως φορτία που σχετίζονται με τον καιρό (χιόνι, βροχή, άνεμος κ.λπ.) ή το σεισμό π.χ. επιτάχυνση εδάφους).

1.3 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.

Μέτρο δομικής απόκρισης: Ποσότητα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόκρισης και την εκτίμηση της ζημιάς σε δομικά και μη δομικά στοιχεία και συστήματα.

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.

Καμπύλη συνεπειών: Καμπύλη που αντιστοιχεί στην κατανομή που ακολουθεί η παράμετρος που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση των συνεπειών δεδομένης της τιμής του μέτρου δομικής απόδοσης.

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

2 Μεθοδολογία

Η γενική δομή της μεθοδολογίας που ακολουθείται στο TwinCity παρουσιάζεται στο Παραδοτέο D2.1 «System Requirements & Architecture» (TwinCity 2024). Τα μοντέλα απωλειών πολλαπλών κινδύνων MHVM (WP4) αποτελούν βασικό συστατικό μέρος της αρχιτεκτονικής του TwinCity καθώς αποτυπώνουν τη δομική και λειτουργική τρωτότητα των επιμέρους κατασκευών κτιρίων και υποδομών και, σε συνδυασμό με τα σενάρια σεισμικής και καιρικής επικινδυνότητας, τροφοδοτούν την αποτίμηση της διακινδύνευσης. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται τα επιμέρους συστατικά μέρη των MHVM.

2.1 Μέτρο έντασης

Η εκτίμηση της διακινδύνευσης και των συνεπακόλουθων ζημιών/απωλειών συνδυάζει τους πιθανούς κινδύνους (σχετιζόμενους με το κλίμα ή γεωλογικά φαινόμενα) με τα αποτελέσματα των δομικών αποκρίσεων των εκτεθειμένων, σ' αυτούς τους κινδύνους, κατασκευών. Η έννοια του μέτρου έντασης (Intensity Measure - IM) χρησιμοποιείται για να συνδέσει την ανάλυση του κινδύνου με την δομική ανάλυση και αντιπροσωπεύει ένα σημείο διεπαφής μεταξύ διαφορετικών ειδικοτήτων επιτρέποντας την απλούστευση των υπολογισμών.

Λαμβάνοντας για παράδειγμα υπόψη τους σεισμούς, οι σεισμολόγοι εκτιμούν τις ιδιότητες του μέτρου έντασης μέσω της Πιθανοτικής Ανάλυσης Σεισμικής Επικινδυνότητας (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Cornell 1968), ενώ οι μηχανικοί χρησιμοποιούν το μέτρο έντασης για να αξιολογήσουν τη δομική απόκριση μιας κατασκευής χωρίς να λαμβάνουν υπόψη άλλες σεισμολογικές παραμέτρους. Το μέτρο έντασης που επιλέγεται πρέπει να είναι αποδοτικό (efficient) και επαρκές (sufficient). Οι στόχοι της αποδοτικότητας και της επάρκειας δεν είναι απαραίτητα οι ίδιοι, καθώς ο πρώτος στοχεύει στη μείωση της διακύμανσης στα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης, ενώ ο δεύτερος στη μείωση της εξάρτησης των αποτελεσμάτων από άλλα χαρακτηριστικά του κινδύνου εκτός από το IM. Όταν μειώνεται η διασπορά της απόκρισης με τη χρήση ενός αποδοτικού μέτρου έντασης δεν σημαίνει απαραίτητα ότι μειώνεται η συνολική διασπορά του κινδύνου, καθώς μέρος της απλώς μετατοπίζεται σε διαφορετικό επίπεδο μελέτης στην εκτίμηση της διακινδύνευσης.

Στο πλαίσιο του TwinCity, για κάθε τύπο κινδύνου επιλέγονται κατάλληλα μέτρα έντασης ανάλογα με τις κατασκευές που εξετάζονται. Στην περίπτωση των καιρικών κινδύνων εξετάζονται διάφορες παράμετροι που σχετίζονται με τον άνεμο, όπως είναι η ταχύτητα, η διεύθυνση και οι ριπές. Εξετάζεται επίσης η θερμοκρασίας η οποία παρέχεται σε °C, και όσον αφορά τον υετό η ποσοτικοποίηση γίνεται σε mm νερού για μια δεδομένη περίοδο. Αντίθετα, για τις πλημμύρες αρκεί το ύψος του νερού σε mm.

Στην περίπτωση του σεισμού ως μέτρα έντασης χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις η μέγιστη εδαφική μετακίνηση και η φασματική επιτάχυνση 5% (Spectral acceleration – S_a). Για την πλειοψηφία των κατασκευών χρησιμοποιείται η μέση φασματική επιτάχυνση που υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος των τιμών φασματικής επιτάχυνσης σε διαφορετικές περιόδους (Average Spectral

acceleration – AvgSa) και για τους αγωγούς των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης η μέγιστη μετατόπιση του εδάφους (Peak Ground Velocity - PGV).

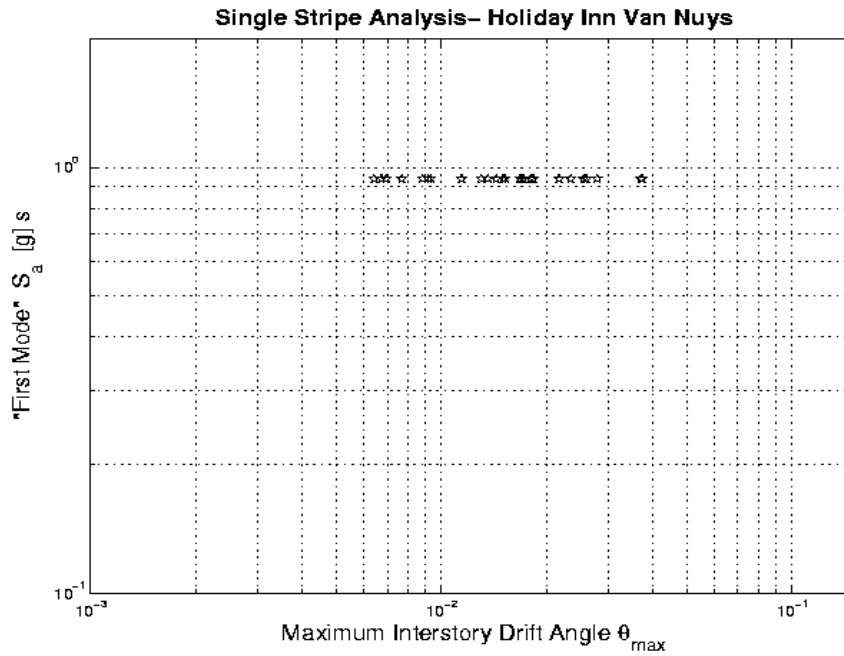
2.2 Μέτρο δομικής απόκρισης

Τα μέτρα δομικής απόκρισης (Engineering Demand Parameters, EDPs) έχουν ως στόχο των ποσοτικό χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Όσον αφορά τα μνημειακά κτίρια, χρησιμοποιούνται ως μέτρα απόκρισης οι παραμορφώσεις, οι τάσεις και οι καταπονήσεις. Για τις κατασκευές που ανήκουν στη Βαθμίδα 2, καταγράφονται τόσο η σχετική μετατόπιση μεταξύ διαδοχικών ορόφων όσο και η μετατόπιση της οροφής. Τέλος, για τη μελέτη των υποδομών της Ρόδου καταγράφονται τα εντατικά μεγέθη (δυνάμεις και ροπές) καθώς και οι μετατοπίσεις.

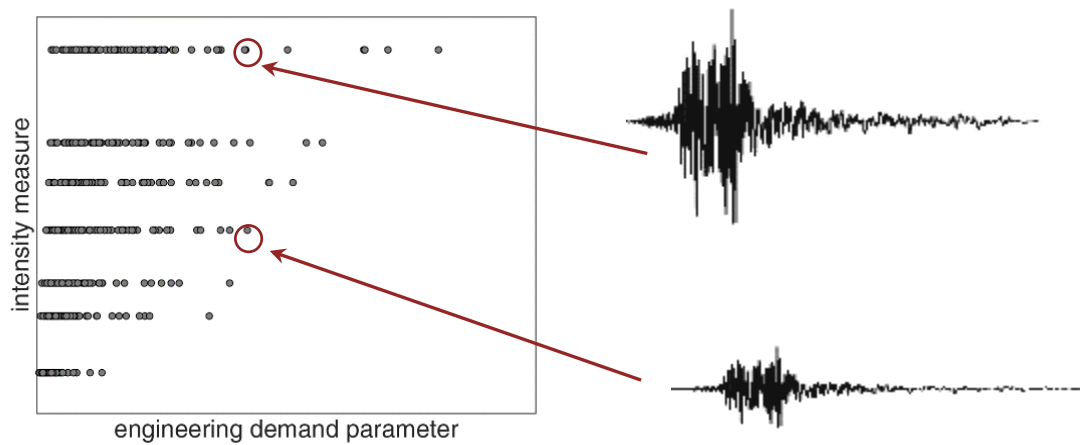
2.3 Σχέση μέτρου έντασης απόκρισης

Κάθε δυναμική ανάλυση παρέχει ένα μόνο ζεύγος τιμών μέτρου έντασης και απόκρισης της κατασκευής. Λόγω των αβεβαιοτήτων που εμπεριέχονται, απαιτούνται πολλαπλές αναλύσεις για κάθε στάθμη της εξεταζόμενης έντασης. Για παράδειγμα, κατά την εξέταση του σεισμικού κινδύνου, χρησιμοποιούνται πολλαπλές σεισμικές καταγραφές για κάθε στάθμη του μέτρου έντασης. Υπάρχουν πολλοί τρόποι ομαδοποίησης των ζευγών μέτρου έντασης-απόκρισης κατασκευής προκειμένου να εκτιμηθεί η τελική απόκριση, π.χ. single-stripe analysis (Jalayer 2003), multi-stripe analysis (Jalayer 2003; Jalayer and Cornell 2009), cloud analysis (Jalayer 2003; Mackie and Stojadinovic 2001; Padgett and DesRoches 2008) ή Incremental Dynamic Analysis (Vamvatsikos and Cornell 2002). Στο TwinCity, χρησιμοποιείται η Multi-Stripe Analysis (MSA) καθώς επιτρέπει την εύκολη μετεπεξεργασία χωρίς την προσαρμογή μοντέλων παλινδρόμησης.

Συγκεκριμένα, η MSA αποτελείται από μια σειρά αναλύσεων, καθεμία από τις οποίες εκτελείται σε διαφορετική στάθμη του μέτρου έντασης ή αλλιώς λωρίδα. Κάθε στάθμη περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της δομικής απόκρισης όταν η κατασκευή υποβάλλεται σε διαφορετικές χρονοιστορίες οι οποίες κλιμακώνονται στη συγκεκριμένη στάθμη του μέτρου έντασης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των Cornell και Jalayer (2002) απεικονίζεται στο Σχήμα 1, όπου κάθε αστέρι υποδεικνύει το μη γραμμικό αποτέλεσμα της δυναμικής ανάλυσης για μια εδαφική σεισμική καταγραφή η οποία έχει κλιμακωθεί έτσι ώστε $Sa(T1) = 0.94 \text{ g}$, όπου $Sa(T1)$ είναι η φασματική επιτάχυνση στη θεμελιώδη περίοδο της κατασκευής. Με τη διεξαγωγή μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων για πολλαπλά επίπεδα έντασης, προκύπτουν τα αποτελέσματα της MSA, όπως ενδεικτικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων επιλέγονται σεισμικές καταγραφές του εδάφους που αντιπροσωπεύουν τη σεισμικότητα και τα χαρακτηριστικά της περιοχής που εξετάζεται (Lin et al. 2013).



Σχήμα 1: Αποτελέσματα single-stripe analysis (Cornell and Jalayer 2002).



(a)

(b)

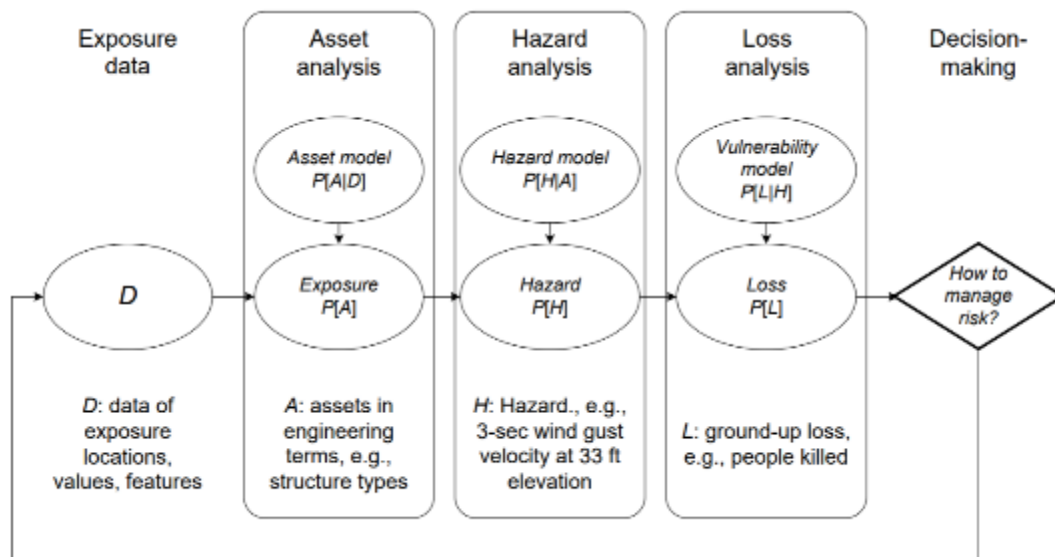
Σχήμα 2: (α) Αποτελέσματα MSA για πολλαπλές σεισμικές καταγραφές και (β) κλιμακούμενες σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιούνται για να ληφθούν τα ζεύγη μέτρου έντασης-απόκρισης που υποδεικνύονται με κύκλους.

3 Πλαίσιο σεισμικής μηχανικής βάσει επιτελεστικότητας

Στο πλαίσιο του TwinCity, για την εκτίμηση της διακινδύνευσης, χρησιμοποιείται το πλαίσιο σεισμικής μηχανικής με βάση την επιτελεστικότητα (Performance-Based Earthquake Engineering – PBEE, Cornell and Krawinkler 2000). Η μεθοδολογία PBEE συνοψίζεται από την Εξίσωση 1 και την εφαρμογή του θεωρήματος ολικής πιθανότητας ως εξής:

$$\lambda(DV) = \int_{DM} \int_{EDP} \int_{IM} G(DV | DM) |dG(DM | EDP)| |dG(EDP | IM)| |d\lambda(IM)| \quad (1)$$

όπου το IM είναι το μέτρο έντασης, το EDP είναι μέτρο δομικής απόκρισης όπως για παράδειγμα ο μέγιστος λόγος μετατόπισης μεταξύ διαδοχικών ορόφων για ένα κτίριο, DM (Damage Measure) είναι το μέτρο βλάβης, DV (Decision Variable) είναι η μεταβλητή απόφασης και $G(\text{var1}|\text{var2})$ είναι η πιθανότητα υπέρβασης μιας καθορισμένης τιμής του var1 δεδομένης της τιμής του var2. Το τελικό γινόμενο αυτού του υπολογισμού είναι η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης της παραμέτρου DV, $\lambda(DV)$. Έτσι, ο κίνδυνος μπορεί να εκτιμηθεί με βάση μεταβλητές απόφασης όπως ο αριθμός τραυματιών, η χρηματική απώλεια, το κόστος επισκευής ή ο χρόνος διακοπής λειτουργίας. Η προσέγγιση αυτή φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Ανάλυση κινδύνου φυσικής καταστροφής (Porter 2019).

3.1 Καμπύλες τρωτότητας

Το μέτρο βλάβης (DM) διακριτοποιείται σ' έναν πεπερασμένο αριθμό N καταστάσεων ζημιάς DS_i ($i = 0 \dots N-1$), που διαχωρίζονται από τις οριακές καταστάσεις LS_i , $i = 1 \dots N-1$. Με αυτόν τον τρόπο, οι καμπύλες τρωτότητας προκύπτουν ως συνεχείς συνάρτησεις που παρέχουν την πιθανότητα υπέρβασης ενός LS_i , ή ισοδύναμα να είναι σε ένα DS_i , δεδομένου του IM. Μια καμπύλη τρωτότητας ορίζεται από την έκφραση:

$$F_{LS_i}(IM) = F_{LS_i}(IM = x) = P[LS_i \text{ violated} | IM = x] = P[D > C_{LS_i} | IM = x] \quad (2)$$

όπου η υπέρβαση της οριακής κατάστασης LS_i ορίζεται τυπικά ως η σεισμική απαίτηση, D , που υπερβαίνει τη σεισμική ικανότητα της οριακής κατάστασης, C_{LS_i} . Τυπικά, οι καμπύλες τρωτότητας θεωρείται ότι ακολουθούν λογαριθμική κανονική κατανομή. Εάν θ_i είναι η διάμεσος και β_i είναι η λογαριθμική τυπική απόκλιση (ή διασπορά) του DS_i , τότε η πιθανότητα υπέρβασης του DS_i υπολογίζεται ως εξής:

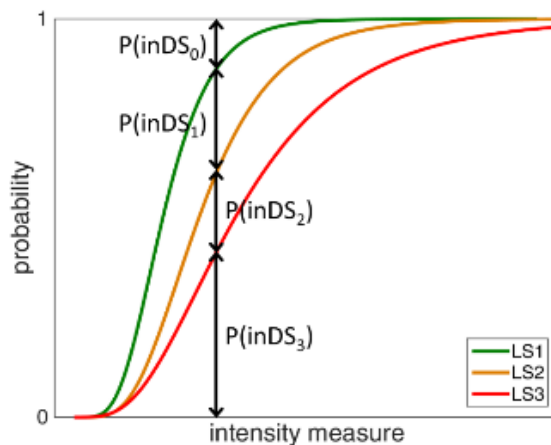
$$F_{LS_i}(IM) = F_{LS_i}(IM = x) = \Phi\left(\frac{\ln(x / \theta_i)}{\beta_i}\right) \quad (3)$$

όπου το $F_{LS_i}(IM)$ είναι η πιθανότητα υπέρβασης του DS_i δεδομένου ότι $IM = x$ και το $\Phi(\cdot)$ υποδηλώνει την αθροιστική συνάρτηση της κανονικής κατανομής.

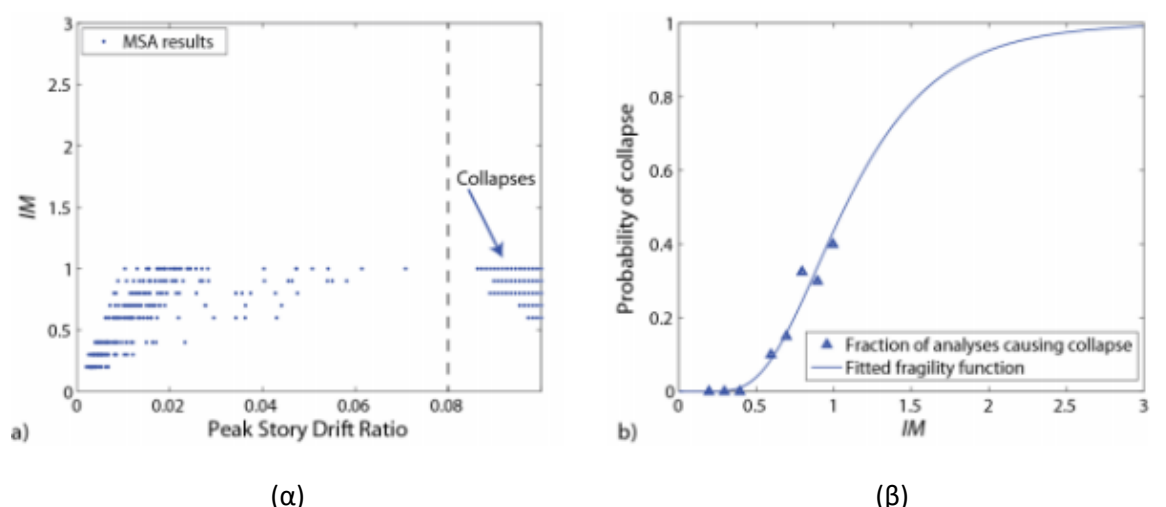
Οι καταστάσεις βλάβης κατά κανόνα συμβαίνουν διαδοχικά η μία μετά την άλλη, με το DS_{i+1} να διαδέχεται πάντα το DS_i , καθώς η ζημιά αυξάνεται προοδευτικά σε μια κατασκευή. Επίσης, όταν μια κατασκευή βρίσκεται σε μια κατάσταση βλάβης δεν μπορεί ταυτόχρονα να βρίσκεται και σε κάποια άλλη. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τρεις καμπύλες τρωτότητας που αντιστοιχούν σε τρεις διαδοχικές καταστάσεις βλάβης. Η πιθανότητα μια κατασκευή να βρεθεί σε κάθε κατάσταση ζημιάς προσδιορίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (4) και υποδεικνύεται από τις μαύρες γραμμές με βέλη στο ίδιο σχήμα.

$$P(\text{in } DS_i | IM) = F_{LS_{i+1}}(IM) - F_{LS_i}(IM) \quad (4)$$

Οι πιο ολοκληρωμένες αναλυτικές μέθοδοι για την αξιολόγηση της τρωτότητας βασίζονται σε αριθμητικά μοντέλα που υποβάλλονται σε μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις. Στο TwinCity, δεδομένων των οριακών τιμών των μέτρων απόκρισης EDP για κάθε κατασκευή, οι καμπύλες τρωτότητας υπολογίζονται μέσω των αποτελεσμάτων MSA. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μια ενιαία οριακή κατάσταση, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 5.



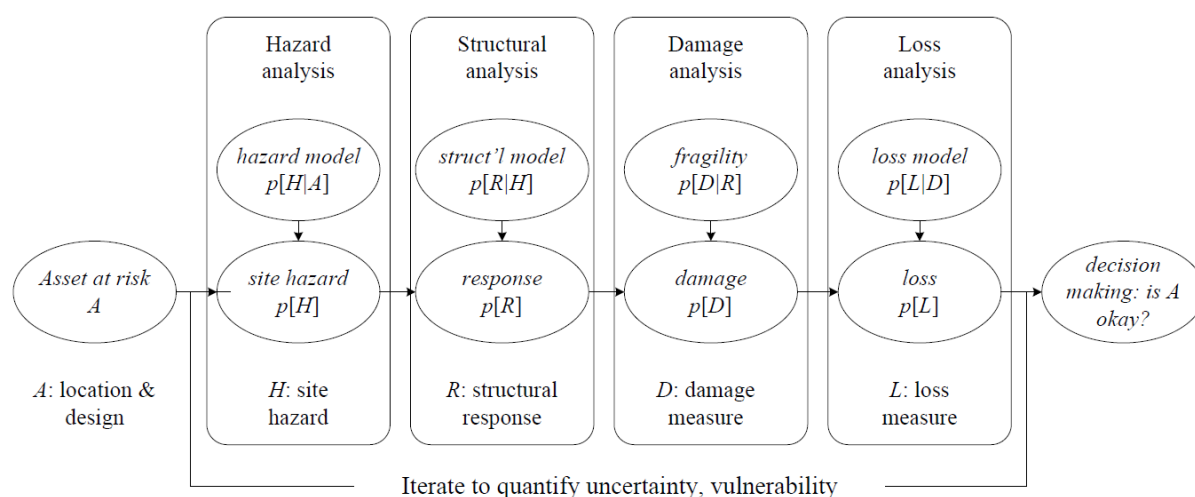
Σχήμα 4: Καμπύλες τρωτότητας για τρεις διαδοχικές οριακές καταστάσεις. Οι μαύρες γραμμές βέλους υποδεικνύουν την πιθανότητα η κατασκευή να βρίσκεται σε κάθε κατάσταση βλάβης για δεδομένη τιμή του IM .



Σχήμα 5: Παράδειγμα αποτελεσμάτων MSA και (β) διακριτή έναντι καμπύλης τρωτότητας κατάρρευσης (Baker 2015).

3.2 Καμπύλες απωλειών

Οι καμπύλες απωλειών χρησιμοποιούνται για να «μετατρέψουν» τη φυσική ζημιά που έχει υποστεί μια κατασκευή σε χρηματική απώλεια, χρόνο επισκευής, χρόνο διακοπής λειτουργίας κ.λπ., δεδομένης της τιμής του μέτρου έντασης και μπορούν είτε να προκύψουν άμεσα είτε αναλυτικά. Στην πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιούνται εμπειρικές μέθοδοι λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες από προηγούμενα γεγονότα σε δεδομένες τοποθεσίες και με δεδομένη την τιμή του μέτρου έντασης, ενώ, στη δεύτερη περίπτωση, προέρχονται από το συνδυασμό καμπυλών τρωτότητας και συνεπειών. Η διαδικασία αναλυτικής εκτίμησης των καμπυλών απωλειών απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 6. Στη συνέχεια, αναλύονται οι δύο μέθοδοι προσέγγισης των απωλειών που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο του TwinCity για τον καθορισμό των καμπυλών απωλειών.



Σχήμα 6: Πλαίσιο αναλυτικής εκτίμησης των απωλειών μιας κατασκευής (Porter 2019).

3.2.1 Εκτίμηση απωλειών σε επίπεδο επιμέρους στοιχείων

Στην περίπτωση αυτή υιοθετείται η προσέγγιση του FEMA P-58 (ATC 2009), όπου οι καμπύλες απωλειών προσδιορίζονται συσχετίζοντας τα EDP των κατασκευών απευθείας με την απώλεια. Αυτή η διαδικασία απαιτεί λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις καμπύλες τρωτότητας και συνεπειών σε όλα τα ευάλωτα επιμέρους στοιχεία από τα οποία αποτελείται μια κατασκευή. Η μέση καμπύλη απωλειών ανά κατηγορία στοιχείων, η συμπεριφορά της οποίας ελέγχεται από το EDP_i , υπολογίζεται ως:

$$E(L_i | EDP) = N_{i,h} \sum_{ds=0}^{N_{ds}} P(ds_i | EDP) \cdot m_{i,ds} \quad (5)$$

όπου i είναι ο δείκτης που χαρακτηρίζει την κατηγορία του στοιχείου, L είναι οι συνέπειες, N_{ds} είναι ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων βλάβης, $N_{i,h}$ είναι ο αριθμός των στοιχείων της κατηγορίας i στην ομάδα h και $m_{i,ds}$ είναι η μέση απώλεια ανά μονάδα κατηγορίας στοιχείων i σε κατάσταση ζημιάς ds .

3.2.2 Εκτίμηση απωλειών σε επίπεδο συστήματος

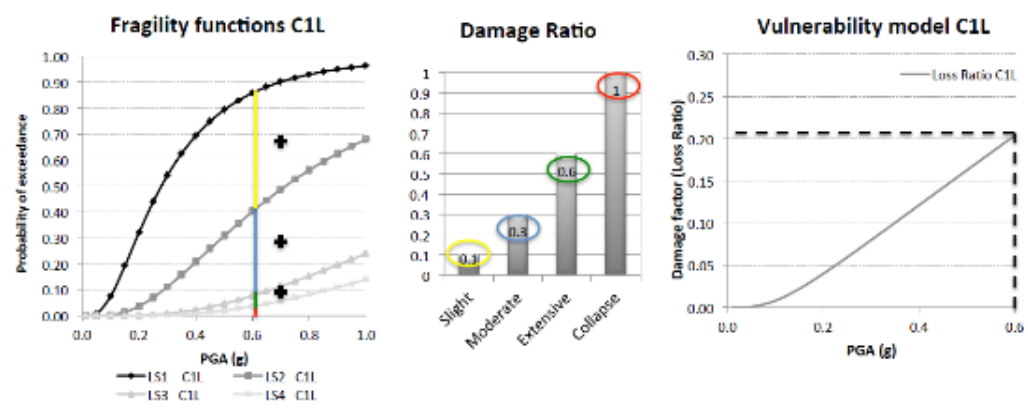
Σε αυτή την προσέγγιση, οι καμπύλες απωλειών προσδιορίζονται με τον συνδυασμό των καμπυλών τρωτότητας σε επίπεδο συστήματος με τις αντίστοιχες συνέπειες της κατάστασης βλάβης μιας κατασκευής i , DS_i . Η μέση καμπύλη τρωτότητας υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (6):

$$E(L | IM) = \sum_{i=0}^{N_{DS}} E(L | DS_i) \cdot P(DS_i | IM) \quad (6)$$

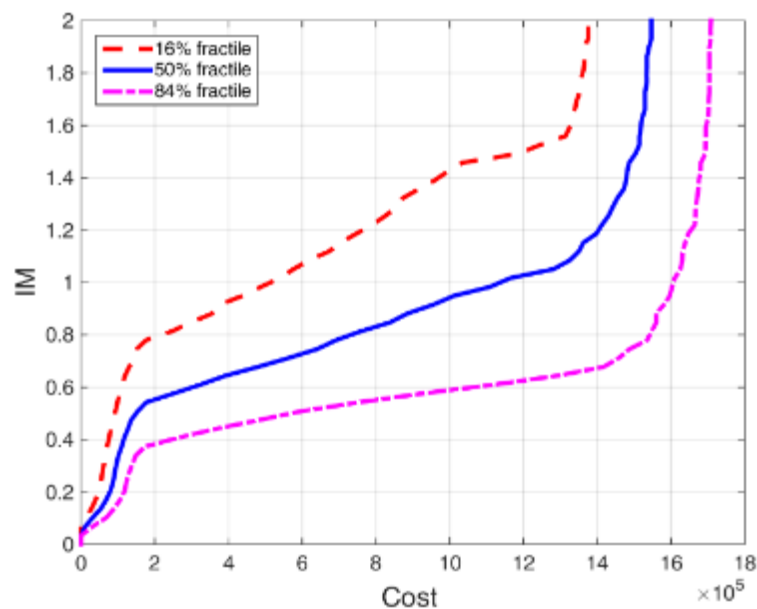
όπου N_{DS} είναι ο αριθμός των καταστάσεων ζημιάς, $P(DS_i | IM)$ είναι η πιθανότητα να είναι η κατασκευή σε μια κατάσταση βλάβης δεδομένου IM , $E(L | DS_i)$ είναι η αναμενόμενη απώλεια (π.χ. κόστος/χρόνος διακοπής λειτουργίας κ.λπ.) για δεδομένο DS_i και $E(L | IM)$ είναι η αναμενόμενη απώλεια δεδομένου του IM . Στο Σχήμα 7 απεικονίζεται το παράδειγμα μιας καμπύλης απωλειών που έχει προσδιοριστεί μ' αυτό τον τρόπο. Η διακύμανση, $var(L | IM)$, της καμπύλης απωλειών υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (7):

$$var(L | IM) = \sum_{i=0}^{N_{DS}} \left[var(L | DS_i) + E^2(L | DS_i) \right] \cdot P(DS_i | IM) - E^2(L | IM) \quad (7)$$

Οι καμπύλες απωλειών μπορούν να προσδιοριστούν ακολουθώντας τη διαδικασία που παρουσιάζεται παραπάνω με τις Εξισώσεις (6) και (7) για μια σειρά από IM . Ενδεικτικά αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 8 όπου φαίνονται η μέση καμπύλη και οι καμπύλες που αντιστοιχούν στα 16% και 84% ποσοστημόρια.



Σχήμα 7: Παράδειγμα αξιολόγησης απωλειών δεδομένης της τρωτότητας και των συνεπειών (D'Ayala et al. 2015).



Σχήμα 8: Μέση, 16% και 84% των καμπυλών τρωτότητας σε όρους κόστους που υπολογίζεται με χρήση πιθανολογικών κατανομών κόστους.

4 Ανάλυση κατασκευών

4.1 Κατασκευές στη Ρόδο

Ένας από τους κύριους στόχους του TwinCity είναι να αξιολογήσει την τρωτότητα και να βελτιώσει την ανθεκτικότητα των υποδομών της Ρόδου υπό καιρικούς και σεισμικούς κινδύνους καθώς και πλημμύρες. Για να γίνει αυτό με ακρίβεια και αξιοπιστία, απαιτείται ένας κατάλληλος τρόπος παροχής εξαιρετικά λεπτομερών δεδομένων για τις κατασκευές. Στο TwinCity οι κατασκευές που εξετάζονται για το νησί της Ρόδου παρουσιάζονται αναλυτικά στο παραδοτέο D2.2 και ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο μοντελοποίησης.

Στην πρώτη Βαθμίδα εντάσσονται οι κατασκευές υψίστης σημασίας για τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς της Ρόδου για τις οποίες γίνεται λεπτομερής προσομοίωση της συμπεριφοράς τους και αναπτύσσονται αναλυτικά αριθμητικά δομικά μοντέλα. Στη Βαθμίδα 2 ανήκουν κτίρια ιστορικής αξίας τα οποία έχουν και λειτουργική χρήση για τα οποία χρησιμοποιούνται χαμηλότερης λεπτομέρειας (reduced-order) μοντέλα. Για τις κατασκευές στις Βαθμίδες 1 και 2 παράγονται οι καμπύλες τρωτότητας, απωλειών και συνεπειών, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι πιθανοί κίνδυνοι που είναι σημαντικοί για κάθε κατασκευή και εφαρμόζονται στα δομικά μοντέλα προκειμένου να προβλεφθεί η ανταπόκρισή τους, καθώς και η σχετική ζημιά στο λεπτομερές επίπεδο των επιμέρους στοιχείων. Τέλος, στη Βαθμίδα 3 περιλαμβάνονται κτίρια και υποδομές για τα οποία γίνονται λιγότερο λεπτομερή μοντέλα που αντιστοιχούν σε γενικότερες κλάσεις με ίδια χαρακτηριστικά προκειμένου να αξιολογηθεί η απόκριση τους.

Για κάθε κατασκευή παρέχονται απαραίτητες πληροφορίες και σχετικό φωτογραφικό υλικό. Σχετικά με τα συνήθη κτίρια, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα από την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία και πραγματοποιήθηκε λεπτομερής αυτοψία, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικά. Με άλλα λόγια, όσον αφορά την αξιολόγηση τρωτότητας, για τις δύο πρώτες δύο περιπτώσεις γίνεται εκτίμηση απωλειών σε επίπεδο επιμέρους στοιχείων, ενώ για την τρίτη περίπτωση γίνεται εκτίμηση απωλειών σε επίπεδο συστήματος, δηλαδή της κατασκευής.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων κατασκευών, τα κτίρια που είναι σημαντικά για τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς της Ρόδου είναι κατασκευασμένα από λιθοδομή. Για τα κτίρια που ανήκουν στη Βαθμίδα 2, παρατηρείται ότι αυτά τα οποία είναι ιστορικής αξίας είναι κατασκευασμένα από τοιχοποιία, ενώ συνήθη κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στη Βαθμίδα 3, εξετάζονται τόσο κτίρια όσο και υποδομές. Τα κτίρια αποτελούνται από πληθώρα υλικών, ενώ τα βασικά στοιχεία των δικτύων υποδομής αποτελούνται από χάλυβα. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η κάθε εξεταζόμενη κατασκευή, με τον χαρακτηρισμό της ως υψίστης σημασίας για τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς της Ρόδου ή όχι στην πρώτη στήλη. Επιπλέον, αναγράφεται η βαθμίδα στην οποία ανήκει κάθε κατασκευή και έπειτα το κύριο δομικό υλικό από το οποίο φτιάχτηκε.

Η αναγνώριση όλων των πιθανών κινδύνων αποτελεί σημαντικό βήμα για τη διατήρηση και προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς του νησιού. Τα κτίρια πολιτιστικής κληρονομιάς της Ρόδου βρίσκονται σε ευάλωτη θέση αντιμετωπίζοντας τόσο τον κίνδυνο σεισμών όσο και την υποβάθμιση των δομικών τους χαρακτηριστικών λόγω της παλαιώσης τους. Από την άλλη πλευρά, όσον αφορά τις συνήθεις κατασκευές όχι μόνο ο σεισμός αλλά και οι πλημμύρες μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στη λειτουργία. Επιπλέον, ο άνεμος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη συμπεριφορά

των στοιχείων των υποδομών. Οι πιθανοί κίνδυνοι για κάθε κατασκευή παρουσιάζονται επίσης στον Πίνακα 1 καθώς επίσης και τα μέτρα έντασης και δομικής απόκρισης που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διαδικασία εκτίμησης της διακινδύνευσης.

Πίνακας 1: Εξεταζόμενες κατασκευές στη Ρόδο και απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση της διακινδύνευσης.

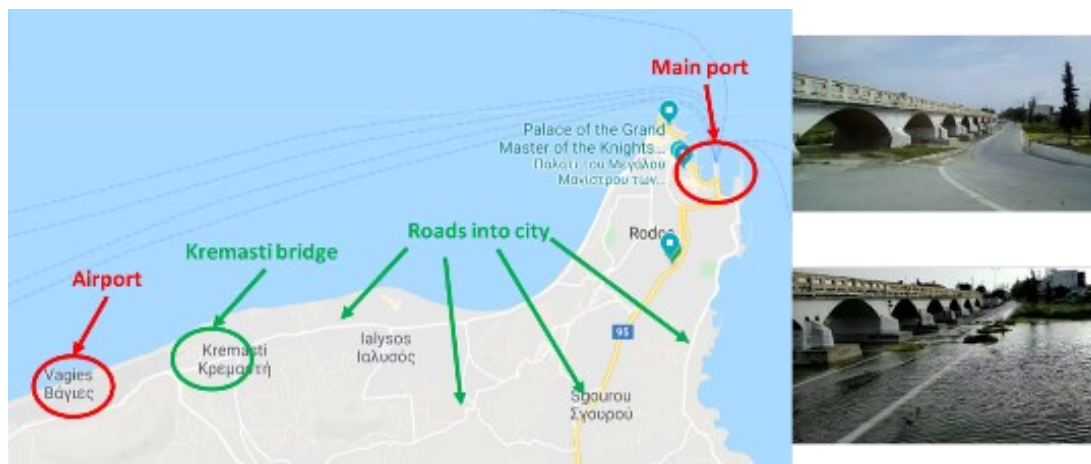
Κατασκευή	Πολιτιστική κληρονομιά	Βαθμίδα	Δομικό υλικό	Κίνδυνος	Μέτρο έντασης	Μέτρο απόκρισης
Φάρος και φρούριο του Αγίου Νικολάου	NAI	1	Λιθοδομή	Σεισμός, γήρανση	AvgS _a , χρόνος, υγρασία, θερμοκρασία	Παραμορφώσεις, τάσεις, καταπονήσεις
Προβλήτα Nailac	NAI	1	Λιθοδομή	Σεισμός, γήρανση	AvgS _a , χρόνος, υγρασία, θερμοκρασία	Παραμορφώσεις, τάσεις, καταπονήσεις
Ρωμαϊκή γέφυρα	NAI	1	Λιθοδομή	Σεισμός, γήρανση	AvgS _a , χρόνος, υγρασία, θερμοκρασία	Παραμορφώσεις, τάσεις, καταπονήσεις
Ταφικοί περίβολοι στη Ροδινή	NAI	1	Λιθοδομή	Σεισμός, γήρανση	AvgS _a , χρόνος, υγρασία, θερμοκρασία	Παραμορφώσεις, τάσεις, καταπονήσεις
Πυροσβεστική	NAI	2	Τοιχοποιία	Σεισμός	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση μεταξύ ορόφων, εσωτερικές δυνάμεις και ροπές, παραμορφώσεις
Αστυνομικό τμήμα	NAI	2	Τοιχοποιία	Σεισμός	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση μεταξύ ορόφων, μετατόπιση οροφής
Περιφερειακό κτίριο Ν. Αιγαίου	NAI	2	Τοιχοποιία	Σεισμός	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση μεταξύ ορόφων, μετατόπιση οροφής
Δημαρχείο Ρόδου	NAI	2	Τοιχοποιία	Σεισμός	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση μεταξύ ορόφων, μετατόπιση οροφής
Κεντρικά γραφεία Εφορείας Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσων	NAI	2	Τοιχοποιία	Σεισμός	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση μεταξύ ορόφων, μετατόπιση οροφής
Στρατιωτικό Αρχηγείο	OXI	2	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Σεισμός	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση μεταξύ ορόφων, μετατόπιση οροφής
Κτίριο δημόσιων υπηρεσιών	OXI	2	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Σεισμός	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση μεταξύ ορόφων,

						μετατόπιση οροφής
Περιφερειακό Νοσοκομείο	OXI	2	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Σεισμός	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση μεταξύ ορόφων, μετατόπιση οροφής
Τερματικός σταθμός αεροδρομίου	OXI	2	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Σεισμός	AvgS _a PGA, S _a (1s), ύψος νερού	Μετατόπιση μεταξύ ορόφων, μετατόπιση οροφής
Γέφυρα «Κρεμαστής»	OXI	3	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Σεισμός, πλημμύρες	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση
Δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	OXI	3	Χάλυβας	Άνεμος, γήρανση	u ₁₀ , διεύθυνση ανέμου	Μετατόπιση, ροπή, δύναμη
Πύργοι τηλεπικοινωνιών	OXI	3	Χάλυβας	Άνεμος, γήρανση	u ₁₀ , διεύθυνση ανέμου	Μετατόπιση, ροπή, δύναμη
Δίκτυο ύδρευσης και αποχέτευσης	OXI	3	-	Σεισμός	PGV	Τάσεις, καταπονήσεις
Άλλα κτίρια	NAI και OXI	3	Οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιία	Σεισμός, πλημμύρες	AvgS _a , ύψος νερού	Μετατόπιση οροφής

Οι βασικές κατασκευές που μελετήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο παραδοτέο D2.2 «Asset definitions and interdependencies». Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των εξεταζόμενων δικτύων που απαρτίζουν το νησί της Ρόδου και περιγράφονται αναλυτικά οι κίνδυνοι που επηρεάζουν την εύρυθμη λειτουργία τους.

4.2 Δίκτυο συγκοινωνιών

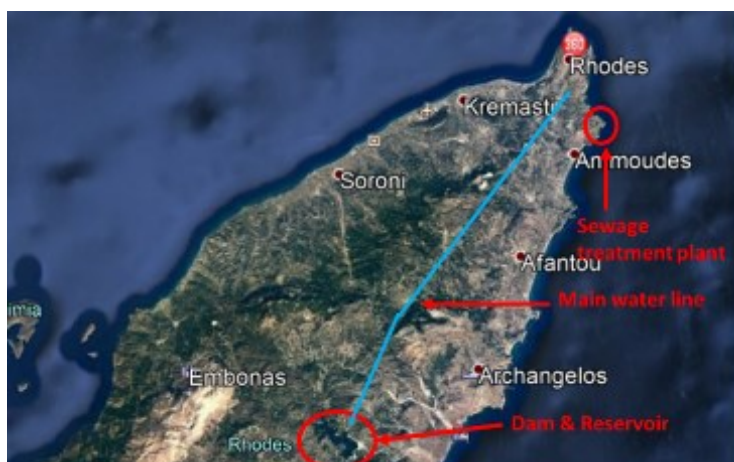
Κρίσιμα μέρη του συγκοινωνιακού δικτύου της πόλης της Ρόδου απεικονίζονται στο Σχήμα 9, καθώς επίσης και η γέφυρα της Κρεμαστής στον κεντρικό δρόμο που συνδέει την πόλη με το αεροδρόμιο. Στην εικονιζόμενη γέφυρα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από πλημμύρες, καθώς περιλαμβάνει μια λωρίδα που εξυπηρετεί μία μόνο κατεύθυνση. Η άλλη κατεύθυνση εξυπηρετείται από μια λωρίδα που βρίσκεται στη συνήθως ξηρή κοίτη του ποταμού, η οποία σε περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης μπορεί να πλημμυρίσει.



Σχήμα 9: Αριστερά: Κρίσιμα μέρη του συγκοινωνιακού δικτύου της Ρόδου. Δεξιά: Πλημμύρες που διαταράσσουν την πρόσβαση στο αεροδρόμιο (γέφυρα Κρεμαστής).

4.3 Δίκτυο ύδρευσης και αποχέτευσης

Τα κρίσιμα στοιχεία του δικτύου ύδρευσης και αποχέτευσης της Ρόδου φαίνονται στο Σχήμα 10α. Οι αγωγοί που απαρτίζουν τα δίκτυα αυτά μπορούν να είναι ευαίσθητοι σε εδαφικές μετακινήσεις με αποτέλεσμα να αστοχούν όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 10β.



(α)



(β)

Σχήμα 10: (α) Κρίσιμα στοιχεία του δικτύου ύδρευσης και αποχέτευσης της Ρόδου, (β) αστοχία γραμμών διανομής νερού

4.4 Δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Ο πιο κρίσιμος περιβαλλοντικός κίνδυνος για μια γραμμή μεταφοράς είναι ο άνεμος. Ο άνεμος δρα ταυτόχρονα στην κατασκευή του πύργου (δικτυωτή δομή) και στους αγωγούς μεταφοράς ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι υψηλές ταχύτητες ανέμου, σε συνδυασμό συνήθως με χαμηλές θερμοκρασίες και τον επίπαγο που συσσωρεύεται στην εκτεθειμένη επιφάνεια του πύργου και των αγωγών, μπορεί να οδηγήσουν σε φορτία που υπερβαίνουν την αντοχή της κατασκευής και πιθανώς και σε ολική κατάρρευση. Αυτό οφείλεται στη συσσώρευση επίπαγου, ο οποίος αυξάνει τα φορτία στην κατασκευή με δύο τρόπους. Καταρχάς αυξάνεται το βάρος των μελών και κατά δεύτερον αυξάνεται η δύναμη του ανέμου λόγω της αύξησης της περιοχής των εκτεθειμένων μελών και των αγωγών.

Τέλος, είναι αξιοσημείωτο ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αστοχία δεν παρατηρείται μόνο σε έναν πύργο, αλλά και σε παρακείμενους (Σχήμα 11), λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής των δυνάμεων στους αγωγούς και της επακόλουθης αδυναμίας των πύργων στήριξης να μεταφέρουν τα πλευρικά φορτία κατά μήκος της γραμμής. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση μεγάλου τμήματος του δικτύου και να έχει σημαντικό αντίκτυπο στον πάροχο ενέργειας και φυσικά στους καταναλωτές.



(α)



(β)

Σχήμα 11: (α) Επίπαγος στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και (β) Κατάρρευση της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω επίπαγου

Στις περισσότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η ηλικία του δικτύου μεταφοράς ενέργειας το οποίο χτίστηκε κυρίως στη δεκαετία του '50 και του '60. Σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου (δηλ. οι πύργοι μεταφοράς) υπερβαίνει τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού, καθώς λειτουργεί για περισσότερα από πενήντα χρόνια. Έτσι, εκτός από τους περιβαλλοντικούς κινδύνους που αναφέρθηκαν παραπάνω, η υπέρβαση της ηλικίας σχεδιασμού αποτελεί μια πρόσθετη πηγή κινδύνου για τη λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

Θεωρείται ότι ένας πύργος υποστήριξης μεταφέρει αποκλειστικά τα εγκάρσια και κατακόρυφα φορτία λόγω των αγωγών και τα φορτία λόγω του ίδιου βάρους του. Η προσομοίωση πραγματοποιείται εφαρμόζοντας τις αντίστοιχες δυνάμεις στη θέση των μονωτήρων, ενώ τα φορτία κατά μήκος της κατεύθυνσης της γραμμής δεν λαμβάνονται υπόψη. Οριζόντια φορτία προστίθενται στο μοντέλο για την προσομοίωση του καλωδίου γείωσης, το οποίο συνδέεται στον πύργο, μεταφέροντας έτσι όχι μόνο κάθετες αλλά και πλευρικές δυνάμεις.

Οι εναέριες γραμμές διανομής αποτελούνται από ξύλινους στύλους, οι οποίοι είναι λιγότερο δαπανηροί σε σύγκριση με εναλλακτικές λύσεις όπως π.χ. στύλους από σκυρόδεμα, παρόλα αυτά μπορούν να υποστούν σημαντικές ζημιές όταν υποβάλλονται σε υψηλά φορτία ανέμου. Οι ξύλινοι στύλοι είναι εκτεθειμένοι στο οξυγόνο της ατμόσφαιρας και την υγρασία με αποτέλεσμα να είναι επιρρεπείς σε αποσύνθεση μειώνοντας σημαντικά τη χρονική διάρκεια ζωής τους. Το δίκτυο διανομής περιλαμβάνει επίσης τους αγωγούς που είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι σε ταυτόχρονη φόρτιση ανέμου και επίπαγου. Ο συσσωρευμένος πάγος γύρω από τους αγωγούς χάλυβα αυξάνει την ονομαστική τους διάμετρο και κατ' επέκταση τα πλευρικά φορτία λόγω του ανέμου καθώς και του βάρους του αγωγού. Αστοχίες στο δίκτυο διανομής προκαλούνται κυρίως από αστοχία των στύλων ή των αγωγών (Σχήμα 12) και μπορούν να οδηγήσουν σε διακοπή ρεύματος υπονομεύοντας σημαντικά τη λειτουργικότητα της πόλης.



Σχήμα 12: Αστοχία στύλων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (Vivek et al. 2017)

Οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί είναι κρίσιμες εγκαταστάσεις του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα περισσότερα εξαρτήματα και το ίδιο το κτίριο ελέγχου είναι ευάλωτα σε σεισμικές δράσεις και είναι πολύ σημαντικό να αποτραπεί η κατάρρευση ή η πρόκληση απωλειών, καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή ρεύματος με σημαντικές συνέπειες για ολόκληρη την πόλη. Παραδείγματα βλαβών σε ηλεκτρικούς υποσταθμούς λόγω σεισμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 13.



(α) Κατάρρευση κτιρίου ελέγχου



(β) Βλάβες σε εξαρτήματα των υποσταθμών

Σχήμα 13: Βλάβες σε ηλεκτρικούς υποσταθμούς και εξαρτήματά τους από σεισμούς (Liu et al. 2012).

4.5 Πύργοι τηλεπικοινωνιών

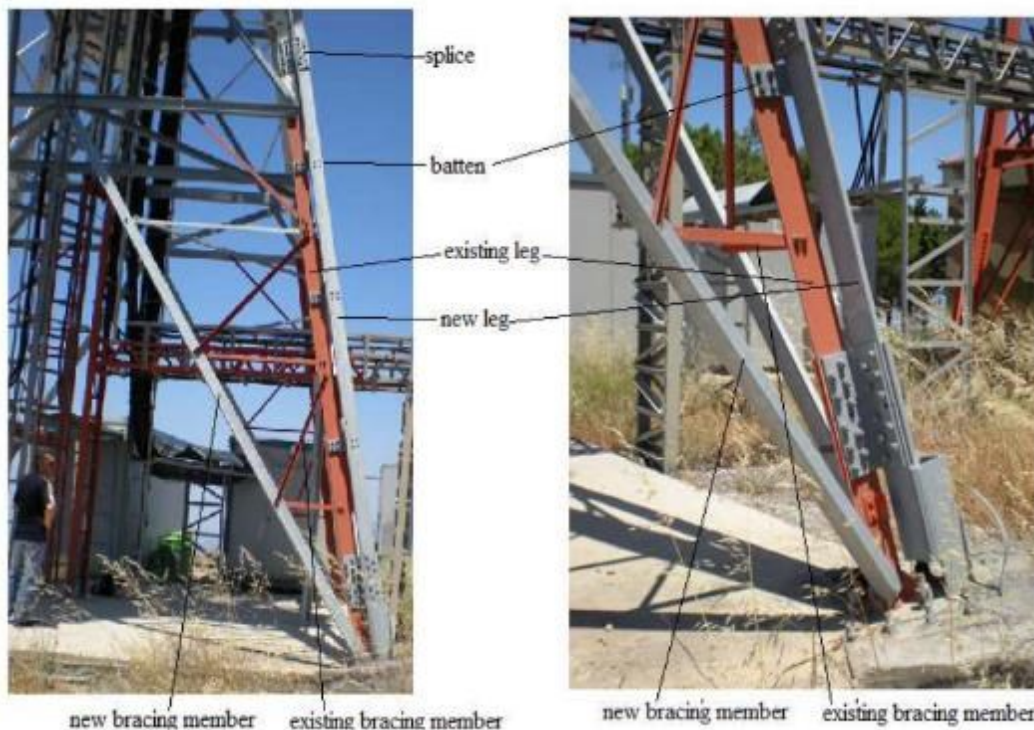
Όπως και στην περίπτωση των πύργων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, κρίσιμος παράγοντας είναι οι συνθήκες φόρτωσης που συνδέονται με χαμηλές θερμοκρασίες, συσσώρευση επίπαγου και ισχυρούς ανέμους. Η επίδραση του επίπαγου που συσσωρεύεται στα εκτεθειμένα μέλη των πύργων και στην επιφάνεια των κεραιών αυξάνει τόσο το ίδιο βάρος όσο και τα φορτία ανέμου στην κατασκευή (Σχήμα 14).



Σχήμα 14: Συσσώρευση επίταγους στον πύργο (Sundin and Makkonen 1998).

Ο ρόλος ενός πύργου τηλεπικοινωνιών για τη μεταφορά των κεραιών αποτελεί πρόσθετη πρόκληση, ειδικά όταν υπάρχει ανάγκη για αναβαθμίσεις στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Συγκεκριμένα, οι αναβαθμίσεις δικτύου συνήθως απαιτούν την εγκατάσταση μεγαλύτερων και βαρύτερων κεραιών. Σε μια τέτοια περίπτωση, ένας υπάρχων πύργος μπορεί να μην είναι ικανός να μεταφέρει τα αυξημένα φορτία. Μια συνηθισμένη λύση, εκτός από την κατεδάφιση του υπάρχοντος πύργου και την εγκατάσταση νέου, είναι η ενίσχυση του. Η ενίσχυση του πύργου συνήθως επιτυγχάνεται με την προσθήκη νέων μελών (π.χ. γωνιακές δοκοί) στον υπάρχοντα πύργο (Σχήμα 15). Ωστόσο, οι πύργοι αντιμετωπίζουν συχνά μείωση της δομικής αξιοπιστίας με κάθε αναβάθμιση τεχνολογίας (2G→3G→4G→5G). Αυτό το ζήτημα κρίνεται κρίσιμο με την προγραμματισμένη ανάπτυξη δικτύων 5G, καθώς χρειάζεται να εγκατασταθούν περισσότερες και βαρύτερες κεραίες στο ίδιους πύργους για να επιτρέπουν την ταυτόχρονη υποστήριξη τόσο της παλαιότερης όσο και της νεότερης γενιάς κινητής τηλεφωνίας.

Σχήμα 17



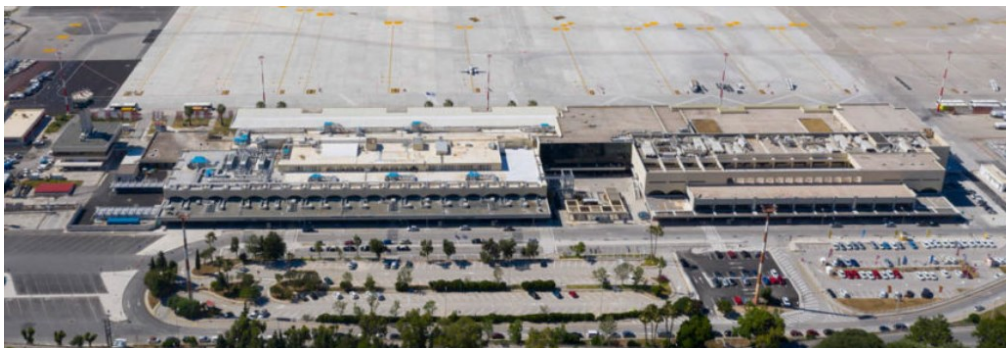
Σχήμα 15: Ενίσχυση υφιστάμενων μελών.

4.6 Τερματικός σταθμός αεροδρομίου Ρόδου

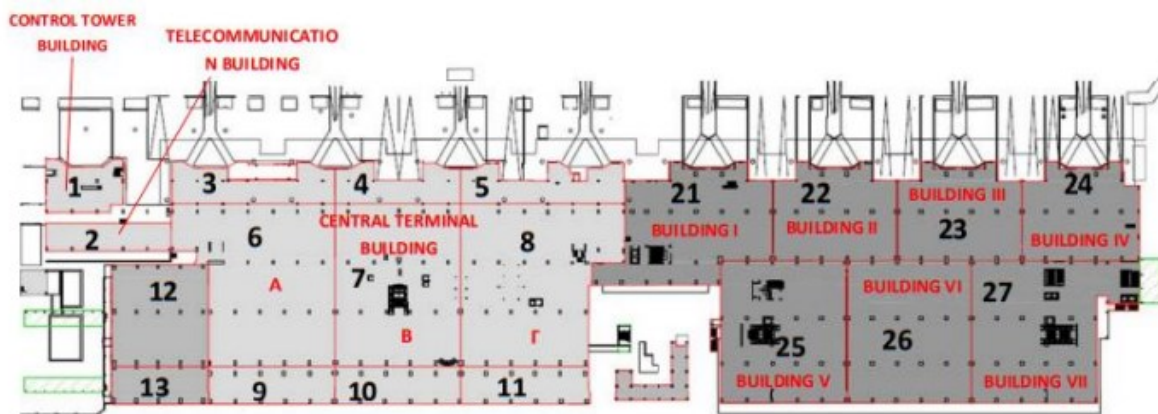
Το αεροδρόμιο της Ρόδου το οποίο καταλαμβάνει μια έκταση των 47.390 m² απεικονίζεται στο Σχήμα 16α και τα κρίσιμα κτίρια από τα οποία απαρτίζεται φαίνονται στο Σχήμα 16β. Το αεροδρόμιο χωρίζεται στο δυτικό και ανατολικό τμήμα. Το δυτικό ή παλιό τμήμα περιλαμβάνει τα κτίρια που κατασκευάστηκαν το 1972 καθώς και δύο ακόμα το 1995. Αντίθετα, το ανατολικό ή νέο τμήμα απαρτίζεται από κτίρια τα οποία κατασκευάστηκαν το 2002.

Κρίσιμος παράγοντας για την λειτουργία των κτιρίων του αεροδρομίου είναι η σεισμική κίνηση του εδάφους. Εξαιτίας της επέκτασης του αεροδρομίου τα κτίρια έχουν κατασκευαστεί με διαφορετικούς κανονισμούς και ως αποτέλεσμα έχουν διαφορετική σεισμική συμπεριφορά. Κατά την ανάλυση του αεροδρομίου στόχος ήταν να προσδιοριστεί ο χρόνος διακοπής της λειτουργίας του καθώς και το συνολικό κόστος που προκύπτει από τις εργασίες επιδιόρθωσης.

Δεδομένου ότι αν συμβούν βλάβες σ' ένα κτίριο δεν είναι δυνατό να σταματήσει ολόκληρη η λειτουργία του αεροδρομίου, αυτό χωρίστηκε σε επτά τμήματα που αντιστοιχούν σε λειτουργικές μονάδες. Στην περίπτωση που χρειαστεί να διακοπεί η λειτουργία σε κάποια μονάδα να γίνουν οι κατάλληλες αναπροσαρμογές και να μην επηρεαστεί η κίνηση των επιβατών.



(α)

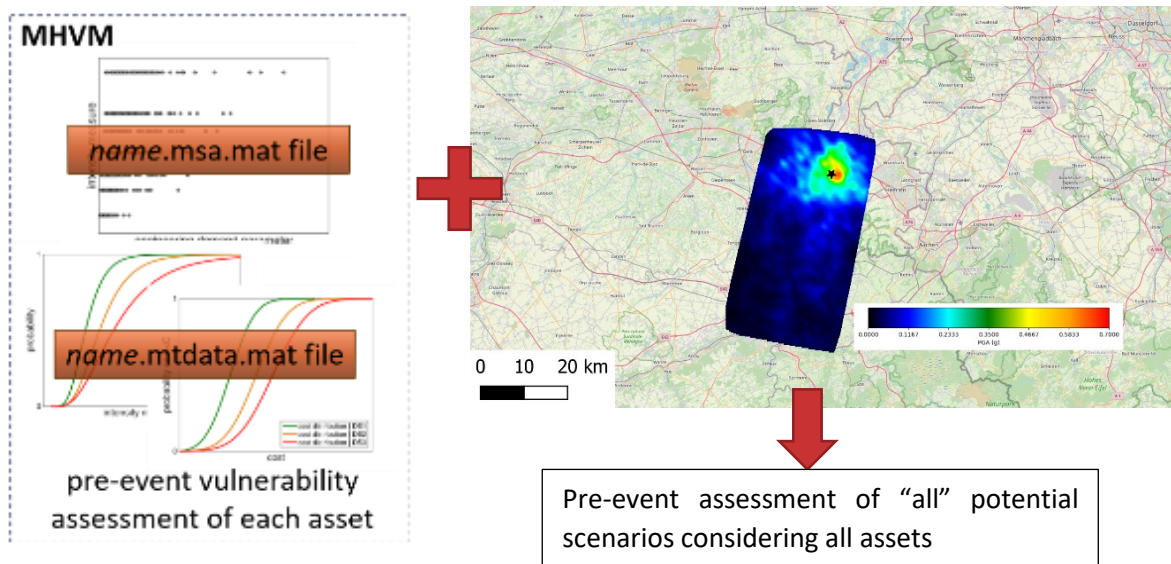


(β)

Σχήμα 16: (α) Κάτοψη αεροδρομίου και (β) κτίρια αεροδρομίου της Ρόδου.

5 Περιγραφή των MHVM

Σ' αυτήν την ενότητα περιγράφεται η τυπική δομή του μοντέλου απωλειών πολλαπλών κινδύνων (Multi Hazard Vulnerability Model - MHVM). Το μοντέλο απωλειών πολλαπλών κινδύνων αποτελείται από δύο αρχεία για κάθε κατασκευή ή κλάση στην οποία εντάσσεται η κατασκευή. Το πρώτο ονομάζεται "asset_name.msa.mat/json", όπου "asset_name" είναι το όνομα της κατασκευής που εξετάζεται και περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της MSA που πραγματοποιήθηκε. Το δεύτερο ονομάζεται "asset_name.mtdata.mat/json" και περιλαμβάνει τα μεταδεδομένα για κάθε κατασκευή. Τα δεδομένα και των δύο αρχείων συνδυάζονται για την αξιολόγηση της απωλειών ανά κατασκευή, προκειμένου να δημιουργηθούν πολλαπλά σενάρια ζημιών/συνεπειών. Αυτά τα σενάρια συνδυάζονται αργότερα με πεδία μέτρησης έντασης (IM fields), προκειμένου να δημιουργηθούν πολλαπλά εναλλακτικά σενάρια που ενδέχεται να προκύψουν σε ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος πριν τη φάση λειτουργίας της πλατφόρμας του TwinCity, δηλαδή πριν από την εκδήλωση ενός πραγματικού συμβάντος. Αυτή η διαδικασία απεικονίζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 17. Για περιπτώσεις όπου η τρωτότητα υπολογίζεται μέσω εργαλείων όπως το HAZUS, τα σενάρια ζημιάς/συνεπειών δημιουργούνται μέσω της αποσύνθεσης των αντίστοιχων καμπυλών τρωτότητας. Η αξιολόγηση κινδύνου της περιοχής ενδιαφέροντος πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δυνητικά σενάρια που υπολογίζονται μαζί με τις αντίστοιχες συνέπειές τους συνδυάζοντας τα αποτελέσματα κινδύνου όλων των μεμονωμένων κατασκευών. Η λεπτομερής αξιολόγηση όλων των γεγονότων που μπορεί να προκύψουν με την αντίστοιχη ζημιά και απώλεια που προβλέπεται οδηγεί σε ένα μεγάλο «δέντρο» πιθανών γεγονότων, το οποίο μπορεί αργότερα να «κλαδευτεί» στη φάση λειτουργίας trans-event. Αυτή η διαδικασία κλαδέματος στοχεύει στη διευκόλυνση της αξιολόγησης μέσω του TwinCity, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα, κατά τη φάση trans-event η οποία αντιστοιχεί σ' ένα γεγονός που μόλις συνέβη ή συμβαίνει «σε πραγματικό χρόνο», οι περιορισμένες πληροφορίες που είναι διαθέσιμες από τους αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την περικοπή του πλήρους συνόλου των πιθανών σεναρίων. Ως εκ τούτου, δομείται ένα μικρότερο και ευκολότερα διαχειρίσιμο σύνολο των πιο πιθανών αποτελεσμάτων, το οποίο μπορεί να οδηγήσει τους χειριστές σε καλύτερες εκτιμήσεις για το τι πρόκειται να συμβεί μετά από αυτό το γεγονός σε σύγκριση με την πλήρη αξιολόγηση του τι θα μπορούσε να έχει συμβεί (χωρίς πληροφορίες από αισθητήρες).



Σχήμα 17: Εκτίμηση πριν από το συμβάν για «όλα» τα πιθανά σενάρια της για τη περιοχή μελέτης συνδυάζοντας το MHVM με τα πεδία μέτρησης έντασης.

5.1 Αρχείο Metadata

Το αρχείο μεταδεδομένων περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τις καμπύλες τρωτότητας και συνεπειών ανά κατασκευή και για κάθε κατάσταση ζημιάς (DS). Για τις κατασκευές που εξετάζονται μέσω της εκτίμησης απωλειών σε επίπεδο συστήματος, οι αντίστοιχες καμπύλες τρωτότητας είναι συναρτήσεις πιθανοτήτων τιμών του μέτρου έντασης (π.χ. η μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους όσον αφορά τον σεισμικό κίνδυνο). Σε αυτήν την περίπτωση, οι καμπύλες τρωτότητας παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις βλάβες ολόκληρης της δομής, αλλά δεν παρέχουν συγκεκριμένες πληροφορίες για τα επιμέρους στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται. Από την άλλη πλευρά, για τα στοιχεία που εξετάζονται μέσω της εκτίμησης απωλειών σε επίπεδο επιμέρους στοιχείων, υπάρχουν διαθέσιμες οι τρωτότητες στο αρχείο μεταδεδομένων που έχουν δημιουργηθεί με βάση το EDP του μεμονωμένου στοιχείου. Και στις δύο περιπτώσεις, αυτές οι τρωτότητες χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση κινδύνου.

Η γενική μορφή του αρχείου μεταδεδομένων είναι λίγο πολύ η ίδια για τις κατασκευές που εξετάζονται και με τους δύο τρόπους, με ορισμένες μόνο λεπτομέρειες να διαφέρουν μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Το αρχείο μεταδεδομένων χαρακτηρίζεται από το όνομα ή το αναγνωριστικό του στοιχείου (asset_name) ακολουθούμενο από μια προκαθορισμένη επέκταση ως "asset_name.mtdata.mat/json". Εκτός από το αρχείο mat (παράγεται μέσω του λογισμικού MATLAB), δημιουργείται επίσης ένα αρχείο json με τα μεταδεδομένα ανά στοιχείο, που είναι η πιο κατάλληλη μορφή για την αξιολόγηση κινδύνου ολόκληρου του δικτύου (πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού Python). Το αρχείο mat χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ανεξάρτητων σεναρίων για τις κατασκευές που εξετάζονται μέσω της εκτίμησης απωλειών σε επίπεδο επιμέρους στοιχείων. Ως εκ τούτου, το αρχείο μεταδεδομένων κάθε μεμονωμένου στοιχείου μπορεί να αποθηκευτεί σε μορφή αρχείου mat ή json και να μετατραπεί από τη μία μορφή στην άλλη μέσω του διαθέσιμου λογισμικού.

5.1.1 Αρχείο Metadata για εκτίμηση απωλειών σε επίπεδο επιμέρους στοιχείων

Η τυπική δομή ενός αρχείου μεταδεδομένων mat και json παρουσιάζεται για την περίπτωση των στοιχείων που εξετάζονται μέσω της μεθόδου εκτίμησης απωλειών σε επίπεδο επιμέρους στοιχείων. Τα αρχεία και τα σχήματα που παρουσιάζονται εδώ δεν αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις από κατασκευές του TwinCity, αλλά αναφέρονται σε ενδεικτικά παραδείγματα με πλασματικά δεδομένα που στοχεύουν να περιγράψουν την τυπική δομή των αρχείων που αποτελούν το MHVM.

5.1.1.1 Αρχείο mtdata.mat

Το Σχήμα 18 παρουσιάζει ένα τυπικό αρχείο mtdata.mat, το οποίο δημιουργείται χρησιμοποιώντας το MATLAB. Όπως φαίνεται, το αρχείο μεταδεδομένων αποτελείται από 5 πεδία. Στη συνέχεια παρέχεται περιγραφή για καθένα από αυτά τα πεδία σχετικά με τη δομή και το περιεχόμενό τους.

Import	Name	Size	Bytes	
☒	mtdata	1x1	1688009	

```

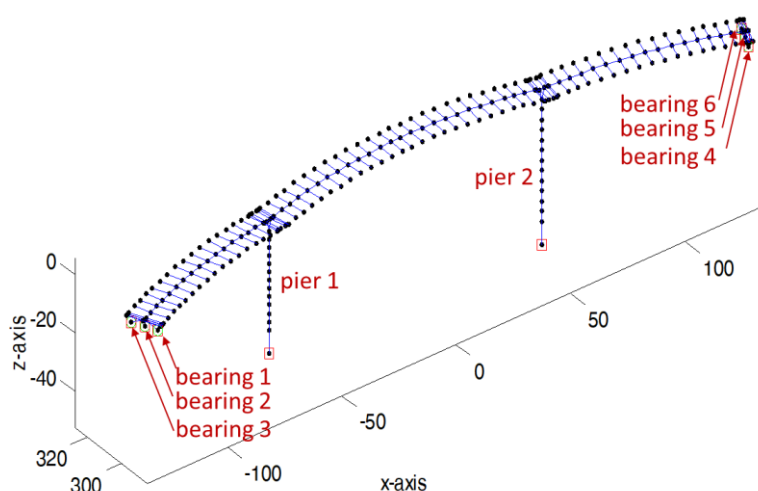
SerialNumberingFig: [
    ComponentsData: [
        Units: [
            Components: {
                AssetsData: [

```

Σχήμα 18: Παράδειγμα τυπικού αρχείου μεταδεδομένων για κατασκευές μέσω της προσέγγισης βασισμένης στα επιμέρους στοιχεία.

- **“.SerialNumberingFig”**

Για κάθε μεμονωμένο στοιχείο αντιστοιχεί ένας σειριακός αριθμός ο οποίος απεικονίζεται σε μια εικόνα με τους σειριακούς αριθμούς όλων των στοιχείων που εξετάστηκαν σε ολόκληρη την κατασκευή. Για παράδειγμα, το Σχήμα 19 παρουσιάζει μια γέφυρα που υποτίθεται ότι είναι η κατασκευή που εξετάζεται. Σε αυτήν την περίπτωση, τα σημεία έδρασης (bearings) και τα σημεία στήριξης (piers) είναι τα κρίσιμα στοιχεία από τα οποία αποτελείται. Ως εκ τούτου, ένα σχήμα αποθηκεύεται στο πεδίο `“.SerialNumberingFig”` του αρχείου μεταδεδομένων με την αρίθμηση των στοιχείων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι η αρίθμηση πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τα αποτελέσματα της MSA. Για παράδειγμα, όσον αφορά τα σημεία στήριξης, τα αποτελέσματα MSA για την στήριξη 1 (σε όρους EDP) βρίσκονται στην πρώτη καταχώρηση του αρχείου αποτελεσμάτων, τα αποτελέσματα για την στήριξη 2 στη δεύτερη καταχώρηση κ.λπ.



Σχήμα 19: Παράδειγμα τυπικού σχήματος σειριακής αρίθμησης και περιγραφής στοιχείων για μια γέφυρα (αποθηκευμένο στο πεδίο `“.SerialNumberingFig”` του αρχείου `asset_name.mtdata.mat`).

- **“.ComponentsData”**

Αυτό το πεδίο περιλαμβάνει τα δεδομένα για κάθε μεμονωμένο στοιχείο. Σε αυτό το πεδίο, ορίζονται γενικές κατηγορίες σχετικά με τα μέτρα δομικής απόκρισης, την καμπύλη τρωτότητας και τις συνεπειών. Το μέτρο δομικής απόκρισης πρέπει να έχει την ίδια ονομασία με την αντίστοιχη ετικέτα EDP των αποτελεσμάτων MSA. Ένα παράδειγμα του πεδίου `“.ComponentsData”` φαίνεται στο Σχήμα 20 όπου ορίζονται οι γενικές κατηγορίες των στοιχείων `"Bearing.001"`, `"Bearing.002"` και `"Pier.001"`, μαζί με το EDP που επιλέγεται ανά στοιχείο (πλασματικά δεδομένα, dummy data) και τις σχετικές καμπύλες τρωτότητας για τα DS (`fragpar`), κόστους (`costpar`), περιορισμού της κυκλοφορίας (`trafredpar`) και χρόνου διακοπής λειτουργίας (`downpar`). Στο Σχήμα 21, παρουσιάζεται ο αριθμός των καταστάσεων βλάβης DS και ο χαρακτηρισμός τους για ένα πλασματικό στοιχείο. Όπως φαίνεται, για αυτό το τυχαίο στοιχείο ορίζονται τέσσερις καταστάσεις βλάβης (1–4), ενώ το πεδίο `fragpar` ανά DS προσδιορίζει ότι η αντίστοιχη καμπύλη τρωτότητας ακολουθεί λογαριθμική κατανομή (2η στήλη `"longcdf"`) και τις αντίστοιχες παραμέτρους στην 3η στήλη.

Fields	name	EDP	DS	fragpar	costpar	trafredpar	downtimepar
1	'Bearing.001'	'maxbdr_srss'	1x4 cell	4x3 cell	4x2 cell	4x2 cell	4x2 cell
2	'Bearing.002'	'maxbdrn'	1x4 cell	4x3 cell	4x2 cell	4x2 cell	4x2 cell
5	'Pier.001'	'maxidr_srss'	1x4 cell	4x3 cell	4x2 cell	4x2 cell	4x2 cell

Σχήμα 20: Παράδειγμα ορισμού δεδομένων στοιχείου για μια γέφυρα (asset_name.mtdata.mat, .ComponentsData πεδίο).

ComponentsData(1).DS				
1	2	3	4	
1	2	3	4	

(a)

ComponentsData(1).fragpar			
	1	2	3
1	1	'logncdf'	1x2 cell
2	1	'logncdf'	1x2 cell
3	1	'logncdf'	1x2 cell
4	1	'logncdf'	1x2 cell

(b)

Σχήμα 21: Παράδειγμα (α) καταστάσεων βλάβης (DS) και (β) ορισμού καμπύλων τρωτότητας για ένα στοιχείο (fragpar) (πεδίο asset_name.mtdata.mat, .ComponentsData.DS και .ComponentsData.fragpar).

• “.Units”

Οι μονάδες μέτρησης (units) κάθε καμπύλης συνέπειας ορίζονται σ’ αυτή την κατηγορία. Το Σχήμα 22 παρουσιάζει ένα παράδειγμα της τυπικής δομής αυτού του πεδίου. Όπως φαίνεται, εκτός από τις μονάδες, παρέχεται επίσης μια σύντομη περιγραφή για κάθε καμπύλη συνέπειας.

Field	Value
costpar	1x2 cell
trafredpar	1x2 cell
downtimepar	1x2 cell

Units.costpar	
1	2
euros	cost

Σχήμα 22: Παράδειγμα ορισμού μονάδων των καμπυλών συνέπειας (asset_name.mtdata.mat, πεδίο .Units).

• “.Components”

Το πεδίο «.Components» περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα στοιχεία της κατασκευής που λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση κινδύνου. Είναι δομημένο στο MATLAB ως ένας πίνακας κελιών του οποίου οι εγγραφές $i = 1 \dots N$ αντιστοιχούν στα στοιχεία με σειριακό αριθμό $i = 1 \dots N$ (Σχήμα 20). Ανά συστατικό παρέχονται δύο καταχωρίσεις, δηλαδή το όνομα της κατηγορίας του στοιχείου που πρέπει να συνάδει με την ονομασία των καμπυλών τρωτότητας και συνέπειας (Σχήμα 21) και τον αριθμό αυτών των στοιχείων. Για παράδειγμα, στην τυπική δομή του πεδίου που απεικονίζεται στο Σχήμα 23, υποτίθεται ότι όλα τα σημεία έδρασης είναι του ίδιου γενικού τύπου «Bearing.001» και τα σημεία στήριξης του τύπου «Pier.001».

```
% define the components of the asset
metad.Components{1}={'Bearing.001',1,'Pier.001',1};
metad.Components{2}={'Bearing.001',1,'Pier.001',1};
metad.Components{3}={'Bearing.001',1};
metad.Components{4}={'Bearing.001',1};
metad.Components{5}={'Bearing.001',1};
metad.Components{6}={'Bearing.001',1};
```

Σχήμα 23: Παράδειγμα ορισμού των στοιχείων για μια γέφυρα (asset_name.mtdata.mat, πεδίο .Components).

- Σε αυτό το πεδίο του αρχείου μεταδεδομένων mat αποθηκεύονται ορισμένες γενικές πληροφορίες σχετικά με τις κατασκευές. Αυτές οι πληροφορίες μπορεί να είναι γενικές καμπύλες τρωτότητας και συνέπειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί εάν μια κατασκευή θα καταρρεύσει. Επίσης σε αυτό το πεδίο, μπορούν να αποθηκευτούν δεδομένα σχετικά με την πιθανή κατεδάφιση της κατασκευής και τις συνέπειες για την αντικατάστασή της.

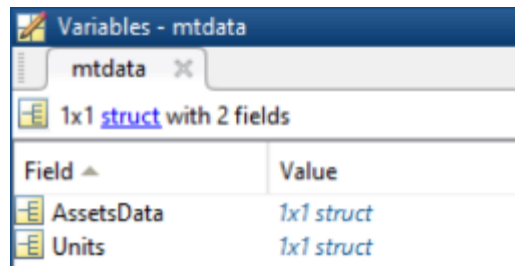
Μία τυπική δομή ενός αρχείου json με τα μεταδεδομένα μιας κατασκευής που αντιμετωπίζονται μέσω αυτής της προσέγγισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 24. Πρακτικά πρόκειται για τις ίδιες πληροφορίες που αποθηκεύονται στο αρχείο mat, ενώ διαφέρει μόνο η μορφή του αρχείου. Τα δεδομένα που εμφανίζονται σε αυτό το σχήμα είναι πλασματικά και δεν αναφέρονται κατασκευές που μελετώνται στο TwinCity, το Σχήμα 24 στοχεύει να παρουσιάσει τη βασική δομή ενός αρχείου μεταδεδομένων json. Όπως παρουσιάζεται, αρχικά ορίζονται τα "units" και "consequences_by_taxonomy". Για παράδειγμα, οι χαρακτηρισμοί "cost" και "euros" μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των οικονομικών συνεπειών σε ευρώ. Η ταξινόμηση χρησιμοποιείται για να συνδέσει κάθε μεμονωμένο στοιχείο με τις καμπύλες τρωτότητας και συνέπειας. Στη συνέχεια, για ολόκληρη την κατασκευή, καθώς και για τα στοιχεία που ορίζονται για την συγκεκριμένη κατασκευή, ορίζονται τα «damage_types» στο αρχείο json. Συγκεκριμένα, το όνομα κάθε στοιχείου «component» ορίζεται με το «id» και η περιγραφή του με τα «damage_states». Στη συνέχεια, για τα "consequences_per_edp" ορίζονται οι παράμετροι "vuln_params" ανά στοιχείο.

Σχήμα 24: Παράδειγμα του αρχείου `mtdata.json` για ένα πλασματικό στοιχείο μέσω της προσέγγισης μελέτης που βασίζεται σε επιμέρους στοιχεία.

Η τυπική δομή ενός αρχείου mat και json μεταδεδομένων παρουσιάζεται για την περίπτωση στοιχείων που προσδιορίζονται μέσω της εκτίμησης απωλειών σε επίπεδο συστήματος. Τα αρχεία και τα σχήματα που παρουσιάζονται εδώ δεν εξετάζουν συγκεκριμένες περιπτώσεις κατασκευών του TwinCity, αλλά αναφέρονται σε μερικά ενδεικτικά παραδείγματα για πλασματικά δεδομένα που στοχεύουν να περιγράψουν την τυπική δομή των αρχείων που αποτελούν το MHVM.

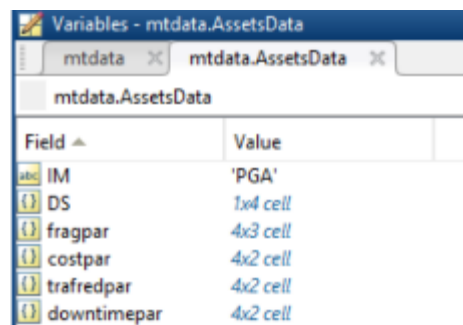
5.1.2.1 Αρχείο mtdata.mat

Το Σχήμα 25 παρουσιάζει τη δομή ενός τυπικού αρχείου μεταδεδομένων mat. Όπως φαίνεται, δύο κύρια πεδία περιλαμβάνονται στο αρχείο mtdata.mat, δηλαδή τα "AssetsData" και τα "Units". Στο πρώτο πεδίο του MATLAB, το όνομα του μέτρου έντασης αποθηκεύεται στο πεδίο «IM», καθώς και τα δεδομένα σχετικά με καμπύλες τρωτότητας και συνέπειας για ολόκληρο το σύστημα (Σχήμα 26). Στο δεύτερο πεδίο, οι μονάδες μέτρησης αποθηκεύονται παρόμοια με την προηγούμενη ενότητα (Σχήμα 27).



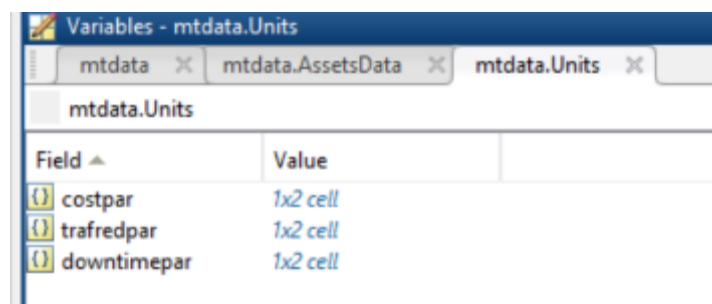
Field	Value
AssetsData	1x1 struct
Units	1x1 struct

Σχήμα 25: Τυπική δομή ενός αρχείου mtdata.mat για στοιχεία που αντιμετωπίζονται μέσω της μελέτης σε επίπεδο κατασκευής.



Field	Value
IM	'PGA'
DS	1x4 cell
fragpar	4x3 cell
costpar	4x2 cell
trafredpar	4x2 cell
downtimepar	4x2 cell

Σχήμα 26: Τυπικό παράδειγμα της δομής του πεδίου .AssetsData για μελέτη σε επίπεδο κατασκευής.



Field	Value
costpar	1x2 cell
trafredpar	1x2 cell
downtimepar	1x2 cell

Σχήμα 27: Τυπικό παράδειγμα της δομής του πεδίου .Units για μελέτη σε επίπεδο κατασκευής.

5.1.2.2 Αρχείο mtdata.json

Η δομή ενός αρχείου json με τα μεταδεδομένα για ένα πλασματικό στοιχείο παρουσιάζεται στο Σχήμα 28. Όπως φαίνεται, η τυπική δομή του αρχείου μεταδεδομένων json σε αυτήν την περίπτωση είναι παρόμοια με αυτή για την ανάλυση σε επίπεδο επιμέρους στοιχείων, όπως ήδη παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η κύρια διαφορά είναι ότι αντί για τα δεδομένα ανά μεμονωμένο στοιχείο, παρέχονται τα «καθολικά» δεδομένα για ολόκληρη την κατασκευή.

```

{"midata": { "units": {
    "speed_limit": "km/h",
    "cost": "euros/km",
    "time": "days" },
    "asset_taxonomy": { "pavement",
        "hazard_type": "weather",
        "mt_data": { "max_speed_limit": 120.0 ,
            "n_lanes": 3},
        "im_types": [{"im_type": "IM1"},
            "damage_type": [{"damage_type": "ultimate",

{"im_type": "u10"},
        "damage_types": [{"damage_type": "ultimate",
            "component_damage_state_description": [{
                "component": "global",
                "ipr": "u10",
                "damage_states": [
                    {
                        "id": "DS0", "description": "no damage" },
                        {
                            "id": "DS1", "description": "slight wind" },
                            {
                                "id": "DS2", "description": "moderate wind" },
                                {
                                    "id": "DS3", "description": "severe wind" } ] ] },

"consequences_per_edp": [{
    "component": "global",
    "vuln_params": [{"damage_state": 1,
        "fragility": {"dist": "logncdf", "params": [0.1, 0.05]},
        "cost": { "dist": "tnorminv2", "params": [0.0, 0.0, -0.01, 9000000000000000000.0] },
        "downtime": [
            { "lane": 1,
                "dist": "tnorminv2",
                "params": [0.04, 0.00, 0.0, 9000000000000000000.0] },
                { "lane": 2,
                    "dist": "tnorminv2",
                    "params": [0.04, 0.0, 0.0, 9000000000000000000.0] } ],
        "max_speed_limit": [
            { "lane": 1,
                "dist": "tnorminv2",
                "params": [90.0, 0.00, 0.0, 130.0] },
                { "lane": 2,
                    "dist": "tnorminv2",
                    "params": [90.0, 0.00, -0.01, 130.0] } ] ] },

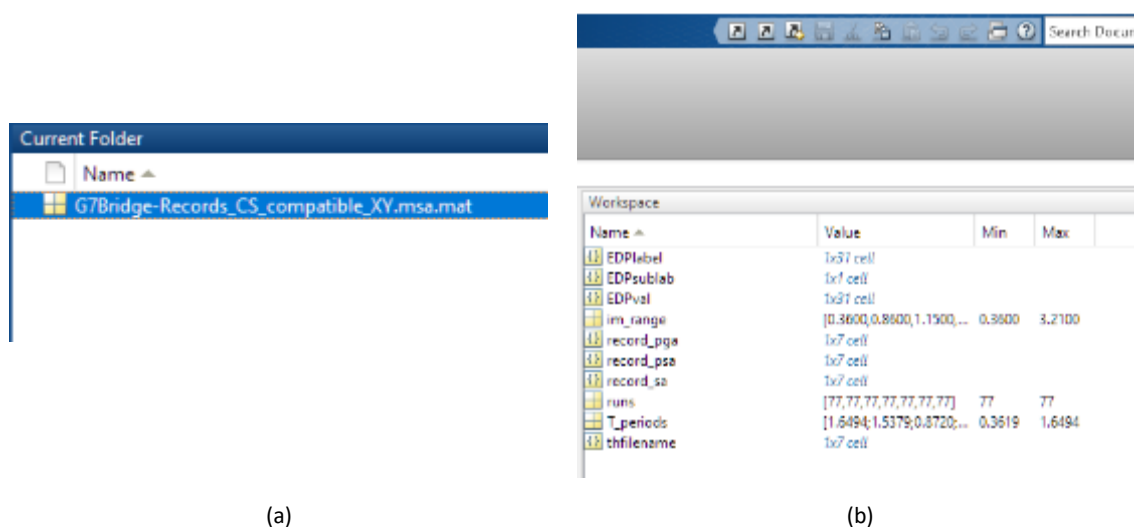
"damage_state": 2,
        "fragility": {"dist": "logncdf", "params": [14.0, 0.0]},
        "cost": { "dist": "tnorminv2", "params": [0.0, 0.10, -0.01, 9000000000000000000.0] },
        "downtime": [
            { "lane": 1,
                "dist": "tnorminv2",
                "params": [0.04, 0.00, 0.0, 9000000000000000000.0] },
                { "lane": 2,
                    "dist": "tnorminv2",
                    "params": [0.04, 0.00, 0.0, 9000000000000000000.0] } ],
        "max_speed_limit": [
            { "lane": 1,
                "dist": "tnorminv2",
                "params": [60.0, 0.00, -0.01, 130.0] },
                { "lane": 2,
                    "dist": "tnorminv2",
                    "params": [60.0, 0.00, -0.01, 130.0] } ] ] },

"damage_state": 3,
        "fragility": {"dist": "logncdf", "params": [22.0, 0.20]},
        "cost": { "dist": "tnorminv2", "params": [0.0, 0.10, -0.01, 9000000000000000000.0] },
        "downtime": [
            { "lane": 1,
                "dist": "tnorminv2",
                "params": [0.04, 0.00, 0.0, 9000000000000000000.0] },
                { "lane": 2,
                    "dist": "tnorminv2",
                    "params": [0.04, 0.00, 0.0, 9000000000000000000.0] } ],
        "max_speed_limit": [
            { "lane": 1,
                "dist": "tnorminv2",
                "params": [0.0, 0.00, -0.01, 130.0] },
                { "lane": 2,
                    "dist": "tnorminv2",
                    "params": [0.0, 0.00, -0.01, 130.0] } ] ] ] ] ] }
    }
}

```

Σχήμα 28: Παράδειγμα του αρχείου `mtdata.json` για ένα πλασματικό στοιχείο που μελετάται σε επίπεδο κατασκευής.

5.2 Αρχείο MSA



Σχήμα 29: (α) Τυπικό παράδειγμα αρχείου MSA και (β) μεταβλητών που είναι αποθηκευμένες σε αρχείο MSA.

Η τυπική μορφή του αρχείου που περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της MSA για ένα σενάριο παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα. Το Σχήμα 29α παρουσιάζει την τυπική δομή του αρχείου MSA για ένα πλασματικό στοιχείο.

Η απόκριση EDP ανά επίπεδο IM αποθηκεύεται στο αρχείο απόκρισης MSA, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29β. Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές που αποθηκεύονται ανά στοιχείο ή ανά κατασκευή στο αρχείο MSA παρατίθενται παρακάτω:

- **EDPlabel:** συμβολοσειρές που περιέχουν το όνομα καθενός από τα EDP που καταγράφονται
- **EDPsublab:** συμβολοσειρές που περιέχουν μια σύντομη περιγραφή για καθεμία από τις εξεταζόμενες μεταβλητές EDP
- **EDPval:** καταγεγραμμένες τιμές EDP
- **im_range:** στάθμες μέτρου έντασης (π.χ. λωρίδες IM)
- **runs:** αριθμός αναλύσεων ανά επίπεδο IM
- **T_periods:** οι πρώτες N περίοδοι δόνησης της κατασκευής (όπου το N ορίζεται από τον χρήστη στο λογισμικό δομικής ανάλυσης)
- **thfilename:** τα ονόματα των σεισμικών εδαφικών καταγραφών που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση κατασκευών

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση της ανάλυσης σεισμικής απόκρισης αποθηκεύονται επίσης οι ακόλουθες μεταβλητές:

- **record_pga:** το PGA κάθε σεισμικής καταγραφής (και στοιχείου της κατασκευής)
- **record_psa:** οι ψευδές (pseudo) τιμές $S_a(T)$ κάθε σεισμικής καταγραφής (και στοιχείου της κατασκευής) για καθεμία από τις περιόδους που βρίσκονται στο $T_periods$
- **record_sa:** οι τιμές $S_A(T)$ κάθε σεισμικής καταγραφής (και στοιχείου της κατασκευής) για καθεμία από τις περιόδους που βρίσκονται στο $T_periods$

6 Συμπεράσματα

Στο παρόν έγγραφο παρουσιάστηκε η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του μοντέλου απωλειών πολλαπλών κινδύνων. Δόθηκαν οι ορισμοί βασικών ποσοτήτων και παρουσιάστηκαν οι δύο προσεγγίσεις που εφαρμόζονται για την αξιολόγηση του κινδύνου/τρωτότητας/ζημιάς/απώλειας. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν οι κατασκευές που αποτελούν το μοντέλο έκθεσης του TwinCity και πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τους κινδύνους που τις επηρεάζουν. Τέλος, δόθηκε η τυπική δομή των MHVMs όπως αναπτύσσονται με τη χρήση βιβλιοθηκών λογισμικού καθώς και ενδεικτικά παραδείγματα της δομής των συγκεκριμένων αρχείου.

7 Βιβλιογραφία

Baker, J. W. (2015). Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis. *Earthquake Spectra*, 31(1), 579–599. DOI: 10.1193/021113EQS025M

Cornell, C. A. & Krawinkler, H. (2000). Progress and challenges in seismic performance assessment. *PEER Center News* 2000, 3(2), 1–4.

Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606.

D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvastikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Crowley, H., & Silva, V. (2015). Guidelines for analytical vulnerability assessment of low/mid-rise Buildings, Vulnerability Global Component project. DOI: 10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12

Google maps: <https://www.google.com/maps>

FEMA (2003). HAZUS-MH MR1: Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.

FEMA (2012). Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1, Methodology, Report No. FEMA P-58-1, Washington D.C.

Jalayer, F. & Cornell, C. A. (2009). Alternative non-linear demand estimation methods for probability-based seismic assessments. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(8), 951–972. DOI: 10.1002/eqe.876

Jalayer, F. (2003). Direct Probabilistic Seismic Analysis: Implementing non-linear dynamic assessments. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford Univ., Stanford, CA.

Mackie, K. & Stojadinovic, B. (2001). Probabilistic seismic demand model for California highway bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 6(6), 468–481. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:6(468)

The MathWorks Inc. (2022). MATLAB version: 9.13.0 (R2022b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>

Padgett, J.E., & DesRoches, R. (2008). Methodology for the development of analytical fragility curves for retrofitted bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(8), 1157–1174. DOI: 10.1002/eqe.801

Porter, K. (2019). A Beginner's guide to fragility, vulnerability, and risk. University of Colorado Boulder, 126 pp., <http://spot.colorado.edu/~porterka/Porter-beginnersguide.pdf>.

Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace.

Vamvatsikos, D. & Cornell, C.A. (2002). Incremental dynamic analysis. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31(3), 491–514. DOI: 10.1002/eqe.141

Vamvatsikos, D., & Cornell, C.A. (2005). Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 34(13):1573–1600. DOI: 10.1002/eqe.496