



D2.3

# Resilience framework

Πλαίσιο αναταξιμότητας

## 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

|                                     |                                                                    |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Dissemination level</b>          | Public (PU) - Fully open                                           |
| <b>Type of deliverable</b>          | R - Document, report                                               |
| <b>Work package</b>                 | WP2 – Asset ontology, system architecture and resilience framework |
| <b>Deliverable number</b>           | D2.3 Resilience framework                                          |
| <b>Status - version, date</b>       | Final – V1.0                                                       |
| <b>Deliverable leader</b>           | N. Karaferis                                                       |
| <b>Contractual date of delivery</b> | 31/01/2023                                                         |

## Ποιοτικός έλεγχος

|                      | Name           | Organisation | Date       |
|----------------------|----------------|--------------|------------|
| <b>Peer review 1</b> | Δ. Βαμβάτσικος | ΕΜΠ          | 04/10/2022 |
| <b>Peer review 2</b> | Β. Μελισσιανός | ΕΜΠ          | 22/11/2022 |

## Ιστορικό παραδοτέου

| Version    | Date       | Author       | Summary of changes            |
|------------|------------|--------------|-------------------------------|
| <b>0.1</b> | 22/09/2022 | N. Καραφέρης | Πρώτο προσχέδιο εγγράφου      |
| <b>1.0</b> | 14/12/2022 | 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         |
| <b>Σύνοψη .....</b>                                          | <b>5</b>  |
| <b>1 Εισαγωγή .....</b>                                      | <b>6</b>  |
| 1.1 Σκοπός του παραδοτέου .....                              | 6         |
| 1.2 Στοχευόμενο κοινό.....                                   | 6         |
| <b>2 Γενικό πλαίσιο .....</b>                                | <b>7</b>  |
| <b>3 Εκτίμηση διακινδύνευσης μακροπρόθεσμης σκοπιάς.....</b> | <b>9</b>  |
| <b>4 Εκτίμηση διακινδύνευσης βραχυπρόθεσμης σκοπιάς.....</b> | <b>12</b> |
| <b>5 Συμπεράσματα .....</b>                                  | <b>14</b> |
| <b>6 Βιβλιογραφία .....</b>                                  | <b>15</b> |

## Κατάλογος σχημάτων

|                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 1: Τυπική διαδικασία εκτίμησης της διακινδύνευσης.....                                                                                                                                                                                  | 8  |
| Σχήμα 2: Σχηματικό παράδειγμα για την εφαρμογή μιας διαδικασίας εκτίμησης της διακινδύνευσης και την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου μιας πόλης.....                                                                                             | 8  |
| Σχήμα 3: Σχηματική παρουσίαση της μεθοδολογίας εκτίμησης διακινδύνευσης με μακροπρόθεσμη σκοπιά. ....                                                                                                                                         | 11 |
| Σχήμα 4: Σχηματική παρουσίαση της μεθοδολογίας εκτίμησης διακινδύνευσης για μεσοπρόθεσμη σκοπιά με χρήση αισθητήρων καταγραφής. Γκριζαρισμένα σε σχέση με το Σχήμα 3 εμφανίζονται σενάρια μη συμβατά με τις παρατηρήσεις των αισθητήρων ..... | 13 |

## Κατάλογος συντομογραφιών και ακρωνύμιων

| Συντομογραφία | Ολογράφως                                   |
|---------------|---------------------------------------------|
| <b>PBEE</b>   | Performance Based Earthquake Engineering    |
| <b>TPDES</b>  | Total Probability Discrete Event Simulation |
| <b>MAF</b>    | Mean Annual Frequency                       |
| <b>IM</b>     | Intensity Measure                           |
| <b>EDP</b>    | Engineering Demand Parameter                |
| <b>DS</b>     | Damage State                                |
| <b>DV</b>     | Decision Variables                          |

## Σύνοψη

Το παραδοτέο D2.3 “Resilience framework” παρουσιάζει τις διαδικασίες εκτίμησης του κινδύνου στις κατασκευές και σε ευρύτερα συστήματα καθώς και προστασίας τους από φυσικές καταστροφές. Με την ποσοτικοποίηση αυτή του κινδύνου και των εκάστοτε φυσικών επιπτώσεων στις κατασκευές, μπορούν να σχεδιαστούν και να προγραμματιστούν οι αντίστοιχες παρεμβάσεις και επισκευές που πιθανώς να χρειαστούν για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων του εκάστοτε ακραίου φαινομένου (σεισμοί, πλημμύρες, καταιγίδες).

Στο πλαίσιο του TwinCity παρουσιάζονται δύο βασικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση της διακινδύνευσης τόσο μακροπρόθεσμα όσο και μεσοπρόθεσμα. Για την μακροπρόθεσμη προσέγγιση αξιοποιούνται κλασσικές προσεγγίσεις της αποτίμησης και διακινδύνευσης που χρησιμοποιούνται σε διάφορες μορφές στις περισσότερες συνήθεις πρακτικές εφαρμογές, τόσο για την αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου όσο και για οποιαδήποτε άλλη πηγή διακινδύνευσης διατηρώντας την ίδια γενική φιλοσοφία. Για τη μεσοπρόθεσμη εκτίμηση του κινδύνου και των αντίστοιχων επιπτώσεων, εισάγεται στη μεθοδολογία το στοιχείο της χρήσης αισθητήρων καταγραφής διαφόρων δεδομένων που μπορεί να καταγράφουν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά και την ένταση του φαινομένου, ή ακόμα και δεδομένα που αφορούν άμεσα στην απόκριση και στις εκάστοτε μεταβολές στην κατάσταση των διαφόρων κατασκευών του ευρύτερου συστήματος. Τα παραπάνω αποτελούν βασικές μεθοδολογίες που με διάφορους τρόπους θα αξιοποιηθούν κατά κόρον κατά τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο πλαίσιο του TwinCity ως οι πλέον ενδεδειγμένες στρατηγικές για την ανάλυση της διακινδύνευσης των συγκεκριμένων εφαρμογών που εξετάζονται στα πλαίσια του έργου.

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός του παραδοτέου

Το παραδοτέο D2.3 “ Resilience framework” παρουσιάζει το γενικότερο πλαίσιο της φιλοσοφίας της εκτίμησης διακινδύνευσης σε διάφορες κατασκευές ενδιαφέροντος. Είναι οι αρχές που παρουσιάζονται το παρόν παραδοτέο στις οποίες θα βασιστούν οι εφαρμογές του προγράμματος με μεθοδολογίες που θα προσδιοριστούν πιο αναλυτικά σε επόμενα παραδοτέα. Παρόλα αυτά το γενικό πλαίσιο που παρουσιάζεται εδώ διατρέχει το σύνολο των μεθοδολογιών αυτών και ως εκ τούτου εμπεριέχει βασικές πληροφορίες για τη σκοπιά του συνολικού προγράμματος.

## 1.2 Στοχευόμενο κοινό

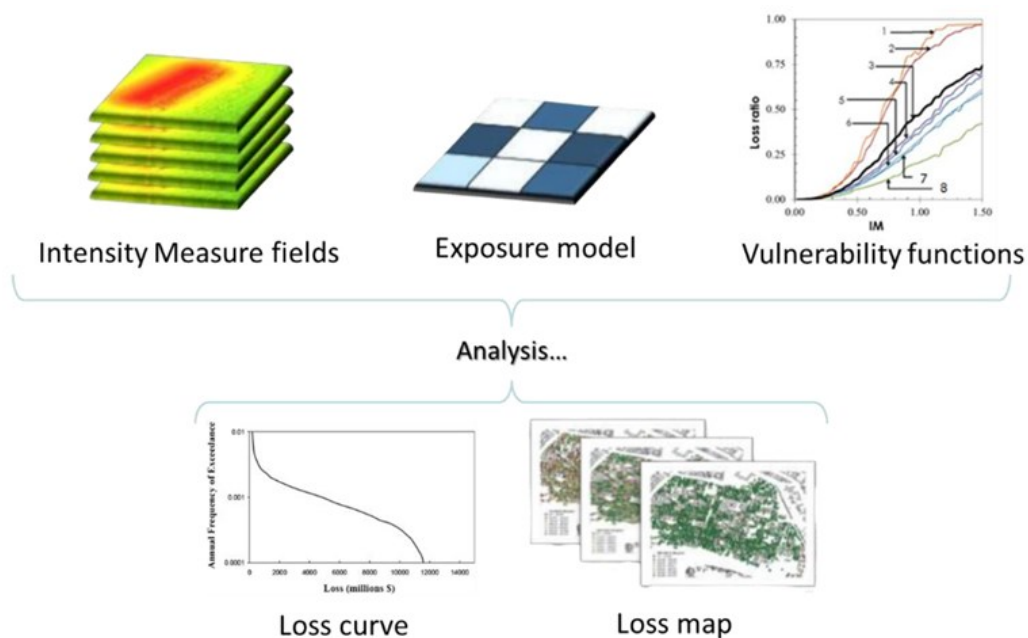
Το έγγραφο D2.3 είναι ένα δημόσιο έγγραφο και θα είναι προσβάσιμο από όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς, και συμμετέχοντες στο πρόγραμμα TwinCity. Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον για ερευνητές και υπηρεσίες που εμπλέκονται στην εκτίμηση διακινδύνευσης κατασκευών ή και ολόκληρων περιοχών. Οι μεθοδολογίες που παρουσιάζονται μπορούν μάλιστα να βοηθήσουν και σε τυχόν εκπαιδευτικούς σκοπούς που αφορούν σε νέους επιστήμονες που ενδιαφέρονται για τις εν λόγω θεματικές.

## 2 Γενικό πλαίσιο

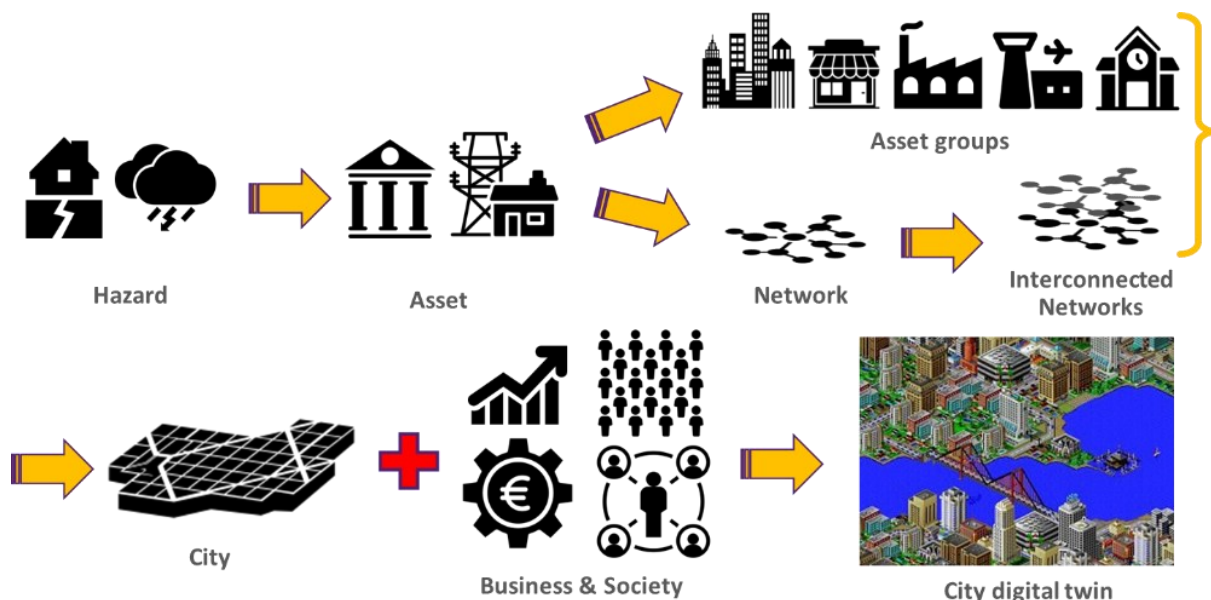
Η εκτίμηση της διακινδύνευσης στις κατασκευές, αλλά και γενικότερα σε κάθε σύστημα που χρήζει προστασίας από φυσικές καταστροφές, είναι εξαιρετικά σημαντική. Χρησιμοποιώντας διαδικασίες ποσοτικοποίησης του κινδύνου ή και της έκτασης των φυσικών συνεπειών κάποιου φαινομένου σε όρους πιθανών βλαβών, η δυνατότητα πρόληψης αλλά και σχεδιασμού πιθανών μετέπειτα παρεμβάσεων και επισκευών σε κατασκευές που έχουν πληγεί μπαίνει στο επίκεντρο, με όρους που επιτρέπουν την διαχείριση τέτοιων κρίσεων πολύ πιο αποτελεσματικά. Η προτεινόμενη διαδικασία αξιολόγησης του κινδύνου που παρουσιάζονται στο πλαίσιο του προγράμματος TwinCity ακολουθούν τις βασικές αρχές και την συνήθη πρακτική της εκτίμησης της διακινδύνευσης όπως αυτές έχουν προσδιοριστεί τις τελευταίες δεκαετίες σε σχέση και με το τρόπο διαμόρφωσης μοντέλων καταστροφών (Mitchell-Wallace et al. 2017) αλλά και στο ευρύτερο πλαίσιο της σεισμικής μηχανικής με βάση την επιτελεσματικότητα (Performance Based Earthquake Engineering ή PBEE, Cornell και Krawinkler 2000). Τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται λοιπόν για μία τέτοια διαδικασία είναι τα εξής (παραστατική απεικονίζονται στα Σχήματα 1 και 2):

- Προσδιορισμός πολλαπλών πραγματοποιήσεων πιθανών επικίνδυνων συμβάντων (π.χ. σεισμικά γεγονότα ή ακραία καιρικά φαινόμενα).
- Τα σχετιζόμενα με τα προαναφερθέντα φαινόμενα πεδία μέτρων έντασης (intensity measure fields), τα οποία παρουσιάζουν την ένταση του φαινομένου σε κάθε γεωγραφική θέση ενδιαφέροντος.
- Το μοντέλο έκθεσης (exposure model) στους άνωθεν κινδύνους των χαρακτηριστικών κατασκευών ενδιαφέροντος.
- Καμπύλες τρωτότητας (fragility curves) και απωλειών (vulnerability curves) που συνδέουν την ένταση του φαινομένου με την επίδραση της έντασης αυτής στη κατασκευή.

Με τη χρήση ενός μοντέλου Monte Carlo μεγάλης κλίμακας, πάνω σε όλα τα σενάρια επιπτώσεων που μπορεί να προκύψουν για τις κατασκευές (για παράδειγμα με τη μορφή καμπύλων ή χαρτών απωλειών), παρέχεται τόσο η συνολική στατιστική εικόνα του φαινομένου όσο και οι λεπτομερείς επιμέρους πραγματοποιήσεις των πιθανών ζημιών και απωλειών (ή οποιουδήποτε άλλου μέτρου ποσοτικοποίησης επιλεγεί) για κάθε στοιχείο και τοποθεσία ενδιαφέροντος. Συνήθως, η εστίαση είναι στη μακροπρόθεσμη αξιολόγηση προ της εκδήλωσης του φαινομένου, με στόχο να υπολογιστούν τα ετήσια μακροπρόθεσμα στατιστικά για ζημιές, απώλειες και χρόνο ανάκαμψης. Ωστόσο, η εμφάνιση χαμηλού κόστους αισθητήρων έχει επιτρέψει μια νέα εποχή πολλαπλών πηγών άμεσων δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αξιόπιστα για την ενημέρωση των μακροπρόθεσμων στατιστικών μοντέλων και για την ανάπτυξη εκτιμήσεων μεσοπρόθεσμων εκδηλώσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μαθηματικό πλαίσιο που μας επιτρέπει να διεξάγουμε τόσο μακροπρόθεσμες όσο και μεσοπρόθεσμες αξιολογήσεις με την εισαγωγή των αισθητήρων στη διαδικασία της εκτίμησης της διακινδύνευσης.



Σχήμα 1: Τυπική διαδικασία εκτίμησης της διακινδύνευσης.



Σχήμα 2

Σχήμα 2: Σχηματικό παράδειγμα για την εφαρμογή μιας διαδικασίας εκτίμησης της διακινδύνευσης και την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου μιας πόλης.

### 3 Εκτίμηση διακινδύνευσης μακροπρόθεσμης σκοπιάς

Η μακροπρόθεσμη προσέγγιση προ του συμβάντος βασίζεται κατά κύριο λόγο στο μεθοδολογικό πλαίσιο των Cornell-Krawinkler (Cornell και Krawinkler 2000), το οποίο υιοθετήθηκε από το Κέντρο Έρευνας Σεισμικής Μηχανικής του Ειρηνικού (Pacific Earthquake Engineering Research Center) για την αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου μεμονωμένων κατασκευών. Εδώ, γίνεται μια απλή επέκταση για την εφαρμογή σε πολλαπλές κατασκευές και πηγές κινδύνου. Ενώ το αρχικό πλαίσιο ήταν γραμμένο χρησιμοποιώντας συνεχείς μεταβλητές και ολοκληρώματα, η επέκταση της μεθοδολογίας εκμεταλλεύεται την πρακτικότητα της διακριτής διατύπωσης των σχέσεων σε μία διαδικασία διακριτής πιθανοτική προσομοίωσης συμβάντος (Total Probability Discrete Event Simulation - TPDES), η οποία είναι στην πραγματικότητα το σύνηθες πρότυπο για τις περισσότερες εφαρμογές στην πράξη.

$$\Delta\lambda(\mathbf{DV}) = \sum_{\mathbf{DS}} \sum_{\mathbf{EDP}} \sum_{\mathbf{IM}} p(\mathbf{DV} | \mathbf{DS}) p(\mathbf{DS} | \mathbf{EDP}) p(\mathbf{EDP} | \mathbf{IM}) \Delta\lambda(\mathbf{IM}) \quad (1)$$

Όπου:

- $\lambda(\cdot)$  είναι η συνάρτηση Μέσης Ετήσιας Συχνότητας (Mean Annual Frequency - MAF) υπέρβασης του ορίσμάτος της.
- $p(\cdot)$  είναι η αντίστοιχη συνάρτηση μάζας πιθανότητας ή πιθανότητα εμφάνισης.
- $\mathbf{IM} = (\mathbf{IM}_{i,j}, i = 1, \dots, N_{\text{peril}}, j = 1, \dots, N_{\text{site}})$  είναι το διάνυσμα των μέτρων έντασης (Intensity Measure - IM) που χρησιμοποιούνται, για την περιγραφή των  $N_{\text{peril}}$  κινδύνων ενδιαφέροντος (π.χ., ανεμος, σεισμός, πλημμύρα κλπ.) σε όλες τις  $N_{\text{site}}$  τοποθεσίες όπου βρίσκονται οι κατασκευές ενδιαφέροντος. Κάθε πραγματοποίηση του διανύσματος αντιπροσωπεύει ένα πεδίο χωρικά και χρονικά συσχετισμένων εντάσεων που είναι συμβατό με ένα σενάριο γεγονότος.
- $\mathbf{EDP} = (\mathbf{EDP}_{i,j}, i = 1, \dots, N_{\text{asset}}, j = 1, \dots, M_i)$  είναι το διάνυσμα των παραμέτρων μηχανικής απαίτησης (Engineering Demand Parameter - EDP), περιλαμβάνοντας τις  $M_i$  μεταβλητές δομικής απόκρισης που καταγράφονται από τις  $N_{\text{asset}}$  κατασκευές. Προφανώς, μπορεί να υπάρχει διαφορετικός αριθμός και τύποι EDPs για διαφορετικές κατασκευές, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και το επίπεδο λεπτομέρειας στη μοντελοποίηση που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, σε μια κατασκευή 5 ορόφων μπορεί η απόκρισή της να αντιπροσωπεύεται μόνο από τη σχετική μετακίνηση του ανώτερου ορόφου της σε σχέση με το έδαφος, όταν έχουμε ένα μοντέλο μίας διάστασης (1D), από τις 5 μέγιστες σχετικές μετακινήσεις των ορόφων της και τις 6 τιμές μέγιστης επιτάχυνσης του κάθε ορόφου, σε ένα μοντέλο δύο διαστάσεων (2D), ή και ο διπλάσιος αριθμός αυτών σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο (3D). Κάθε πραγματοποίηση του διανύσματος των IM αντιστοιχεί συνήθως σε πολλαπλές πραγματοποιήσεις EDPs, λόγω της εγγενούς αβεβαιότητας στη δομική απόκριση, δεδομένης της έντασης κινδύνου για οποιαδήποτε μεμονωμένη κατασκευή.
- $\mathbf{DS} = (\mathbf{DS}_{i,j}, i = 1, \dots, N_{\text{asset}}, j = 1, \dots, K_i)$  είναι το διάνυσμα που αντιπροσωπεύει τις στάθμες βλάβης (Damage State - DS), περιλαμβάνοντας τα  $K_i$  επίπεδα βλάβης που σχετίζονται με κάθε μία από τις  $N_{\text{asset}}$  κατασκευές. Γενικά, μπορεί κανείς να επιλέξει να δώσει έναν καθολικό χαρακτηρισμό για τη κατάσταση βλάβης σε μία κατασκευή (π.χ.,  $\mathbf{DS}_{i,1} = 0$  για καμία βλάβη, 1 για ελαφριά βλάβη κ.λ.π.), ή αντ' αυτού να ακολουθήσει μια ανάλυση κατά μέρη, χαρακτηρίζοντας με διαφορετικές καταστάσεις βλάβης διαφορετικά τμήματα της κατασκευής (Porter et al. 2001, D'Ayala et al. 2015). Για παράδειγμα, στην τελευταία περίπτωση μπορεί κανείς να λάβει υπόψη ξεχωριστά διαφορετικούς ορόφους ενός κτιρίου πολλαπλών ορόφων, ή να διαιρέσει

μία γέφυρα σε ξεχωριστά μέρη (π.χ. τα βάθρα, το κατάστρωμα, τα εφέδρανα). Αναφέρεται ότι αρχικά η μεθοδολογία Cornell-Krawinkler (Cornell and Krawinkler 2000) καθοριζόταν από συνεχείς τιμές χαρακτηρισμού της όποιος βλάβης, αντί για διακριτές στάθμες βλάβης. Παρ' όλα αυτά, οι τελευταίες είναι η πιο συνηθισμένη επιλογή για πρακτικές εφαρμογές, ενώ προφανώς ταιριάζουν καλύτερα και στην ήδη διακριτοποιημένη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη παρούσα προσέγγιση. Γενικά, όταν σκεφτόμαστε μη συνδεδεμένες κατασκευές, όπως ξεχωριστά κτίρια που δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, μπορούμε λογικά να υποθέσουμε ότι τα EDPs που αντιστοιχούν σε κάθε κτίριο θα καθορίσουν πλήρως τις αντίστοιχες κατανομές DS. Για συνδεδεμένες κατασκευές (π.χ., δίκτυα μεταφορών, μετάδοσης ενέργειας, ύδρευσης ή αυτοκινητόδρομους) η κατάσταση ενός στοιχείου του συστήματος μπορεί να υπονομευθεί από άλλα γειτονικά. Για παράδειγμα, η θραύση μιας σωλήνας ύδρευσης θα διακόψει την μεταβίβαση του νερού και σε όλες τις μετέπειτα σειρές σωληνώσεων, ενώ η αστοχία ενός πυλώνα μετάδοσης ενέργειας θα υπερφορτίσει συχνά τους γειτονικούς σε αυτόν πυλώνες, αυξάνοντας τις πιθανότητες κατάρρευσής τους. Σε κάθε περίπτωση, κάθε πραγματοποίηση του EDP θα προκαλέσει αναπόφευκτα κάποιον αριθμό διαφορετικών πραγματοποιήσεων για τα DS, και πάλι λόγω της ύπαρξης εγγενούς αβεβαιότητας.

- **DV** = (DV<sub>i</sub>, i = 1,...,N<sub>DV</sub>) είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης (Decision Variables - DV), που περιλαμβάνει τόσο τις διάφορες κατασκευές όσο και κάθε άλλο χαρακτηριστικό του συστήματος που εξετάζεται, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της κατάστασης όχι μόνο της κάθε μεμονωμένης κατασκευής αλλά και του συνολικού συστήματος ενδιαφέροντος της μελέτης. Διαφορετικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεμονωμένες κατασκευές ως DVs, από το κόστος άμεσης και έμμεσης επισκευής, το χρόνο ανάκαμψης και τους πιθανούς τραυματισμούς, κατά FEMA P-58 (FEMA 2012), ή σε επίπεδο συστήματος, συνολικό κόστος, χρόνος ανάκαμψης, καθυστερήσεις κυκλοφορίας, αριθμός πελατών χωρίς ρεύμα, αέριο ή νερό, κλπ. Επίσης, κάθε πραγματοποίηση του εκάστοτε DS μπορεί να οδηγήσει αντιστοίχως σε πολλαπλές τιμές DV.

Η Εξίσωση (1) μπορεί να διατυπωθεί πιο απλά και κατά τον ακόλουθο τρόπο:

$$\Delta\lambda(\mathbf{DV}) = \sum_{\mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}} p(\mathbf{DV} | \mathbf{IM}) \Delta\lambda(\mathbf{IM}) \quad (2)$$

όπου  $p(\mathbf{DV} | \mathbf{IM})$  μπορεί να διατυπωθεί ως η εξίσωση απωλειών:

$$p(\mathbf{DV} | \mathbf{IM}) = \sum_{\mathbf{DS}} \sum_{\mathbf{EDP}} p(\mathbf{DV} | \mathbf{DS}) p(\mathbf{DS} | \mathbf{EDP}) p(\mathbf{EDP} | \mathbf{IM}) \quad (3)$$

ή, με δεδομένα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της ανάλυσης Monte Carlo κατά τη διαδικασία TPDES, μπορεί να διατυπωθεί χρησιμοποιώντας τα διακριτά αποτελέσματα για κάθε συνδυασμό DS, EDP και IM:

$$p(\mathbf{DV} | \mathbf{IM}) = \sum_{\mathbf{DS}} \sum_{\mathbf{EDP}} p(\mathbf{DV} | \mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}) \quad (4)$$

Όπου:

$$p(\mathbf{DV} | \mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}) = \frac{p(\mathbf{DV}, \mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM})}{p(\mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM})} \quad (5)$$

Εφόσον οι εκάστοτε μεμονωμένες προσομοιώσεις θεωρηθούν ισοπίθανες, οι σχέσεις μπορούν να απλοποιηθούν ακόμα περισσότερο με τη χρήση ενός λόγου που θα προκύπτει με απλή προσμέτρηση

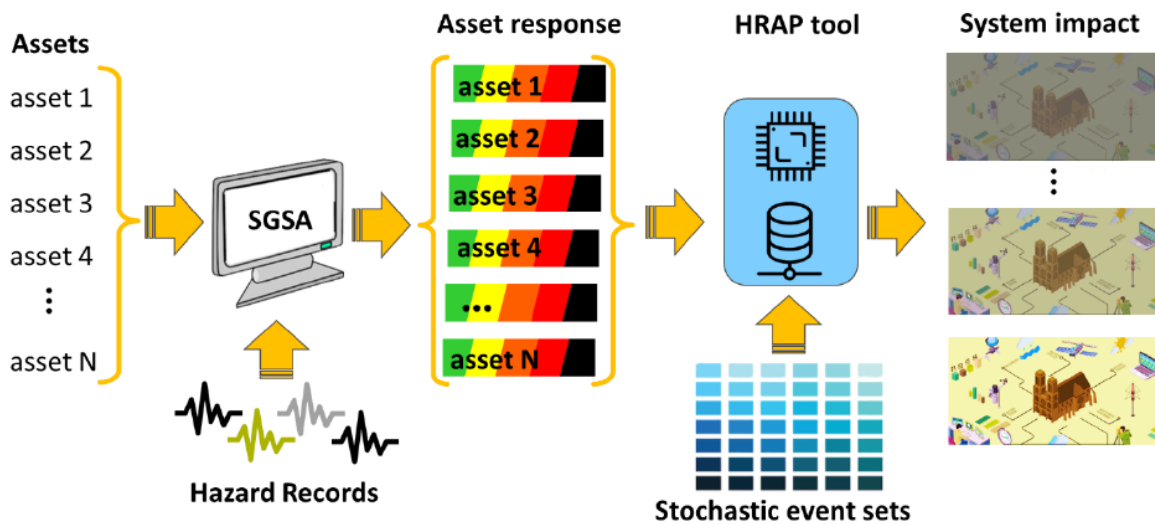
των προσομοιώσεων που οδηγούν σε ένα συγκεκριμένου τύπου αποτέλεσμα **DV** δια τις συνολικές προσομοιώσεις που θεωρήθηκαν.

$$p(\mathbf{DV} | \mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}) = \frac{\# \text{Simulations of } (\mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}) \text{ with result } \mathbf{DV}}{\# \text{Total simulations of } (\mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM})} \quad (6)$$

Συνεπώς χρησιμοποιώντας τις καμπύλες απωλειών για κάθε μεμονωμένη κατασκευή, οι παράμετροι των **DV**, **DS**, **EDP** και **IM**, περιορίζονται σε σχέση με τα στοιχεία που αφορούν την κάθε μία κατασκευή. Όταν λοιπόν εξετάζονται «ασύνδετες» και «ανεξάρτητες» μεταξύ τους κατασκευές, οι Εξισώσεις (1) και (2) μπορούν να γραφούν με πιο πρακτικό τρόπο ως εξής:

$$\Delta\lambda(\mathbf{DV}) = \sum_{i=1}^{N_{\text{asset}}} \sum_{\mathbf{DS}_i, \mathbf{EDP}_i, \mathbf{IM}_i} p(\mathbf{DV} | \mathbf{IM}_i) \Delta\lambda(\mathbf{IM}_i) \quad (7)$$

Όπου το  $i$  εκφράζει τα μέρη των **DS**, **EDP** και **IM**, που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις κατασκευές που εξετάζονται. Για «συνδεδεμένες» ή/και «εξαρτώμενες» κατασκευές, η χρήση των καμπύλων απωλειών για τις μεμονωμένες κατασκευές μπορεί να έχει κάποια χρησιμότητα ως προς τα συμπεράσματα της τελικής ανάλυσης, ο συνδυασμός τους όμως δεν μπορεί να είναι ένα απλό άθροισμα, όπως αυτό της Εξίσωσης (7), καθώς τα επιμέρους χαρακτηριστικά συσχέτισης και η αλληλεπίδραση των επιμέρους κατασκευών στο πλαίσιο του συνολικού συστήματος, μπορεί να έχουν σημαντική επιρροή στην απόδοση του και συνεπώς στα τελικά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται συνοπτική, σχηματική παρουσίαση μιας τυπικής διαδικασίας για την εκτίμηση της διακινδύνευσης με σκοπιότητα την εξέταση του συστήματος σε μακροπρόθεσμο πλαίσιο.



Σχήμα 3: Σχηματική παρουσίαση της μεθοδολογίας εκτίμησης διακινδύνευσης με μακροπρόθεσμη σκοπιότητα.

## 4 Εκτίμηση διακινδύνευσης βραχυπρόθεσμης σκοπιάς

Στην περίπτωση όπου ένα φαινόμενο που συμβάλλει στη διακινδύνευση του συστήματος μόλις έχει εκδηλωθεί (π.χ., ένας σεισμός) ή είναι σε εξέλιξη (π.χ. μια εκτεταμένη πλημμύρα ή μία επικείμενη καταιγίδα), μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις τοπικές παρατηρήσεις αισθητήρων για να βελτιώσουμε τις προβλέψεις μας. Προκειμένου να επιτευχθεί μια αξιολόγηση κοντά στην πραγματικότητα, αντί να εκτελούμε τις αντίστοιχες αναλύσεις επί τόπου, η γρηγορότερη προσέγγιση είναι να εκμεταλλευτούμε το μεγάλο αποθετήριο δεδομένων και σεναρίων που έχει ήδη δημιουργηθεί κατά της εφαρμογή τις μεθοδολογίας για την αξιολόγηση του μακροπρόθεσμης αξιολόγησης, με βάση το ποια από αυτά ταιριάζουν με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους εκάστοτε αισθητήρες. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτήν την εφαρμογή:

- Αισθητήρες που αφορούν στην καταγραφή στοιχείων έντασης των φαινομένων με βάση τα IM που επιλέχθηκαν, όπως π.χ. σειсмоγράφοι, μετεωρολογικοί σταθμοί ή ύψη πλημμυρών, καθώς οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες για τις πραγματικές τιμές του IM που εμφανίζονται σε κάθε τοποθεσία ενδιαφέροντος.
- Αισθητήρες απόκρισης EDP, όπως επιταχυνσιόμετρα, μετρητές παραμορφώσεων ή μετακινήσεων κ.λπ., που προσφέρουν πληροφορίες για την πραγματική απόκριση της κατασκευής.
- Αισθητήρες επιπτώσεων DS, ο πιο απλός εκ των οποίων είναι οι κάμερες, που ενδεχομένως να εμπλουτίζονται από έναν αλγόριθμο μηχανικής-μάθησης για να αναγνωρίζει τις αλλαγές στην κατάσταση της κατασκευής, επιτρέποντας την απόκτηση άμεσων πληροφοριών για την πιθανές βλάβες είτε συνολικά στη κατασκευή είτε σε κάποια επιμέρους στοιχεία της.

Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχει πλέον το στοιχείο του χρόνου, επομένως δεν υπάρχει και MAF προς υπολογισμό, καθώς το φαινόμενο έχει ήδη συμβεί ή είναι σε εξέλιξη. Συνεπώς, δεν χρειάζεται ο όρος  $\lambda(\cdot)$ , ενώ εξετάζεται πλέον απευθείας η πιθανότητα εμφάνισης κάθε τιμής του DV, δεδομένων των παρατηρήσεων, **obs**, ή  $p(\mathbf{DV}|\mathbf{obs})$ . Επιπλέον, οι αισθητήρες μπορούν να μειώσουν την αβεβαιότητα που συνοδεύει την Εξίσωση (1), μειώνοντας τον αριθμό των πιθανών πραγματοποιήσεων που θα ταιριάζουν με το φαινόμενο που έχει ήδη συμβεί ή είναι σε εξέλιξη. Πρακτικά μιλώντας, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτές τις παρατηρήσεις για να ελέγξουμε το σύνολο όλων των διαθέσιμων σεναρίων, μειώνοντάς το ουσιαστικά σε  $C_{obs}$  συνδυασμούς (DS, EDP, IM), όπου  $C_{obs}$  είναι το υποσύνολο όλων των DS, EDP και IM σεναρίων που είναι συμβατά με τις παρατηρήσεις. Τότε ο κίνδυνος βραχυπρόθεσμα / αμέσως μετά το συμβάν προκύπτει:

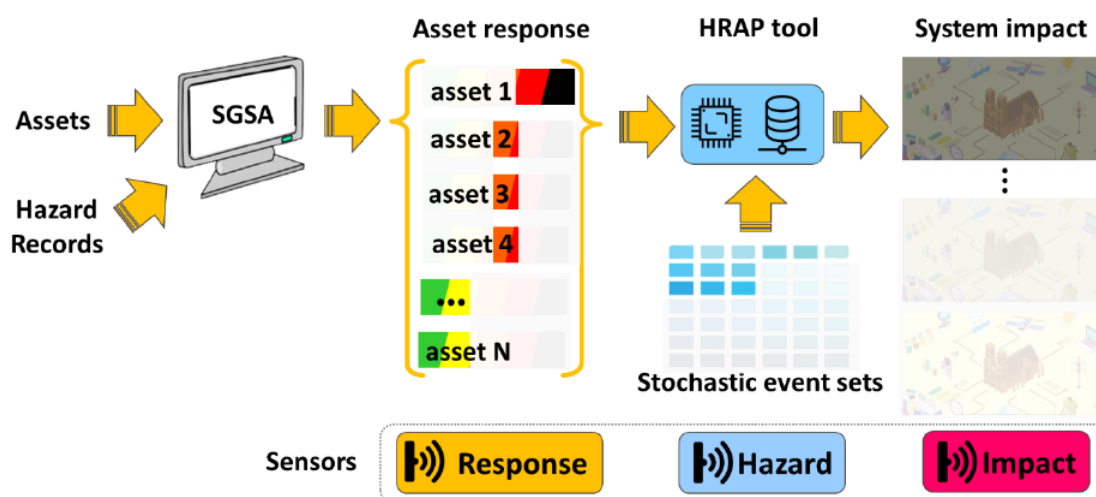
$$p(\mathbf{DV} | \mathbf{obs}) = \sum_{(\mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}) \in C_{obs}} p(\mathbf{DV} | \mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}, \mathbf{obs}) \quad (8)$$

όπου  $p(\mathbf{DV}|\mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM})$  είναι η πυκνότητα δεσμευμένης πιθανότητας για την επίτευξη της μεταβλητής απόφασης **DV** εντός κάθε σεναρίου  $C_{obs}$ , εκτιμώμενη με βάση τον επανυπολογισμό της αρχικής (μακροπρόθεσμης) πιθανότητας εμφάνισης κάθε σεναρίου που είναι συμβατό με τις τιμές των **DS**, **EDP** και **IM**, απλά διαιρώντας την με το άθροισμα των πιθανοτήτων εμφάνισης όλων των σεναρίων  $C_{obs}$ :

$$p(\mathbf{DV} | \mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}, \mathbf{obs}) = \begin{cases} \frac{p(\mathbf{DV}, \mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM})}{\sum_{(\mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}) \in C_{obs}} p(\mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM})}, & \text{if } (\mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM}) \in C_{obs} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

Ο αριθμητής  $p(\mathbf{DV}, \mathbf{DS}, \mathbf{EDP}, \mathbf{IM})$  είναι η πιθανότητα εμφάνισης κάθε σεναρίου, η οποία στην περίπτωση των ισοπίθανων σεναρίων απλώς είναι ο λόγος της μονάδας προς τον αριθμό των σεναρίων που λαμβάνονται υπόψη.

Όταν συγκρίνουμε την Εξίσωση (8) με την Εξίσωση (2), παρατηρούμε ότι η λήψη «όλων» των σεναρίων μας επέτρεψε να απλοποιήσουμε την εξίσωση (2), καθώς αφαιρέθηκε οποιαδήποτε προϋπόθεση σχετικά με το DS και το EDP, και διατηρήθηκε μόνο το IM ως μεταβλητή άθροισης. Στην περίπτωση της αξιολόγησης στο βραχυπρόθεσμο πλαίσιο της Εξίσωσης (8) αυτό δεν είναι πλέον δυνατό. Η δυνατότητα ύπαρξης αισθητήρων απόκρισης δομικών στοιχείων, ή και προσδιορισμού του DS, δεν μας επιτρέπει να πραγματοποιήσουμε μια παρόμοια απλοποίηση στην Εξίσωση (8). Με άλλα λόγια η απλοποίηση που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των καμπύλων απωλειών δεν είναι πλέον χρήσιμη. Στη περίπτωση αυτή χρειάζονται τα δεδομένα που καταγράφονται από τους αισθητήρες για να εξετασθούν σε βάθος όλα τα σενάρια και να διατηρηθούν μόνο εκείνα που είναι συμβατά με τις συγκεκριμένες παρατηρήσεις. Να σημειωθεί επίσης ότι υπάρχει μια μη αμελητέα πιθανότητα οι παρατηρήσεις να μην ταιριάζουν «τέλεια» με κανένα από τα προϋπολογισμένα σενάρια IM, DS και EDP με βάση τις πραγματοποιήσεις που προέκυψαν από την μακροπρόθεσμη ανάλυση του συστήματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, υποθέτοντας ότι δεν βασιζόμαστε σε δεδομένα τα οποία είναι ακατάλληλα λόγω κάποιας μορφής υποκειμενικότητας και ανισορροπίας λόγω μη ρεαλιστικών θεωρήσεων, η αναζήτηση των πλησιέστερων σεναρίων μέσω κάποιας μεθόδου παρεμβολής (γραμμικής ή και ανώτερης τάξης) μπορεί να είναι η καλύτερη στρατηγική. Διαφορετικά, η μόνη λύση είναι η εκ νέου βαθμονόμηση των θεωρήσεων που έγιναν, ώστε να βελτιωθούν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και να επανυπολογιστούν τα σενάρια και οι πραγματοποιήσεις τους από την αρχή. Ακολουθεί συνοπτική, παραστατική απεικόνιση της μεθοδολογίας στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Σχηματική παρουσίαση της μεθοδολογίας εκτίμησης διακινδύνευσης για μεσοπρόθεσμη σκοπιά με χρήση αισθητήρων καταγραφής. Γκριζαρισμένα σε σχέση με το Σχήμα 3 εμφανίζονται σενάρια μη συμβατά με της παρατηρήσεις των αισθητήρων

## 5 Συμπεράσματα

Στα προηγούμενα παρουσιάστηκαν οι βασικές μεθοδολογίες για την αξιολόγηση του κινδύνου και της ανθεκτικότητας των κατασκευών και των κρίσιμων υποδομών ενός συστήματος που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο του TwinCity. Περιλαμβάνουν την ανάπτυξη και επεξήγηση γνωστών εννοιών στο πλαίσιο της στοχαστικής προσέγγισης της έκθεσης και ευπάθειας ενός συστήματος, στο πλαίσιο των μακροπρόθεσμων εκτιμήσεων της διακινδύνευσης, προσθέτοντας περαιτέρω μια επιπλέον προσέγγιση για την χρήση αισθητήρων και συλλογή δεδομένων, κυρίως για την αξιοποίησή τους σε όρους βραχυπρόθεσμων αξιολογήσεων. Πρέπει βέβαια να αναφερθεί πως οι μεθοδολογίες αυτές απαιτούν σε κάθε περίπτωση μεγάλο όγκο δεδομένων, σημαντικό αριθμό αναλύσεων και κριτική σκέψη για τη λήψη αποφάσεων βασισμένη σε εμπειρογνωμοσύνη. Επιπροσθέτως, η κάθε εφαρμογή του πλαισίου αυτού φέρει τις δικές της προκλήσεις, απαιτώντας έτσι περαιτέρω διερεύνηση των λεπτομερειών της κάθε ξεχωριστής εφαρμογής. Σε κάθε περίπτωση όμως οι προσπάθειες για τη βελτίωση και τη γενίκευσή του στα πλαίσια της χρήσης του για τις ανάγκες του TwinCity συνιστούν ένα εξαιρετικά σημαντικό κομμάτι των διερευνήσεων που απαιτήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος.

## 6 Βιβλιογραφία

Cornell CA, Krawinkler H (2000). Progress and challenges in seismic performance assessment. PEER Center News, 3, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

D'Ayala D, Meslem A, Vamvatsikos D, Porter K, Rossetto T (2015). Guidelines for analytical vulnerability assessment of low/mid-rise buildings. GEM Technical Report 2014-12. Global Earthquake Model Foundation, Pavia, Italy. DOI 10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12

FEMA (2018). Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1 – Methodology, Second Edition. Report FEMA P58-1, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

Mitchell-Wallace K, Jones M, Hillier J, Foote M (2017). Natural catastrophe risk management and modelling: A practitioner's guide. John Wiley & Sons.

Porter KA, Kiremidjian AS, LeGrue JS (2001). Assembly-based vulnerability of buildings and its use in performance evaluation. Earthquake Spectra, 17(2), 291-312. DOI: 10.1193/1.1586176