

## **Αποάθροιση σεισμικής τρωτότητας κατασκευών: Παραδείγματα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις**

**Νικόλαος Δ. Καραφέρης<sup>1</sup>, Βασίλειος Ε. Μελισσιανός<sup>2</sup>, Αθανασία Κ. Καζαντζή<sup>3</sup>,  
Κωνσταντίνος Μπακάλης<sup>4</sup>, Δημήτριος Βαμβάτσικος<sup>5</sup>**

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης σε κρίσιμες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, συχνά βασίζεται σε μεθόδους που χρησιμοποιούν καμπύλες τρωτότητας για τον προσδιορισμό της σεισμικής ευπάθειας των κατασκευών τους. Στις τυπικές αναλυτικές μεθοδολογίες εκτίμησης σεισμικής τρωτότητας, πραγματοποιείται κατά κανόνα άθροιση των σεισμικών αποκρίσεων που υπολογίζονται για διάφορες σεισμικές καταγραφές. Η προαναφερθείσα διαδικασία όμως, ενδέχεται να οδηγήσει σε σημαντική μεροληψία όταν μελετώνται συστήματα κατασκευών με λειτουργική αλληλεπίδραση. Τούτο διότι η άθροιση αγνοεί εξ ορισμού την πληροφορία που αφορά αφενός τη λειτουργική αλληλεπίδραση των κατασκευών και αφετέρου τη συσχέτιση των αποκρίσεων με τις σεισμικές καταγραφές που λήφθηκαν υπόψη στις αναλύσεις. Στην παρούσα εργασία, προτείνεται μία εναλλακτική μεθοδολογία εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας, η οποία διατηρεί τη συσχέτιση των σεισμικών αποκρίσεων των κατασκευών της βιομηχανικής εγκατάστασης για δεδομένη σεισμική καταγραφή (προσέγγιση «ανά-καταγραφή»). Στη μέθοδο αποάθροισης η απόκριση των κατασκευών εξετάζεται ξεχωριστά για κάθε σεισμική καταγραφή και ακολούθως τα αποτελέσματα αθροίζονται μόνο στο τελικό στάδιο εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης του συστήματος ενδιαφέροντος. Για την αξιολόγηση της μεθόδου, εξετάζονται δύο χαρακτηριστικά βιομηχανικά συστήματα: (α) ένα σύστημα πύργων διύλισης υδρογονανθράκων και (β) ένα σύστημα καμινάδων. Δεδομένης της λειτουργικής τους σημασίας σε μια βιομηχανική εγκατάσταση, τα εν λόγω συστήματα αναλύονται υπό το πρίσμα εκτίμησης της πιθανότητας αστοχίας έστω και μίας κατασκευής. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της τυπικής και της προτεινόμενης μεθόδου αποάθροισης ανέδειξε σημαντικές αποκλίσεις στα τελικά αποτελέσματα και συγκεκριμένα υπερεκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας ενός τέτοιου συστήματος στις περιπτώσεις που ο υπολογισμός της σεισμικής τρωτότητας πραγματοποιείται με βάση τις τυπικές μεθόδους.

**Λέξεις Κλειδιά:** Σεισμική διακινδύνευση, Βιομηχανικές εγκαταστάσεις, Καμπύλες τρωτότητας, Συστήματα κατασκευών, Αποάθροιση τρωτότητας

<sup>1</sup> Επιστημονικός Συνεργάτης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα, [nkaraferis@mail.ntua.gr](mailto:nkaraferis@mail.ntua.gr)

<sup>2</sup> Επιστημονικός Συνεργάτης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα, [melissia@mail.ntua.gr](mailto:melissia@mail.ntua.gr)

<sup>3</sup> Επίκουρη Καθηγήτρια, Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, Ελλάδα, [kazantzi@ihu.gr](mailto:kazantzi@ihu.gr)

<sup>4</sup> Επιστημονικός Συνεργάτης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα, [kbakalis@mail.ntua.gr](mailto:kbakalis@mail.ntua.gr)

<sup>5</sup> Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα, [divamva@mail.ntua.gr](mailto:divamva@mail.ntua.gr)

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

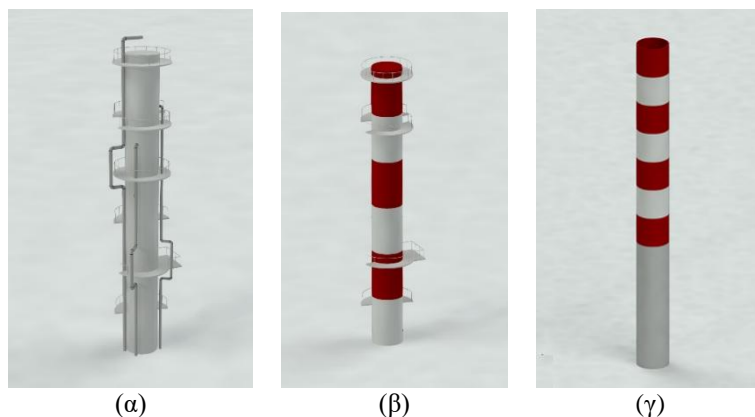
Η εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης σε κρίσιμες βιομηχανικές εγκαταστάσεις βασίζεται συνήθως στη χρήση καμπυλών τρωτότητας, οι οποίες περιγράφουν σε πιθανοτικούς όρους την ευπάθεια των κατασκευών έναντι σεισμικών δράσεων. Η τυπική αναλυτική προσέγγιση περιλαμβάνει δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας για κάθε επιμέρους κατασκευή, με σκοπό τον υπολογισμό της σεισμικής της απόκρισης. Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών, αξιολογείται εν συνεχεία αν η κατασκευή έχει μεταβεί σε κάποιο προκαθορισμένο επίπεδο δομικών (ή/και μη δομικών) βλαβών. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των αποκρίσεων από ένα πλήθος σεισμικών καταγραφών συνδυάζονται, ώστε τελικά να προκύψουν οι τυπικές καμπύλες τρωτότητας. Οι καμπύλες τρωτότητας εκφράζουν την πιθανότητα μία κατασκευή να φτάσει ή να υπερβεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο βλάβης σε δεδομένο επίπεδο σεισμικής έντασης, η τελευταία μετρούμενη σε όρους π.χ. PGA, AvgSa, [1-3].

Ωστόσο, η άθροιση των αποτελεσμάτων από διαφορετικές σεισμικές καταγραφές παραβλέπει ορισμένες παραμέτρους, που δυνητικά είναι σημαντικές σε ορισμένες περιπτώσεις κατασκευών και συστημάτων. Μία τέτοια παράβλεψη, αφορά στο ότι η συνήθης προσέγγιση δεν διατηρεί τη συσχέτιση μεταξύ της κάθε σεισμικής διέγερσης και των αντίστοιχων επιπτώσεων της. Το παραπάνω ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης ενός συστήματος με λειτουργικά συνδεδεμένες κατασκευές.

Εξετάζοντας την προαναφερθείσα δυνητική αδυναμία των συμβατικών ή «συγκεντρωτικών» καμπυλών τρωτότητας (overall approach, [4]), η παρούσα εργασία προτείνει μια αποαθροιστική προσέγγιση εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας ενός συστήματος λειτουργικά συνδεδεμένων κατασκευών, βασισμένη σε ανάλυση καμπύλων «ανά-καταγραφή» (per-record approach, [4]). Στην προσέγγιση «ανά-καταγραφή», αντί να εξάγονται καμπύλες τρωτότητας με βάση το σύνολο των σεισμικών καταγραφών, κάθε σεισμικό γεγονός εξετάζεται ξεχωριστά, διατηρώντας έτσι τη συσχέτιση μεταξύ σεισμικής διέγερσης με τις αποκρίσεις και τις αντίστοιχες βλάβες στις κατασκευές που εξετάζονται. Η συνολική εκτίμηση της ευπάθειας του συστήματος πραγματοποιείται μόνο στο τελικό στάδιο, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις κάθε καταγραφής στο σύνολο των κατασκευών. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ακριβέστερη εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας σε επίπεδο συστήματος, χωρίς σημαντική επιβάρυνση του υπολογιστικού κόστους.

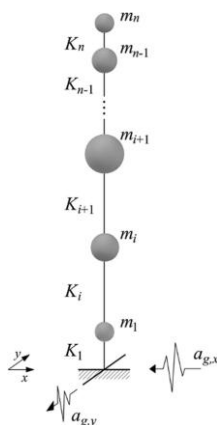
## 2 ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Στην παρούσα εργασία, αναλύθηκαν δύο συστήματα κατασκευών εντός μιας εγκατάστασης διύλισης. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν (α) ένα σύστημα πέντε πύργων διύλισης (βλ. Σχήμα 1α) ίδιου σχεδιασμού [5] και (β) ένα σύστημα πέντε καμινάδων, αποτελούμενο από τρεις χαλύβδινες καμινάδες ύψους 30 m, μία χαλύβδινη καμινάδα 80 m (βλ. Σχήμα 1β) και μία καμινάδα ύψους 87 m από οπλισμένο σκυρόδεμα (βλ. Σχήμα 1γ) [5]. Η επιλογή των δύο συστημάτων έγινε ώστε να εξεταστεί αφενός ένα σύστημα όπου όλες οι κατασκευές είναι ίδιες και αφετέρου ένα σύστημα με σημαντικά διαφορετικές κατασκευές. Οι υπό μελέτη κατασκευές προσομοιώθηκαν αριθμητικά με στόχο την ανάλυση της σεισμικής τους απόκρισης και τον καθορισμό καταλλήλων σταθμών βλάβης (Damage States – DS), ώστε τελικά να εξαχθούν οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας.



Σχήμα 1: Ενδεικτική απεικόνιση των κατασκευών που αναλύθηκαν: (α) πύργος διύλισης, (β) μεταλλικός πύργος και (γ) καμινάδα οπλισμένου σκυροδέματος.

Οι πύργοι διύλισης αποτελούν βασικό στοιχείο μιας παραγωγικής μονάδας διυλιστηρίου, καθώς σε αυτούς εκτελούνται πολυάριθμες χημικές και φυσικές διεργασίες που αφορούν στη διαδικασία διύλισης του αργού πετρελαίου για την παραγωγή των τελικών προϊόντων του. Ο πύργος που μελετήθηκε είναι κατασκευασμένος από χάλυβα ποιότητας S275 (μέση αντοχή διαρροής 380 MPa, [6]), έχει ύψος 30 m και εσωτερική διάμετρο 2,6 m. Το πάχος του κελύφους μεταβάλλεται καθ' ύψος (16–19 mm) και η συνολική του μάζα ισούται με 49.000 kg, η οποία κατανέμεται στο αριθμητικό μοντέλο καθ' ύψος ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Η πίεση λειτουργίας θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 0,94 MPa, ενώ η επίδρασή της στην ελαστική δυσκαμψία αγνοείται (ως ευνοϊκή). Η θεμελίωση θεωρείται επαρκώς άκαμπτη ώστε να μην επιτρέπει ανύψωση ή μετακίνηση. Το αριθμητικό μοντέλο του πύργου αποτελείται από συγκεντρωμένες μάζες συνδεδεμένες με ελαστικά στοιχεία δοκού-υποστυλώματος τύπου Euler-Bernoulli, λαμβάνοντας υπόψη γεωμετρικές μη-γραμμικότητες και τα φαινόμενα δεύτερης τάξης P-Δ (Σχήμα 2). Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού OpenSees. Η θεμελιώδης περίοδος ταλάντωσης του πύργου υπολογίστηκε στα 0,49 s για τις δύο κύριες μεταφορικές διευθύνσεις, ενώ λήφθηκε λόγος κρίσιμης απόσβεσης ίσος με 2% (δείτε επίσης [5]).



Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση του αριθμητικού προσομοιώματος μειωμένων βαθμών ελευθερίας για τη μοντελοποίηση των υψηλών κατασκευών.

Αναφορικά με το σύστημα των καμινάδων, εξετάστηκαν δύο μεταλλικές καμινάδες ύψους 30 m και 80 m, αντίστοιχα. Η πρώτη έχει εξωτερική διάμετρο 2,2 m και πάχος κελύφους 14 mm στη βάση και 10 mm σε μεγαλύτερα ύψη. Η δεύτερη αποτελείται από έξι τμήματα με μειούμενη καθ' ύψος διάμετρο από 2,5 m έως 2,2 m και πάχος που κυμαίνεται από 20 mm στη βάση έως 8 mm στην κορυφή. Η συνολική μάζα τους είναι 28.600 kg (30 m) και 101.700 kg (80 m), αντίστοιχα,

λαμβάνοντας υπόψη και τη μάζα τυχόν προσαρτημάτων, όπως πλατφόρμες και σκάλες. Οι καμινάδες θεωρούνται επαρκώς αγκυρωμένες στη θεμελίωση, ενώ οι περιοχές γύρω από τα ανοίγματα καυσαερίων θεωρούνται επαρκώς ενισχυμένες ώστε να μην επηρεάζουν αρνητικά τη δυσκαμψία. Η χαμηλή καμινάδα είναι κατασκευασμένη από χάλυβα ποιότητας S275R (μέση αντοχή διαρροής 397,56 MPa, [6]), ενώ η υψηλότερη από χάλυβα ποιότητας S355R (487,13 MPa, [6]). Οι καμινάδες προσομοιώθηκαν αριθμητικά με χρήση του μοντέλου που απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Οι θεμελιώδεις περίοδοι ταλάντωσης είναι 0,52 s και 2,61 s αντίστοιχα, ενώ λήφθηκε συντελεστής κρίσιμης απόσβεσης 2% στις δύο κύριες μεταφορικές ιδιομορφές τους (βλ. [5]).

Η εξεταζόμενη καμινάδα από οπλισμένο σκυρόδεμα (reinforced concrete, RC) έχει ύψος 87 m, εξωτερική διάμετρο 4,55 m και πάχος κελύφους 0,30 m. Η συνολική μάζα της ισούται με 2.371.000 kg. Η κατανομή του οπλισμού καθ' ύψος οδήγησε στο χωρισμό της καμινάδας σε εννέα τμήματα, με διαμήκη οπλισμό 94Ø28 στη βάση και 94Ø12 στην κορυφή. Το σκυρόδεμα είναι ποιότητας C30/37 (μέση αντοχή 38 MPa) και ο χάλυβας οπλισμού ποιότητας B500C (μέση αντοχή 575 MPa). Το άνοιγμα εκροής καυσαερίων στη βάση θεωρείται κατάλληλα ενισχυμένο, ενώ αγνοήθηκαν μηχανισμοί ανατροπής ή ανύψωσης λόγω θεώρησης επαρκούς σχεδιασμού στη θεμελίωση. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε αναλυτικό μοντέλο συγκεντρωμένων μαζών (Σχήμα 2) με στοιχεία διακριτοποιημένων διατομών (fiber-section στο OpenSees), ενσωματώνοντας τα αποτελέσματα της μη γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών μέσω του μοντέλου του Mander για τον εγκλιβωτισμένο και ακάλυπτο πυρήνα σκυροδέματος. Η θεμελιώδης περίοδος ταλάντωσης υπολογίστηκε ίση με 1,38 s, ενώ λήφθηκε λόγος κρίσιμης απόσβεσης 1% [7] στις δύο βασικές μεταφορικές ιδιομορφές (βλ. [5]).

Για την αξιόπιστη εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου των εξεταζόμενων βιομηχανικών κατασκευών, ορίζονται διακριτές στάθμες βλάβης (Damage States – DS), οι οποίοι αντανακλούν τις βασικές μορφές αστοχίας ανά τύπο κατασκευής. Στη παρούσα μελέτη εξετάζεται μόνο η κρισιμότερη μορφή αστοχίας που αντιστοιχεί σε κάθε κατασκευή [5], η οποία θα προκαλούσε και τις σημαντικότερες (λειτουργικές) επιπτώσεις σε ένα διυλιστήριο.

Για τον πύργο διύλισης, η πλέον καθοριστική στάθμη βλάβης (DS) συνδέεται με την απώλεια δομικής ακεραιότητας του χαλύβδινου κελύφους λόγω φαινομένων τοπικού λυγισμού. Η εκτίμηση μετάβασης στην εν λόγω στάθμη γίνεται με βάση το κανονιστικό πρότυπο EN1993-1-6:2007 (CEN 2007). Συγκεκριμένα, εκτιμάται ο δείκτης  $R_c$ , ο οποίος συνυπολογίζει τις αξονικές και διατμητικές τάσεις:

$$R_c = \left( \frac{\sigma_E}{\sigma_R} \right)^{k_x} + \left( \frac{\tau_E}{\tau_R} \right)^{k_y} \quad (1)$$

όπου  $\sigma_E$  είναι οι ορθές τάσεις;  $\sigma_R$  είναι η αξονική αντοχή σε λυγισμό;  $\tau_E$  είναι οι διατμητικές τάσεις;  $\tau_R$  είναι η διατμητική αντοχή σε λυγισμό;  $k_x$ ,  $k_y$  είναι οι συντελεστές συνδυασμού που προβλέπει ο κανονισμός. Για τον έλεγχο, η μέγιστη τιμή του δείκτη  $R_c$  υπολογίζεται σε όλες τις διατομές του πύργου, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση της αξονικής θλίψης με τις διατμητικές τάσεις και την εσωτερική πίεση. Η υπέρβαση της τιμής  $R_c = 1$  σηματοδοτεί αστοχία, λόγω απώλειας δομικής ευστάθειας, και συνεπώς η υπέρβαση του DS αυτού δηλώνει την εμφάνιση μη αναστρέψιμων βλαβών, πιθανή αστοχία σε κρίσιμα σημεία και, κατ' επέκταση, τη διακοπή της λειτουργίας του πύργου.

Αντίστοιχα, για τις μεταλλικές καμινάδες, η κρίσιμότερη μορφή αστοχίας σχετίζεται επίσης με φαινόμενα τοπικού λυγισμού του κελύφους υπό συνδυασμένη ένταση, ενώ υιοθετείται ο ίδιος δείκτης ελέγχου  $R_c$ , με μόνη διαφορά την απουσία εσωτερικής πίεσης. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η υπέρβασή του αποτελεί ένδειξη σοβαρής αστοχίας που ενδέχεται να οδηγήσει σε τοπική ή και (σε ακραίες περιπτώσεις) ολική κατάρρευση της κατασκευής.

Αντιστοίχως, για την καμινάδα από οπλισμένο σκυρόδεμα, η πιο κρίσιμη στάθμη βλάβης αφορά στην υπέρβαση της καμπτικής αντοχής ( $M_u$ ) σε μία ή περισσότερες διατομές. Η μετάβαση σε αυτό το DS αξιολογείται μέσω του δείκτη  $R_m$  που ορίζεται ως:

$$R_m = \frac{M_E}{M_u} \quad (2)$$

όπου  $M_E$  είναι η αναπτυσσόμενη ροπή και  $M_u$  είναι η μέγιστη καμπτική αντοχή. Ο έλεγχος πραγματοποιείται σε όλες τις κρίσιμες διατομές καθ' ύψος της καμινάδας και υιοθετείται τελικά η δυσμενέστερη τιμή του δείκτη που υπολογίζεται.

Η υπέρβαση του εν λόγω DS σηματοδοτεί γενικευμένη αστοχία της κατασκευής, αποτελώντας τον πλέον κρίσιμο δείκτη αστοχίας για τέτοιου τύπου κατασκευές. Οι σοβαρές ρηγματώσεις που θα δημιουργηθούν απαιτούν εκτεταμένες επισκευές με την κατασκευή να τίθεται εκτός λειτουργίας για σημαντικό χρονικό διάστημα, επηρεάζοντας τη λειτουργία της ευρύτερης εγκατάστασης.

### 3 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης, υπολογίζονται δύο είδη καμπυλών τρωτότητας: (α) οι «συγκεντρωτικές» καμπύλες (overall fragilities) και (β) οι καμπύλες «ανά καταγραφή» (per-record fragilities). Γενικά, οι καμπύλες τρωτότητας εκφράζουν την πιθανότητα υπέρβασης μιας οριακής κατάστασης (Limit State, LS) συναρτήσει ενός μέτρου σεισμικής έντασης (Intensity Measure, IM). Εδώ, χρησιμοποιείται η αναλυτική προσέγγιση, βασισμένη στην επαυξητική δυναμική ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis, IDA, [8]) για τον υπολογισμό των αποκρίσεων με χρήση αριθμητικών μοντέλων των κατασκευών (π.χ. [1-3]).

Ο τυπικός ορισμός της καμπύλης τρωτότητας είναι:

$$F_{LS}(IM) = P[LS \text{ violated} | IM] = P[D > C_{LS} | IM] \quad (3)$$

όπου  $F_{LS}(\cdot)$  είναι η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (CDF) του ορίσμάτος της,  $D$  είναι η παράμετρος απόκρισης (Engineering demand parameter, EDP) δεδομένου του μέτρου σεισμικής έντασης IM,  $C_{LS}$  είναι η οριακή τιμή του EDP σε σχέση με την υπό εξέταση οριακή κατάσταση LS. Η υπέρβαση του παραπάνω ορίου συνιστά παραβίαση της οριακής κατάστασης και σηματοδοτεί τη μετάβαση της κατασκευής στην αντίστοιχη στάθμη βλάβης (DS). Μία από τις σημαντικότερες αβεβαιότητες στην εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας απορρέει από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των σεισμικών καταγραφών που χρησιμοποιούνται, ενώ στην συγκεκριμένη μελέτη ελήφθησαν υπόψη και πρόσθετες αβεβαιότητες που σχετίζονται με την εκτίμηση των οριακών τιμών LS. Υιοθετώντας τη συνήθη παραδοχή της λογαριθμοκανονικής κατανομής [9], η καμπύλη τρωτότητας μπορεί να περιγραφεί μέσω της διάμεσης τιμής  $\mu$  (αντίστοιχη με 50% πιθανότητα υπέρβασης της στάθμης βλάβης) και της διασποράς  $\beta$  (lognormal dispersion).



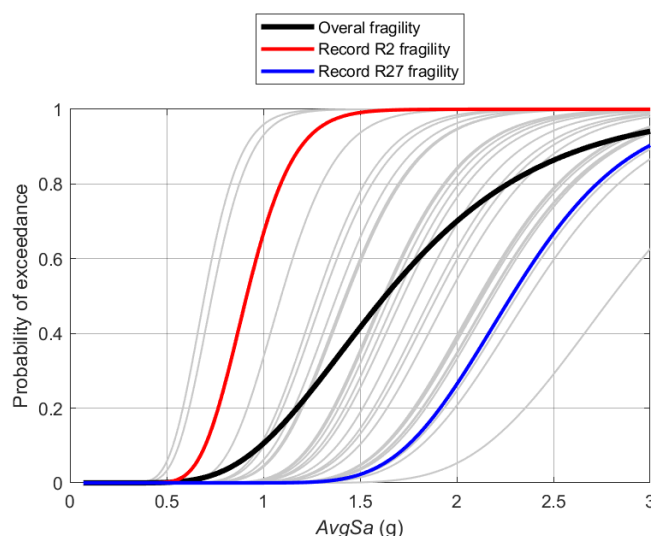
Οι «συγκεντρωτικές» καμπύλες τρωτότητας υπολογίζονται συνδυάζοντας τις αποκρίσεις από όλες τις σεισμικές καταγραφές σε μία ενιαία συνάρτηση, διατηρώντας μόνο την πληροφορία για το μέτρο έντασής τους (IM). Αν και η προσέγγιση αυτή ενσωματώνει τη σεισμικότητα της περιοχής, αποσυνδέει την απόκριση από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε καταγραφής. Για τη διατήρηση όμως της συσχέτισης μεταξύ σεισμικής διέγερσης και απόκρισης, υπολογίζονται καμπύλες τρωτότητας ξεχωριστά για κάθε καταγραφή (per-record), όπως έχει παρουσιαστεί και στη βιβλιογραφία (π.χ. [1,2,10]). Σε αντίθεση όμως με παλαιότερες προσεγγίσεις, στην προτεινόμενη προσέγγιση οι καμπύλες αυτές διατηρούνται έως το τελικό στάδιο της αξιολόγησης, και όχι σαν ένα ενδιάμεσο στάδιο για τον υπολογισμό των συγκεντρωτικών καμπύλων, επιτρέποντας την καταγραφή της επίδρασης κάθε μεμονωμένου σεισμικού γεγονότος στα αποτελέσματα [4].

Για την αποφυγή περιττής πολυπλοκότητας στην ανάλυση επικινδυνότητας μίας ομάδας κατασκευών, υιοθετείται ένα ενιαίο μέτρο έντασης (IM), το οποίο είναι επαρκώς αντιπροσωπευτικό για όλες τις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, επιλέγεται το AvgSa, δηλαδή η μέση φασματική επιτάχυνση στο εύρος περιόδων  $T=0.1:0.01:1.0s$ , καθώς αντικατοπτρίζει καλύτερα τη σεισμική επίδραση σε πολλαπλές κατασκευές με διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά, όπως αυτές σε ένα ευρύτερο διυλιστήριο [4, 5]. Οι αποκρίσεις υπολογίζονται μέσω της μεθόδου IDA, ενώ για τη πραγματοποίηση των αναλύσεων επιλέχθηκαν 30 φυσικά επιταχυνσιογραφήματα "συνηθισμένου" τύπου (λαμβάνοντας υπόψη τις συνιστώσες και προς τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις) [5]) από τη βάση NGA-West2 [11], κάνοντας χρήση της μεθόδου Conditional Spectrum (π.χ. [12]) για πιθανότητα υπέρβασης 2% σε 50 έτη. Οι ίδιες καταγραφές εφαρμόζονται σε όλες τις κατασκευές, θεωρώντας πως οι κατασκευές γειτνιάζουν επαρκώς (όπως σε εγκαταστάσεις μικρού αποτυπώματος) ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι υπόκεινται στην ίδια σεισμική διέγερση.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, υπολογίζονται τα δύο είδη καμπύλων που αναφέρθηκαν: οι «συγκεντρωτικές» και οι «ανά-καταγραφή» καμπύλες τρωτότητας για όλες τις κατασκευές. Οι πρώτες συνοψίζονται με παραμέτρους λογαριθμοκανονικής κατανομής ανά κατασκευή στον Πίνακα 1. Για κάθε κατασκευή, οι «ανά-καταγραφή» καμπύλες (30 συνολικά) αποτυπώνουν τη διακριτή επίδραση των σεισμικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε καταγραφής. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι καμπύλες για τον πύργο διύλισης, καταδεικνύοντας τη διαφοροποίηση της πιθανότητας αστοχίας λόγω μεταβολής των χαρακτηριστικών της σεισμικής καταγραφής. Επί παραδείγματι, στο Σχήμα 3 παρατηρείται η σεισμική καταγραφή R2 οδηγεί σε αυξημένη ευπάθεια συγκριτικά με την ευνοϊκότερη καταγραφή R27 (Για την ονοματολογία των καταγραφών βλ. [13]). Η πληροφορία αυτή ενσωματώνεται πλέον στην ανάλυση του εκάστοτε συστήματος, προσφέροντας τελικά πληρέστερη εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου.

Πίνακας 1: Λογαριθμοκανονικές παράμετροι  $\mu$  (median) και  $\beta$  (dispersion) για τις «συγκεντρωτικές» καμπύλες τρωτότητας για το δυσμενέστερο επίπεδο βλάβης (DS) των κατασκευών.

IM = AvgSa	Πύργος Διύλισης	Χαλύβδινη καμινάδα 30 m	Χαλύβδινη καμινάδα 80 m	Καμινάδα Οπλισμένου Σκυροδέματος
$\mu$ (g)	1,63	2,03	1,87	2,43
$\beta$	0,39	0,35	0,29	0,88

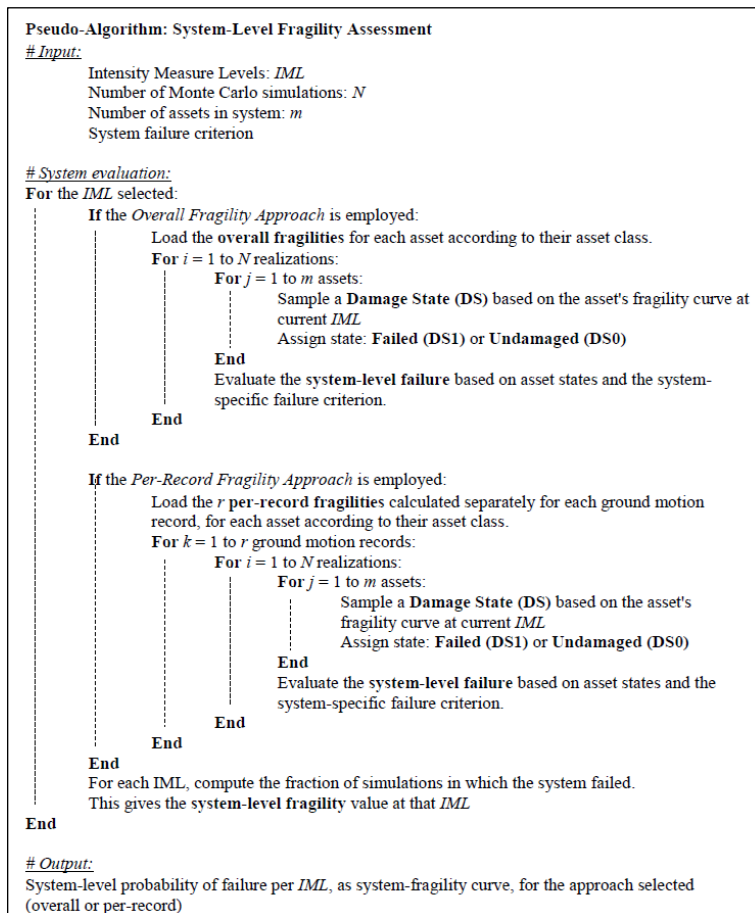


Σχήμα 3: Λογαριθμοκανονικές παράμετροι  $\mu$  (median) και  $\beta$  (dispersion) για τις «συγκεντρωτικές» καμπύλες τρωτότητας για το δυσμενέστερο επίπεδο βλάβης (DS) του πύργου διύλισης.

#### 4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΠΙΠΕΔΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων στην αποτίμηση της τρωτότητας συστημάτων κατασκευών, εξετάζονται δύο συστήματα, με πλήθος κατασκευών  $m = 5$  σε κάθε περίπτωση. Η ευπάθεια των συστημάτων αξιολογείται υπολογίζοντας καμπύλες τρωτότητας σε επίπεδο συστήματος, οι οποίες εκφράζουν την πιθανότητα αστοχίας συναρτήσει του επιπέδου της σεισμικής έντασης (intensity measure level, IML) και υπολογίζονται με προσομοιώσεις Monte Carlo (βλ. ψευδο-αλγόριθμο στο Σχήμα 4). Αντί χρήσης σύνθετων δεικτών επιπτώσεων (π.χ. οικονομικές απώλειες, χρόνος εκτός λειτουργίας), υιοθετείται μια απλουστευμένη προσέγγιση με δυαδική κατηγοριοποίηση των βλαβών των κατασκευών θεωρώντας DS0 όταν δεν υπάρχουν βλάβες (ή αυτές μπορούν να θεωρηθούν μη κρίσιμες για το παράδειγμα που εξετάζεται), και DS1 για κρίσιμες βλάβες που συνιστούν «αστοχία» της κατασκευής.

Στην περίπτωση των «συγκεντρωτικών» καμπύλων τρωτότητας, για κάθε επίπεδο IM και κατασκευή, παράγονται  $N$  πραγματοποιήσεις όπου επιλέγεται ένα επίπεδο βλάβης (DS), βάσει της αντίστοιχης καμπύλης τρωτότητας (Πίνακας 1), χωρίς να αναφερόμαστε σε συγκεκριμένη σεισμική καταγραφή. Αντίθετα, στην προσέγγιση «ανά-καταγραφή», η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε μία από τις  $r = 30$  σεισμικές καταγραφές που επιλέχθηκαν, και τις αντίστοιχες καμπύλες τρωτότητας (Σχήμα 3), με συνολικά  $30 \times N$  πραγματοποιήσεις στο σύνολο. Έτσι, οι πρώτες είναι ανεξάρτητες από τις καταγραφές (record-agnostic), ενώ στις δεύτερες, οι εκάστοτε πραγματοποιήσεις εξετάζονται εντός της ίδιας σεισμικής καταγραφής (record-aware) και τα αποτελέσματα συνδυάζονται στο τέλος της διαδικασίας.



Σχήμα 4: Παρουσίαση ψευδο-αλγορίθμου για τον υπολογισμό των καμπύλων τρωτότητας συστήματος.

Σε κάθε περίπτωση, η απόκριση των κατασκευών ελέγχεται ως προς την ικανοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων αστοχίας σε επίπεδο συστήματος. Για την αποτίμηση της σεισμικής επίδοσης σε επίπεδο συστήματος και την εκτίμηση της δυνητικής διακοπής λειτουργίας ενός διυλιστηρίου, εισάγονται Έλεγχοι Επιχειρησιακής Συνέχειας (Business Continuity Checks – BCC, [4]), με βάση τους οποίους υπολογίζονται οι καμπύλες τρωτότητας του συστήματος με τις δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις και ειδικότερα είτε απευθείας από τις «συγκεντρωτικές» καμπύλες, είτε τη μέθοδο «ανά-καταγραφή». Οι εν λόγω έλεγχοι BCC που υιοθετούνται είναι:

BCC-1: «Σοβαρή διακοπή στη διαδικασία διύλισης»: Αστοχία οποιουδήποτε πύργου διύλισης (DS1). Η αστοχία ακόμα και ενός πύργου διύλισης μπορεί να προκαλέσει διακοπή εργασιών σε σημαντικά τμήματα της εγκατάστασης, οδηγώντας σε αναστολή λειτουργίας ή ανάγκη περιορισμού της παραγωγής.

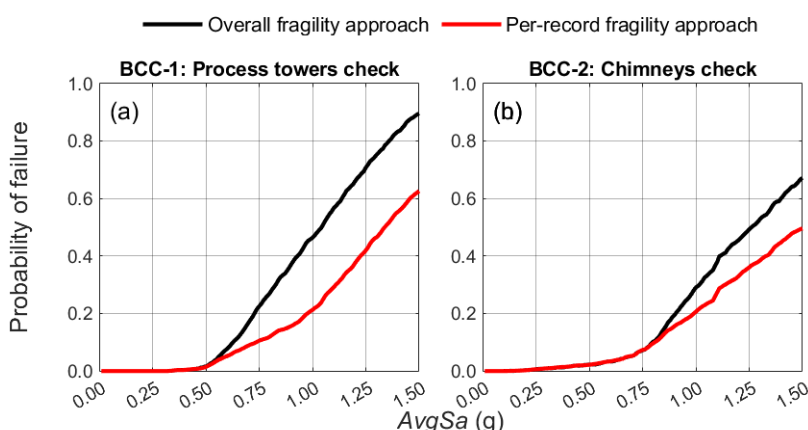
BCC-2: «Διακοπή έκλυσης αερίων αποβλήτων»: Αστοχία οποιασδήποτε καμινάδας (DS1) έχει σημαντικές επιπτώσεις στη διύλιση, καθώς εμποδίζεται η απελευθέρωση αερίων αποβλήτων, με αποτέλεσμα την ανάγκη παύσης πολλών κρίσιμων διεργασιών. Επιπρόσθετα, λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου, μερική ή ολική κατάρρευση ενδέχεται να προκαλέσει δευτερογενείς βλάβες σε γειτονικές κατασκευές.



## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι «καμπύλες τρωτότητας διυλιστηρίου» που σχετίζονται με τους ελέγχους BCC-1 και BCC-2 υπολογίζονται με χρήση τόσο της «συγκεντρωτικής» όσο και της «ανά-καταγραφή» προσέγγισης, με τα αποτελέσματα να απεικονίζονται στο Σχήμα 5. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούνται εμφανείς διαφορές μεταξύ των δύο μεθοδολογιών, ιδιαίτερα για υψηλότερα επίπεδα σεισμικής έντασης ( $IM > 0.55g$ ), όπου η συγκεντρωτική προσέγγιση οδηγεί σε σημαντικά αυξημένες πιθανότητες υπέρβασης των αντίστοιχων ορίων.

Αυτή η διαφορά οφείλεται στο ότι τα κριτήρια BCC-1 και BCC-2 ορίζουν ως αποτυχία του συστήματος την αστοχία οποιασδήποτε από τις πολλαπλές κρίσιμες κατασκευές (ή ομάδες παρόμοιων κατασκευών). Η παράβλεψη της συσχέτισης μεταξύ της σεισμικής διέγερσης και των αποκρίσεων –που χαρακτηρίζει τη συγκεντρωτική προσέγγιση– οδηγεί σε μια τεχνητή διασπορά των αστοχιών μεταξύ των επιμέρους κατασκευών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της πιθανότητας συνολικής αστοχίας του συστήματος, καθώς αυξάνεται η πιθανότητα να αστοχήσει τουλάχιστον μία κατασκευή από το σύνολο, ακόμα και αν οι βλάβες ενδέχεται να οφείλονται σε κάποιες συγκεκριμένες καταγραφές. Η συγκεντρωτική προσέγγιση καταλήγει σε σαφώς αυξημένες πιθανότητες αστοχίας, επιβεβαιώνοντας τη συντηρητικότητα –και ενδεχομένως τη μεροληψία– αυτής της μεθόδου όταν εφαρμόζεται σε ελέγχους όπως οι BCC-1 και BCC-2, όπου ελέγχεται η αστοχία σε επίπεδο διυλιστηρίου.



Σχήμα 5: Καμπύλες τρωτότητας σε επίπεδο συστήματος χρησιμοποιώντας τη «συγκεντρωτική» και την «ανά-καταγραφή» προσέγγιση, εφαρμόζοντας τους παρακάτω ελέγχους (α) BCC-1: οποιοσδήποτε από τους 5 πύργους διύλισης οδηγείται σε κρίσιμη αστοχία, (β) BCC-2: οποιαδήποτε καμινάδα οδηγείται σε κρίσιμη αστοχία.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εν λόγω εργασία, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην αξιολόγηση της επιρροής εναλλακτικών υφιστάμενων προσεγγίσεων για τον υπολογισμό καμπυλών τρωτότητας στην αξιολόγηση της σεισμικής διακινδύνευσης συστημάτων κατασκευών με λειτουργική αλληλεπίδραση. Οι κλασσικές προσεγγίσεις, που βασίζονται σε συνάθροιση των αποκρίσεων υπό διαφορετικές σεισμικές καταγραφές, συχνά παραβλέπουν τη συσχέτιση μεταξύ διέγερσης και απόκρισης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε στρεβλώσεις, ειδικά σε συστήματα με ισχυρές αλληλεπιδράσεις. Η παρούσα μελέτη προτείνει για την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης σε τέτοια συστήματα την «ανά-καταγραφή» προσέγγιση, η οποία διατηρεί τη συσχέτιση εδαφικής κίνησης-απόκρισης και αποτυπώνει με μεγαλύτερη αξιοπιστία τη σεισμική

διακινδύνευση, ιδίως σε εγκαταστάσεις με διασυνδεδεμένες κατασκευές, όπως στην περίπτωση κατασκευών διυλιστηρίων. Η σύγκριση της «συγκεντρωτικής» προσέγγισης και της προσέγγισης «ανά-καταγραφή» ανέδειξε ουσιώδεις αποκλίσεις, με τη συμβατική προσέγγιση να υπερεκτιμά σημαντικά την πιθανότητα αστοχίας των συστημάτων που εξετάστηκαν (πύργων διύλισης και καμινάδων). Η προσέγγιση ανά-καταγραφή προσφέρει πιο αξιόπιστη εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης, ειδικά σε εγκαταστάσεις όπου τα στοιχεία υπόκεινται σε παρόμοια διέγερση και παρουσιάζουν κρίσιμη λειτουργική συσχέτιση.

## 7 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ:

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από το προγράμματα έρευνας και καινοτομίας HORIZON της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω του έργου “PLOT0–Deployment and Assessment of Predictive modelling, environmentally sustainable and emerging digital technologies and tools for improving the resilience of IWW against Climate change and other extremes” με αριθμό επιχορήγησης 101069941, καθώς και από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της «2ης Προκήρυξης ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση Διδακτικού και Ερευνητικού Προσωπικού», για το έργο “TwinCity: Climate-Aware Risk and Resilience Assessment of Urban Areas under Multiple Environmental Stressors via MultiTiered Digital City Twinning” (Αριθμός Έργου 2515).

## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dymiotis C., Kappos A.J., Chryssanthopoulos M.K. (1999). Seismic reliability of RC frames with uncertain drift and member capacity. *Journal of Structural Engineering*, 125(9), 1038–1047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:9\(1038\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:9(1038))
2. Kazantzi A.K., Righiniotis T.D., Chryssanthopoulos M.K. (2011). A simplified fragility methodology for regular steel MRFs. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(3), 390–403. <https://doi.org/10.1080/13632469.2010.498559>
3. Baker J.W. (2015). Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis. *Earthquake Spectra*, 31(1), 579–599. <https://doi.org/10.1193/021113EQS025M>
4. Karaferis, N. D., Melissianos, V. E., Bakalis, K., Kazantzi, A. K., & Vamvatsikos, D. (2025). Seismic risk assessment of a crude oil refinery testbed: Alternative fragility approaches. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 124, 105495. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105495>
5. Karaferis N.D., Kazantzi A.K., Melissianos V.E., Bakalis K., Vamvatsikos D. (2022). Seismic fragility assessment of high-rise stacks in oil refineries. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, 6877–6900. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01472-2>
6. Braconi A., Finetto M., Degee H., Hausoul N., Hoffmeister B., Gundel M., Karamanos S.A., Pappa P., Varelis G., Rinaldi V., Obiala R., Hjiat M., Somja H., Badalassi M., Caprili S. (2013). Optimizing the seismic performance of steel and steel-composite concrete structures by standardizing material quality control. (OPUS) Final Report. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Directorate G—Industrial Technologies, Unit G.5—Research Fund for Coal and Steel, EUR 25893 EN. <https://doi.org/10.2777/79330>
7. Sousa R., Almeida J.P., Correia A.A., Pinho R. (2020). Shake table blind prediction tests: Contributions for improved fiber-based frame modelling. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(9), 1435–1476. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1466743>
8. Vamvatsikos D., Cornell C.A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
9. Cornell C.A., Jalayer F., Hamburger R.O., Foutch D.A. (2002). The probabilistic basis for the 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 128(4), 526–533. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(526\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(526))
10. Kazantzi A.K., Righiniotis T.D., Chryssanthopoulos M.K. (2008). Fragility and hazard analysis of a welded steel moment resisting frame. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(4), 596–615. <https://doi.org/10.1080/13632460701512993>

11. Ancheta T.D., Darragh R.B., Stewart J.P., Seyhan E., Silva W.J., Chiou B.S.J., Wooddell K.E., Graves R.W., Kottke A.R., Boore D.M., Kishida T., Donahue J.L. (2013). PEER NGA-West2 Database, Technical Report PEER 2013/03. Berkeley, CA, USA. Retrieved from: [https://apps.peer.berkeley.edu/publications/peer\\_reports/reports\\_2013/webPEER-2013-03-Ancheta.pdf](https://apps.peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2013/webPEER-2013-03-Ancheta.pdf)
12. Kohrangi M., Bazzurro P., Vamvatsikos D., Spillatura A. (2017). Conditional spectrum-based ground motion record selection using average spectral acceleration. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 46(10), 1667–1685. <https://doi.org/10.1002/eqe.2876>
13. Melissianos, V., Karaferis, N., Bakalis, K., Kazantzi, A., & Vamvatsikos, D. (2024). Exposure and fragility of a virtual oil refinery testbed for seismic risk assessment [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11419659>