

**Απλοποιημένα Μοντέλα Μεταλλικών Κατασκευών για τη Σεισμική Αποτίμηση
Διακινδύνευσης Διυλιστηρίων**

Βασίλειος Ε. Μελισσιανός
Ερευνητικός Συνεργάτης
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: melissia@mail.ntua.gr

Αθανασία Κ. Καζαντζή
Ακαδημαϊκή Υπότροφος
Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος
Σέρρες, Ελλάδα
e-mail: kazantzi@ihu.gr

Νικόλαος Δ. Καραφέρης
Υποψήφιος Διδάκτορας
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: nkaraferis@mail.ntua.gr

Κωνσταντίνος Μπακάλης
Μεταδιδακτορικός Ερευνητής
ETH Zürich
Ζυρίχη, Ελβετία
e-mail: kbakalis@ethz.ch

Δημήτριος Βαμβάτσικος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: divamva@mail.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας και λειτουργικότητας των διυλιστηρίων πετρελαίου στην περίπτωση σεισμικού γεγονότος είναι ύψιστης σημασίας για την κοινωνία, το περιβάλλον και την οικονομία προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις. Στο πλαίσιο της βελτίωσης των σχεδίων ασφαλείας και αύξησης της σεισμικής επανατακτικότητας, η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία μελέτη αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας δύο χαρακτηριστικών μεταλλικών κατασκευών που απαντώνται σε διυλιστήρια, ενός πύργου δύλισης και μιας καμινάδας. Παρουσιάζεται η ανάπτυξη των κατάλληλων απλοποιημένων αριθμητικών προσομοιωμάτων, η επιλογή των μέτρων

απόκρισης, ο υπολογισμός των καμπύλων σεισμικής τρωτότητας και τέλος η αξιολόγηση της σεισμικής τους απόκρισης. Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν στο πλαίσιο εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας ενός διυλιστηρίου ως ένα ενιαίο σύνολο.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

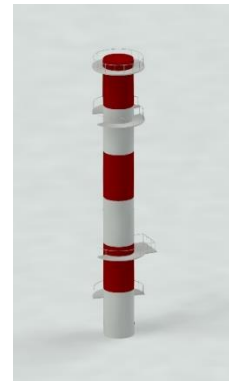
Τα διυλιστήρια αργού πετρελαίου βρίσκονται στον πυρήνα της παραγωγικής διαδικασίας ορυκτών καυσίμων και διαδραματίζουν ένα ζωτικό ρόλο για την οικονομία μίας χώρας. Η διασφάλιση της λειτουργικής και δομικής ακεραιότητας των εν λόγω ενεργειακών υποδομών ακολούθως ενός σεισμικού γεγονότος είναι ύψιστης σημασίας για την αποφυγή αστοχιών (π.χ. [1]-[2]) και των συνεπακόλουθων σημαντικών επιπτώσεων, όπως ανθρώπινες απώλειες, ρύπανση του περιβάλλοντος και σοβαρές οικονομικές απώλειες. Συνεπώς απαιτείται η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου πλαισίου για την αξιολόγηση της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών στις εν λόγω εγκαταστάσεις και επακόλουθα για την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης του διυλιστηρίου ως ένα ολοκληρωμένο δίκτυο.

Ένα διυλιστήριο περιλαμβάνει μια πλειάδα κατασκευών, όπως δεξαμενές υγρών και αέριων καυσίμων, δοχεία πίεσης, σωληνώσεις, κατασκευές υποστήριξης σωληνώσεων, κτήρια, πύργους επεξεργασίας, καμινάδες, βοηθητικά κτήρια, κ.α.. Οι προαναφερθείσες κατασκευές έχουν θεμελιωδώς διαφορετική μορφολογία, γεωμετρία και δυναμικά χαρακτηριστικά και απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση στο πλαίσιο αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης. Από αυτές τις κατασκευές, οι πύργοι διύλισης [Σχ. 1(α)] και οι καμινάδες [Σχ. 1(β)] δεν έχουν λάβει έως σήμερα την απαιτούμενη προσοχή της επιστημονικής κοινότητας, διότι θεωρούνται κυρίως ευπαθείς σε ανεμοπίεση [3]. Ωστόσο, σε συμμόρφωση με τους αυστηρούς εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς ασφαλείας θα πρέπει να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία τους και μετά από ένα σεισμικό γεγονός.

Οι εξεταζόμενες μεταλλικές κατασκευές στην παρούσα εργασία αφορούν σε έναν πύργο διύλισης και μία καμινάδα. Για τις κατασκευές αυτές μορφώθηκαν αρχικά απλοποιημένα αριθμητικά μοντέλα προκειμένου να αποτυπωθούν επαρκώς οι κύριες και χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας τους. Καθορίστηκαν εν συνεχεία οι κατάλληλες στάθμες βλάβης για τις προσδιορισθείσες χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας καθώς και τα σχετικά όρια. Η σεισμική απαίτηση των κατασκευών υπολογίστηκε μέσω Προσαυξητικών Δυναμικών Αναλύσεων (Incremental Dynamic Analysis – IDA) [4] για την καταγραφή της δομικής συμπεριφοράς μέσω κατάλληλων παραμέτρων απόκρισης (engineering demand parameters – EDP). Τέλος, υπολογίστηκαν εμπειρικές καμπύλες σεισμικής τρωτότητας για τις υπό εξέταση κατασκευές, που αποτελούν το κατάλληλο εργαλείο για την αξιολόγηση της ακεραιότητας των κατασκευών και ακολούθως για την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης του διυλιστηρίου.



(α)



(β)

Σχ. 1: Σχηματική απεικόνιση των εξεταζόμενων υψηλών μεταλλικών κατασκευών: (α) πύργος διύλισης και (β) καμινάδα

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΜΟΙΩΣΗ

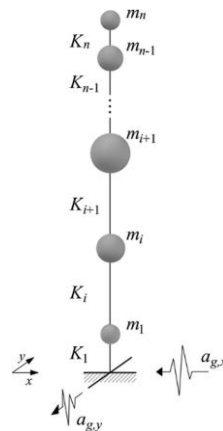
2.1. Πύργος διύλισης

Οι πύργοι διύλισης βρίσκονται στον πυρήνα της διαδικασίας διύλισης του αργού πετρελαίου για την παραγωγή των τελικών προϊόντων του, καθώς σε αυτούς εκτελούνται πολυάριθμες χημικές και φυσικές διεργασίες [5]. Από δομικής πλευράς, πρόκειται για λεπτότοιχα μεταλλικά κελύφη με στατικό σύστημα αυτό του κατακόρυφου προβόλου, λειτουργώντας υπό μεταβλητές συνθήκες θερμοκρασίας και εσωτερικές πίεσης.

Ο πύργος διύλισης που εξετάζεται είναι μια μονάδα καθίζησης οξέος (acid settler), όπου οι διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικά επίπεδα εσωτερικής πίεσης, αλλά υπό την ίδια θερμοκρασία. Για λόγους απλότητας, στους ελέγχους επάρκειας, λήφθηκε υπόψη η μέση πίεση λειτουργίας καθ' ύψος του πύργου, ίση με 0.94MPa. Σημειώνεται πως η επιρροή της τυπικής πίεσης λειτουργίας στην ελαστική δυσκαμψία των δοχείων πίεσης δύναται να θεωρηθεί αμελητέα (π.χ. [6]) και ως εκ τούτου αμελήθηκε στην προσομοίωση του υπό εξέταση πύργου. Ο πύργος έχει συνολικό ύψος 30m και εσωτερική διάμετρο ίση με 2.60m. Το πάχος που προκύπτει από το μηχανολογικό σχεδιασμό είναι μεταβλητό καθ' ύψος, έχοντας τέσσερα τμήματα με ενιαίο πάχος, ήτοι πάχος 16mm (στάθμη 0.00 έως 14.85m), πάχος 18mm (στάθμη 14.85 έως 23.65m), πάχος 19mm (στάθμη 23.65 έως 26.83m) και πάχος 18mm (στάθμη 26.83 έως 32.73m) από τη βάση προς την κορυφή. Σημειώνεται ότι λήφθηκε υπόψη μόνο το ίδιο βάρος της κατασκευής, ενώ το περιεχόμενο αμελήθηκε, καθώς βρίσκεται σε αέρια φάση. Η συνολική μάζα της κατασκευής είναι 49000kg και κατανέμεται καθ' ύψος βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κελύφους. Η αγκύρωση της βάσης και το σύστημα έδρασης θεωρείται ότι έχουν επαρκή αντοχή έναντι των σεισμικών δράσεων, δεδομένου ότι κατά τη συνήθη μελετητική και κατασκευαστική πρακτική είναι υπερδιαστασιολογημένα [7].

Το απλοποιημένο αριθμητικό προσομοίωμα μειωμένων βαθμών ελευθερίας (reduced-order numerical model) αναπτύχθηκε (Σχ. 2) στο λογισμικού ανοιχτού κώδικα OpenSees [8]. Η κατασκευή διακριτοποιήθηκε σε $i = 1, 2, \dots, n$ συγκεντρωμένες μάζες m_i που τοποθετήθηκαν στις διαφορετικές στάθμες καθ' ύψος του πύργου αντιπροσωπεύοντας τα διαφορετικά του τμήματα και τις μεταβολές του πάχους του κελύφους. Εν συνεχεία οι μάζες συνδέθηκαν μεταξύ τους με γραμμικά ελαστικά στοιχεία δοκού τύπου Euler-Bernoulli δυσκαμψίας k_i . Επιπρόσθετοι κόμβοι ορίστηκαν σε χαρακτηριστικές θέσεις, όπως ανθρωποθυρίδες και στόμια σύνδεσης σωλήνων, ως σημεία ελέγχου της δομικής

ακεραιότητας του κελύφους. Η δυσκαμψία των στοιχείων δοκού υπολογίσθηκε βάσει της εξωτερικής διαμέτρου και του πάχους του κελύφους. Οι γεωμετρικές μη-γραμμικότητες ελήφθησαν υπόψη.



Σχ. 2: Απεικόνιση του αριθμητικού προσομοιώματος μειωμένων βαθμών ελευθερίας για τις υψηλές και λεπτές μεταλλικές κατασκευές.

Τα φαινόμενα 2ας τάξεως (P-Δ) ελήφθησαν υπόψη. Η συμπεριφορά του υλικού θεωρήθηκε ελαστική καθώς δεν αναμένεται να αναπτυχθεί πλαστικότητα κατά τη σεισμική απόκριση της κατασκευής. Ο πύργος είναι κατασκευασμένος από χάλυβα ποιότητας S275 με μέση τάση διαρροής 380MPa [9]. Εκτελέστηκε αρχικά ιδιομορφική ανάλυση και προέκυψε πως η ιδιοπερίοδος είναι ίση με 0.49s για τις δύο πρώτες μεταφορικές ιδιομορφές (μία σε κάθε κύρια διεύθυνση), ενώ η τρίτη, επίσης μεταφορική ιδιομορφή, έχει περίοδο 0.08s. Τέλος, υιοθετήθηκε απόσβεση τύπου Rayleigh με λόγο 2% στην πρώτη και στην τρίτη ιδιομορφή.

2.2. Καμινάδα

Οι μεταλλικές καμινάδες είναι υψηλές κοίλες κατασκευές [Σχ. 1(α)]. Η εξεταζόμενη καμινάδα έχει ύψος 30m, εσωτερική διάμετρο 2.20m και το πάχος τοιχώματος είναι 14mm στο τμήμα από τη στάθμη 0.00m έως 4.16m και 10mm από τη στάθμη 4.16m έως 31.20m (κορυφή). Η καμινάδα προσομοιώθηκε αριθμητικά, όπως ο πύργος διύλισης, βάσει του Σχ. 2. Οι μάζες που καθορίστηκαν στο προσομοίωμα σε κάθε στάθμη αντιπροσωπεύουν το ίδιο βάρος του κάθε τμήματος, συμπεριλαμβανομένων των εξαρτημάτων, όπως πλατφόρμες, σκάλες, κ.α.. Η συνολική μάζα της μεταλλικής καμινάδας είναι 28600kg. Επισημαίνεται πως το άνοιγμα στη βάση της καμινάδας για την εισαγωγή των καυσαερίων, το οποίο είναι τυπικά το πιο τρωτό σημείο των εν λόγω κατασκευών (π.χ. [10]), θεωρήθηκε ότι είναι επαρκώς ενισχυμένο ώστε να μην επηρεάζει την πλευρική δυσκαμψία της κατασκευής. Η καμινάδα είναι κατασκευασμένη από χάλυβα ποιότητας S275R με μέση τάση διαρροής 397.56MPa [9]. Η διαδικασία μόρφωσης του αριθμητικού προσομοιώματος, οι παραδοχές που έγιναν και οι παράμετροι της ανάλυσης είναι ίδιες με εκείνες που υιοθετήθηκαν στην περίπτωση του πύργου διύλισης (βλ. Ενότητα 2.1). Βάσει της ιδιομορφικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, η θεμελιώδης μεταφορική ιδιομορφή έχει περίοδο 0.52s. Τέλος, θεωρήθηκε απόσβεση τύπου Rayleigh με λόγο 2% στις δύο πρώτες ιδιομορφές ανά διεύθυνση, δεδομένου ότι φορέας είναι συμμετρικός ως προς τις δύο διευθύνσεις.

3. ΜΕΘΟΛΟΓΙΑ

3.1. Ανάλυση τρωτότητας

Η αξιόπιστη εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της σεισμικής διακινδύνευσης του διυλιστηρίου. Η σεισμική τρωτότητα συναρτήσεως του μέτρου έντασης (intensity measure – IM) μπορεί να εκφραστεί υπό την τυπική λογαριθμοκανονική παραδοχή ως ([11], [12], [13]):

$$P[D > C_{LS}|IM] = \Phi\left(\frac{\ln IM - \ln IM^{LS}}{\beta_{LS}}\right) \quad (1)$$

όπου D είναι η σεισμική απαίτηση (seismic demand) σε όρους της παραμέτρου απόκρισης (EDP), C_{LS} είναι η σεισμική ικανότητα (seismic capacity) που σχετίζεται με την οριακή κατάσταση LS , εκφραζόμενη σε όρους EDP , IM^{LS} είναι η διάμεση τιμή του μέτρου έντασης (IM) που απαιτείται για την υπέρβαση της οριακής κατάστασης ενδιαφέροντος LS και β_{LS} είναι η σχετιζόμενη λογαριθμοκανονική διασπορά του μέτρου έντασης, ήτοι η τυπική απόκλιση του φυσικού λογαρίθμου των δεδομένων.

3.2. Μέτρο έντασης και επιλογή καταγραφών

Το μέτρο έντασης (IM) είναι η διαμεταβλητή που συνδέει το αποτέλεσμα της ανάλυσης σεισμικής διακινδύνευσης με τη δομική ανάλυση της κατασκευής. Ως μέτρο έντασης υιοθετήθηκε εδώ η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (peak ground acceleration - PGA) που θεωρείται αγνωστικό IM , καθώς δε σχετίζεται με την κατασκευή. Οι τιμές PGA υπολογίστηκαν ως ο γεωμετρικός μέσος όρος των PGA στις δύο οριζόντιες ορθογώνιες κατευθύνσεις για κάθε μία από τις εξεταζόμενες σεισμικές καταγραφές. Επισημαίνεται πως η επιλογή του IM καθοδηγήθηκε από την ανάγκη υπολογισμού της σεισμικής τρωτότητας πολλών διαφορετικών κατασκευών και στη συνέχεια της σύνθεσης των αποτελεσμάτων για την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης του διυλιστηρίου [14].

Ένα σύνολο 30 φυσικών, μη παλμικών και μη μεγάλης διάρκειας σεισμικών καταγραφών επιλέχθηκε από τη βάση επιταχυνσιογραφημάτων NGA-West2 [15] για την ανάλυση των κατασκευών και τον υπολογισμό της σεισμικής απαίτησης αυτών μέσω αναλύσεων τύπου IDA [16] χρησιμοποιώντας τις σεισμικές καταγραφές στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Οι λεπτομέρειες της επιλογής των καταγραφών παρέχονται στην εργασία [17]. Σημειώνεται πως οι εδαφικές συνθήκες θεωρούνται ομοιογενείς εντός του διυλιστηρίου και για το λόγο αυτό θεωρείται πλήρης χωρική συσχέτιση μεταξύ των σεισμικών συμβάντων. Έτσι, η μεταβλητότητα μεταξύ των σεισμικών καταγραφών (record-to-record variability) αποτελεί την κύρια πηγή αβεβαιότητας.

4. ΣΤΑΘΜΕΣ ΒΛΑΒΗΣ

4.1. Πύργος διύλισης

Ο ορισμός των κατάλληλων σταθμών βλάβης (DS) είναι απαραίτητος για την αναγνώριση των κύριων μορφών αστοχίας της κατασκευής και την ποσοτικοποίηση των βλαβών έπειτα από σεισμούς με διαφορετική ένταση. Για τον πύργο διύλισης καθορίστηκαν δύο διακριτές και αμοιβαία αποκλειόμενες στάθμες DS , ήτοι $DS1$ και $DS2$ [17] (βλ. Πίν. 1). Η μετάβαση

στη στάθμη *DS1* σηματοδοτείται από την υπέρβαση του ορίου 0.5% του λόγου μετακίνησης κορυφής (top drift ratio - *TDR*) που αντιστοιχεί στη στάθμη περιορισμού βλαβών κατά EN 1998-6:2005 [18]. Μεγαλύτερες μετακινήσεις της κορυφής αναμένεται να προκαλέσουν προβλήματα στη λειτουργία του πύργου λόγω βλάβης των συνδεδεμένων σωληνώσεων. Η στάθμη *DS2* σχετίζεται με τη δομική ακεραιότητα του πύργου και η μετάβαση σε αυτή τη στάθμη ελέγχεται με βάση την αντοχή του κελύφους έναντι τοπικού λυγισμού βάσει του EN 1993-1-6:2007 [19]. Για την εκτίμηση της αντοχής του κελύφους λαμβάνονται υπόψη τα εντατικά μεγέθη (αξονικές και τέμνουσες δυνάμεις, καμπτικές ροπές) από την ανάλυση χρονοϊστορίας του πύργου. Η επαλήθευση της αντοχής σε τοπικό λυγισμό του κελύφους πραγματοποιείται βάσει του Annex D, EN 1993-1-6:2007 [19] και με χρήση της μεταβλητής R_c που λαμβάνει υπόψη της την αλληλεπίδραση θλιπτικών και διατμητικών τάσεων.

Στάθμη βλάβης	Περιγραφή	Όριο ικανότητας
<i>DS1</i>	Μετακίνηση κορυφής που παρεμποδίζει τη λειτουργία ή βλάβη στις συνδεδεμένες σωληνώσεις	$TDR \geq 0.5\%$
<i>DS2</i>	Τοπικός λυγισμός του κελύφους που προκαλεί δομική αστοχία	$R_c \geq 1.00$

Πίν. 1. Πύργος διύλισης: Στάθμες βλάβης και όρια ικανότητας

4.2. Καμινάδα

Τρεις διακριτές στάθμες βλάβης (*DS*) καθορίστηκαν για την εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς της καμινάδας. Η στάθμη *DS1* σχετίζεται με τη λειτουργικότητα και το σχετικό όριο ικανότητας 0.5% για το λόγο μετακίνησης κορυφής (*TDR*) υιοθετήθηκε από τον EN 1998-6:2005 [18]. Η στάθμη *DS2* σχετίζεται με πιθανή αστοχία του εσωτερικού κελύφους (liner), η οποία εξετάζεται με τη διαφορική μετακίνηση μεταξύ των τμημάτων της κατασκευής (intersegment drift ratio – *IDR*) και χρησιμοποιώντας το όριο 1.2% του EN 1998-6:2005 [18]. Τέλος, η μετάβαση στη στάθμη *DS3* σηματοδοτεί τη δομική αστοχία της καμινάδας εξαιτίας τοπικού λυγισμού του κελύφους. Οι στάθμες βλάβης και τα σχετικά όρια ικανότητας παρατίθενται στον Πίν. 2.

Στάθμη βλάβης	Περιγραφή	Όριο ικανότητας
<i>DS1</i>	Μετακίνηση κορυφής που παρεμποδίζει τη λειτουργία ή βλάβη στις συνδεδεμένες σωληνώσεις	$TDR \geq 0.5\%$
<i>DS2</i>	Διαφορική μετακίνηση που προκαλεί αστοχία του εσωτερικού κελύφους	$IDR \geq 1.2\%$
<i>DS3</i>	Τοπικός λυγισμός του κελύφους που προκαλεί δομική αστοχία	$R_c \geq 1.00$

Πίν. 2. Καμινάδα: Στάθμες βλάβης και όρια ικανότητας

5. ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

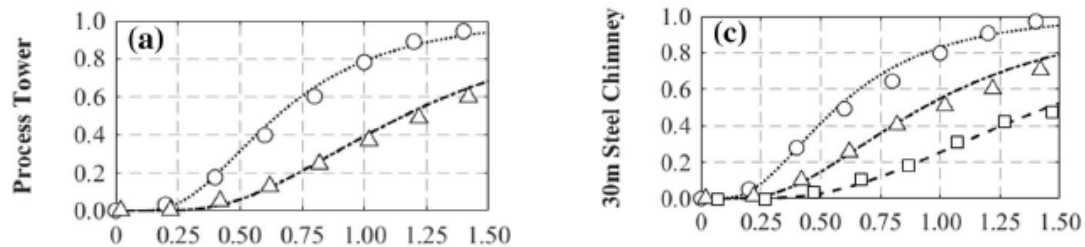
Οι καμπύλες τρωτότητας παρήχθησαν για κάθε στάθμη βλάβης, εφαρμόζοντας επιπλέον μια προσαρμογή λογαριθμοκανονικής κατανομής στα εμπειρικά σημεία, δηλαδή σε αυτά που προέκυψαν από την εξ. (1). Οι εκτιμήσεις της διάμεσης τιμής και της διασποράς των καμπύλων τρωτότητας παρέχονται στον Πίν. 3 για τις δύο κατασκευές. Προκειμένου να

ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με την ικανότητα στον υπολογισμό των καμπύλων τρωτότητας, δημιουργήθηκαν 100 κανονικά καταναμημένες υλοποιήσεις (samples) της ικανότητας για κάθε σεισμική καταγραφή υποθέτοντας συνδιακύμανση (covariance) 20% στις διάμεσες τιμές της ικανότητας. Οι καμπύλες τρωτότητας παρουσιάζονται στο Σχ. 3.

Κατασκευή	DS1		DS2		DS3	
	Διάμεσος	Διασπορά	Διάμεσος	Διασπορά	Διάμεσος	Διασπορά
Πύργος δύλισης	0.65g	0.54g	1.16g	0.54g	—	—
Καμινάδα	0.57g	0.59g	0.93g	0.59g	1.45g	0.56g

Πίν. 3. Διάμεση τιμή και διασπορά καμπύλων τρωτότητας σε όρους επιτάχυνσης **PGA**

Τα αποτελέσματα για τον πύργο δύλισης δείχνουν ότι (α) η λογαριθμοκανονική κατανομή προσεγγίζει ικανοποιητικά την καμπύλη σεισμικής τρωτότητας της εν λόγω κατασκευής, (β) δεν υπάρχει μεγάλη πιθανότητα βλάβης για σεισμούς χαμηλής έως μέτριας έντασης και (γ) για σεισμικά γεγονότα υψηλότερης έντασης, η πιθανότητα απώλειας της λειτουργικής ακεραιότητας είναι μεγάλη, ενώ αντιθέτως η πιθανότητα δομικής αστοχίας είναι σχετικά χαμηλότερη, αλλά σε καμία περίπτωση αμελητέα. Στην περίπτωση της καμινάδας διαπιστώνεται πως (α) οι οριακές καταστάσεις είναι διαδοχικές (sequential), (b) η πιθανότητα δομικής αστοχίας είναι πολύ μικρή για σεισμικά γεγονότα χαμηλής έως μέτριας έντασης, εν αντιθέσει με την πιθανότητα λειτουργικών βλαβών κυρίως λόγω μετακίνησης της κορυφής.



Σχ. 3: Καμπύλες τρωτότητας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία αναλυτικής εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας δύο χαρακτηριστικών υψηλών μεταλλικών κατασκευών που απαντώνται σε διυλιστήρια. Ειδικότερα, εξετάστηκε ένας πύργος δύλισης και μια καμινάδα. Αναπτύχθηκαν τα κατάλληλα απλοποιημένα αριθμητικά προσομοιώματα που εξασφαλίζουν αφενός την απαιτούμενη ακρίβεια για την πρόβλεψη των βασικών μορφών αστοχίας και αφετέρου είναι αποτελεσματικά για πρακτικές εφαρμογές. Η εκτίμηση της σεισμικής απαίτησης πραγματοποιήθηκε για ένα εύρος σεισμικών εντάσεων εκτελώντας δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας τύπου IDA χρησιμοποιώντας ένα φάσμα φυσικών σεισμικών καταγραφών που επιλέχθηκαν ώστε να είναι συμβατές με τη σεισμικότητα της περιοχής. Έπειτα ορίστηκαν οι κατάλληλες στάθμες βλάβης για την αξιολόγηση της λειτουργικής και δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Τέλος, παρήχθησαν οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας λαμβάνοντας υπόψη τις επιστημικές αβεβαιότητες που σχετίζονται

με την ικανότητα και τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ανέδειξε πως δομικές βλάβες στις κατασκευές αναμένονται μόνο για πολύ μεγάλες σεισμικές εντάσεις. Εν αντιθέσει, χαμηλότερης έντασης σεισμικές διεγέρσεις ενδέχεται να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα στις κατασκευές και κατά συνέπεια σε όλο το διυλιστήριο. Επί παραδείγματι, η ενδεχόμενη αστοχία των συνδεδεμένων σωληνώσεων μπορεί να θέσει εκτός λειτουργίας μια ολόκληρη μονάδα του διυλιστηρίου προκειμένου να εκτελεστούν εργασίες επισκευής. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν πως η επιρροή του σεισμικού κινδύνου σε κατασκευές κρίσιμων υποδομών θα πρέπει να λαμβάνεται ρητά υπόψη και να εξετάζεται όχι μόνο η δομική αλλά και η λειτουργική ακεραιότητα των επιμέρους κατασκευών, δεδομένου ότι αποτελούν μέρος ενός ενιαίου σύνθετου συστήματος με σημαντική λειτουργική αλληλεξάρτηση των υποσυστημάτων του.

ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα HORIZON 2020 της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσω του έργου “METIS-Seismic Risk Assessment for Nuclear Safety” με Grant Agreement No. 945121 και από το πρόγραμμα HORIZON-EUROPE 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 Grant Agreement No. 101069941. Επίσης, υποστηρίχθηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της Δράσης «2^η Προκήρυξη ερευνητικών έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών» (Αριθμός Έργου: 2515, “TwinCity - Climate-Aware Risk and Resilience Assessment of Urban Areas under Multiple Environmental Stressors via Multi-Tiered Digital City Twinning”).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] GIRGIN S. “The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: aftermath and lessons learned”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 4, 2011, pp. 1129–1140. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1129-2011>
- [2] KRAUSMANN E., CRUZ AM. “Natech risk management in Japan after Fukushima – What have we learned?”, *Loss Prevention Bulletin*, Vol. 277, 2021. <https://www.icheme.org/media/15301/krausmannnew.pdf>
- [3] WANG L., FAN X.Y. “Failure cases of high chimneys: A review”, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 105, 2019, pp. 1107–1117. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.032>
- [4] VAMVATSIKOS D., CORNELL C.A. “Incremental dynamic analysis”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 3, 2002, pp. 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- [5] ANCHEYTA J. “Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining”, 2011, Wiley, New Jersey. <https://doi.org/10.1002/9780470933565>
- [6] KARAMANOS S.A. “Stability of pressurized long inelastic cylinders under radial transverse loads”, *Computational Mechanics*, Vol. 18, 1996, pp. 444–453.

<https://doi.org/10.1007/BF00350252>

- [7] MOHARRAMI H., AMINI M.A. “Seismic vulnerability assessment of process towers using fragility curves”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 23, No. 8, 2014, pp. 593–603. <https://doi.org/10.1002/tal.1067>
- [8] MCKENNA F., FENVES G.L. “The OpenSees Command Language Manual (1.2 edn)”, 2011, University of California Berkeley, Berkeley
- [9] BRACONI A., FINETTO M., DEGEE H., HAUSOUL N., et al. “Optimising the seismic performance of steel and steel-concrete structures by standardising material quality control (OPUS)”, *European Commission, Directorate-General for Research and Innovation*, 2013, Publications Office. <https://doi.org/10.2777/79330>
- [10] HUANG W., GOULD P.L., MARTINEZ R., JOHNSON G.S. “Non-linear analysis of a collapsed reinforced concrete chimney”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, 2004, pp. 485–498. <https://doi.org/10.1002/eqe.362>
- [11] BAKER J.W. “Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis”, *Earthquake Spectra*, Vol. 31, No. 1, 2015, pp. 579–599. <https://doi.org/10.1193/021113EQS025M>
- [12] BAKALIS K., VAMVATSIKOS D. “Seismic fragility functions via nonlinear response history analysis”, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 144, No. 10, 2018, pp. 04018181. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002141](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002141)
- [13] CORNELL C.A., JALAYER F., HAMBURGER R.O., FOUTCH D.A. “The probabilistic basis for the 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines”, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 128, No. 4, 2002, pp. 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))
- [14] MELISSIANOS V.E., KARAFERIS N.D., KAZANTZI A.K., BAKALIS K., VAMVATSIKOS D. “An integrated model for the seismic risk assessment of an oil refinery”, *3rd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure (ICONHIC 2022)*, 2022.
- [15] ANCHETA T., DARRAGH R., STEWART J., et al. “PEER NGA-West2 Database, Technical Report PEER 2013/03”, *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, 2013, Berkeley.
- [16] VAMVATSIKOS D., CORNELL C.A. “Incremental dynamic analysis”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 3, 2002, pp. 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- [17] KARAFERIS N., KAZANTZI A.K., MELISSIANOS V.E., BAKALIS K., VAMVATSIKOS D. “Seismic fragility assessment of high-rise stacks in oil refineries”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 20, 2022, pp. 6877–6900. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01472-2>

- [18] CEN “Eurocode 8: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 6: Towers, masts and chimneys. EN 1998-6”, *European Committee for Standardization (CEN)*, 2005, Brussels.
- [19] CEN “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1–6: Strength and stability of shell structures. EN 1993-1-6”, *European Committee for Standardization (CEN)*, 2007, Brussels.

Reduced-order models of steel structures for the seismic risk assessment of oil refineries

Vasileios E. Melissianos

Research Associate

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: melissia@mail.ntua.gr

Athanasia K. Kazantzi

Adjunct Lecturer

International Hellenic University

Serres, Greece

e-mail: kazantzi@ihu.gr

Nikolaos D. Karaferis

PhD Candidate

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: nkaraferis@mail.ntua.gr

Konstantinos Bakalis

Postdoctoral Researcher

ETH Zürich

Zürich, Switzerland

e-mail: kbakalis@ethz.ch

Dimitrios Vamvatsikos

Associate Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: divamva@mail.ntua.gr

ABSTRACT

Ensuring the structural and operational integrity of oil refineries in case of an earthquake event is of utmost importance for the society, the environment, and the economy. A potential failure in such critical facilities may trigger a number of undesirable situations, such as fire, injuries, environmental pollution, etc. Hence, improving safety plan and increasing seismic resilience is a necessity that requires the development of reliable models and seismic risk assessment tools. Towards this direction, this paper presents a seismic fragility study of two characteristic steel high-rise stacks encountered in oil refineries, namely a relatively low-rise chimney and a process tower. The developed of reduced-order numerical models, the selection of appropriate engineering demand parameters to capture the seismic response of the structures, the calculation of the fragility curves, and finally the evaluation of the overall seismic response are presented. The results could be exploited in the context of a seismic risk assessment study of an oil refinery, as an integrated system.