

# ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥ: ΜΙΑ ΑΛΗΘΙΝΗ ΙΣΤΟΡΙΑ ΜΕ ΤΡΙΑ ΜΙΚΡΑ ΓΟΥΡΟΥΝΑΚΙΑ

**Δημήτριος Βαμβάτσικος**  
*Σχολή Πολιτικών Μηχανικών*  
*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα*  
e-mail: [divamva@mail.ntua.gr](mailto:divamva@mail.ntua.gr)

## 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τρία μικρά γουρουνάκια σχεδίασαν τρία χαμηλής πλαστιμότητας βιομηχανικά κτίρια για γεωργική χρήση. Τα δύο κατέρρευσαν υπό γνωστό ακραίο φαινόμενο επικινδυνότητας. Ευτυχώς, δεν υπήρξε απώλεια ζωής, όμως δύο έργα και δύο περιουσίες ζωής καταστράφηκαν. Τις πταίει; Το ανεπαρκές υλικό, άχυρο και ξύλο; Οι δύο μελετητές; Η ιστορία φαίνεται να έχει ήδη αποδώσει ευθύνες καταλήγοντας σε αυτά ακριβώς τα συμπεράσματα. Απεναντίας, οι πρόσφατες έρευνές μας ξεκάθαρα δείχνουν ότι ήταν απλά μια περίπτωση έντιμων και καλοπροαίρετων μηχανικών που προδόθηκαν από έναν έντιμο και καλοπροαίρετο κανονισμό σχεδιασμού. Παραπλανήθηκαν ώστε να εμπιστευτούν έναν επινοημένο συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  της τάξης του 1.5 έως 2.0 για τη σχεδίαση βιομηχανικών κατασκευών. Ο συντελεστής αυτός είχε ενταχθεί στον κανονισμό μην έχοντας ελεγχθεί όπως θα όφειλε, οδηγώντας τα χαμηλής πλαστιμότητας συστήματα στο να έχουν ανεπαρκές περιθώριο ασφάλειας έναντι της κατάρρευσης υπό ακραίες συνθήκες φόρτισης. Δύο, ομολογουμένως γουρούνια, μηχανικοί εξαπατήθηκαν από τις καθεστηκίες δυνάμεις. Μείνετε μαζί μας καθώς γυρίζουμε πίσω τη μηχανή του χρόνου για να αποκαλύψουμε μια από τις μεγαλύτερες αδικίες της ιστορίας, η οποία ακόμα και σήμερα διδάσκεται στα παιδιά μας.

## 2. ΜΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΛΑΝΗ

Όταν αναθέτεις τη μελέτη σημαντικών βιομηχανικών κτιρίων και υποδομών σε sus domesticus (οικόσιτο χοίρο) εντός περιοχών με έντονη φυσική επικινδυνότητα (σεισμός, άνεμος, κακός λύκος, κλπ) πρέπει να έχεις μεγάλη εμπιστοσύνη στον κανονισμό σχεδιασμού. Για την ακρίβεια, για να είμαστε δίκαιοι απέναντι σε αυτά τα ιδιαίτερω χαριτωμένα θηλαστικά, σε οποιονδήποτε μηχανικό και αν ανατεθεί η μελέτη, θα πρέπει να υποστηρίζεται από κανονισμό που είναι πέραν πάσης αμφιβολίας, καθότι δεν υπάρχει μαγεία: Ο μηχανικός θα ακολουθήσει τον κανονισμό όσο καλύτερα μπορεί. Δεν είναι όμως έρμαιο μηχανικής παραγαλίας ενός κειμένου που παρήγαγε μια επιτροπή. Ξέρει να προσέχει τις κακοτοπιές. Έτσι, θα υπάρξουν και διαφοροποιήσεις, συνήθως όμως μόνο εκεί όπου ο μηχανικός θεωρεί ότι έχει επαρκή εμπειρία και γνώση της επιστήμης ώστε να πετύχει καλύτερη οικονομία από τον κανονισμό, χωρίς ωστόσο να μειώνεται η ασφάλεια κάτω των

ορίων. Και εκεί ακριβώς βρίσκεται το πρόβλημα: Η εμπειρία αυτή δεν είναι πάντα επαρκής, κάτι για το οποίο δεν ευθύνεται κατ' ανάγκη ο μηχανικός αλλά συμβάλλει και η φύση του προβλήματος.

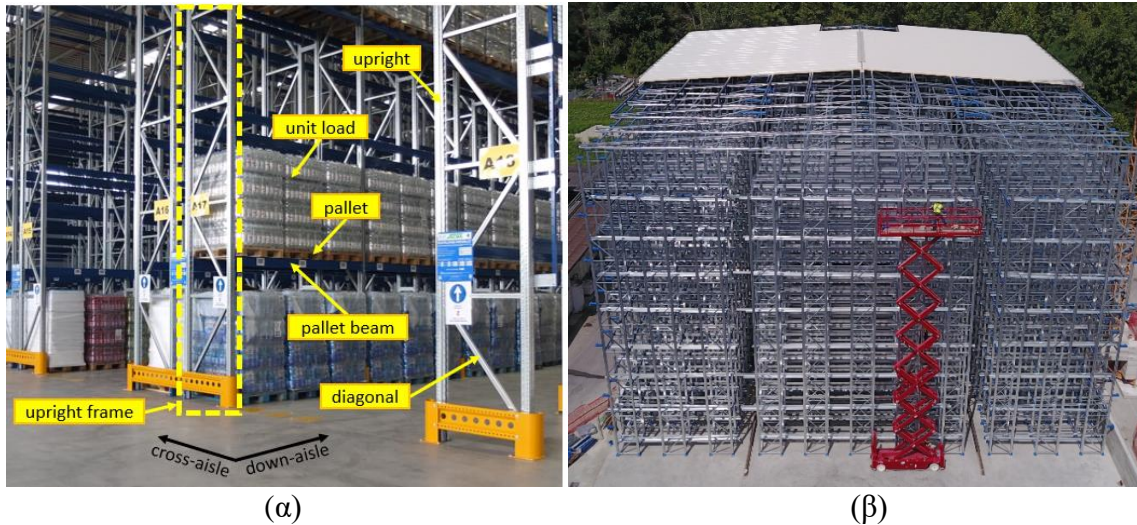
Έχει χυθεί άπειρο (ηλεκτρονικό και μη) μελάνι για τη σεισμική συμπεριφορά κτιρίων από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα. Έχουν γίνει αμέτρητα πειράματα σε ψαθυρά και όλκιμα μέλη, συνδέσεις, λεπτομέρειες αλλά και ολόκληρες κατασκευές. Η πλειονότητά τους (ίσως και πάνω από το 95%) αφορά συμβατικά κτίρια, κάτι που δε θα πρέπει να μας εκπλήσσει δεδομένου ότι αυτού του είδους τα κτίρια αποτελούν με διαφορά το μεγαλύτερο μέρος του κτιριακού αποθέματος κάθε χώρας. Κατά τον ίδιο τρόπο, οι εικόνες και αναφορές που βλέπουμε μετά από κάθε σεισμικό γεγονός (ή γενικά φυσική καταστροφή) αφορούν σε δυσανάλογα μεγάλο ποσοστό τις συμβατικές και όχι τις βιομηχανικές κατασκευές, όπως πχ συνέβη στην πρόσφατη σεισμική ακολουθία στη Νοτιοανατολική Τουρκία [1]. Το ίδιο ισχύει και για τις επιστημονικές δημοσιεύσεις, τις τεχνικές αναφορές, τα ερευνητικά έργα. Με άλλα λόγια, υπάρχει ένα έλλειμμα γνώσης και εμπειρίας σε βιομηχανικά κτίρια ως προς το θέμα της πραγματικής τους συμπεριφοράς, το οποίο δεν αντισταθμίζεται εύκολα από τη χρήση νέων και βελτιωμένων λογισμικών ή πολυπλοκότερων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Ας μην το αφήσουμε όμως μόνο στη θεωρία. Πάμε να δούμε και στην πράξη τέσσερα παραδείγματα πρακτικών προβλημάτων που έχουν εμφανιστεί στους ευρωπαϊκούς κανονισμούς και στην εφαρμογή τους. Πρόκειται για καθημερινά ζητήματα, τα οποία ατυχώς μπορούν να προδώσουν άτυχους αν και καλοπροαίρετους μηχανικούς, με τον ίδιο τρόπο που έκαναν και στα αγαπημένα μας γουρουνάκια.

### **3. ΜΗ ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ**

#### **3.1 Πέντε μελετητές, τρεις απόψεις για την ασφάλεια**

Σε πρόσφατο ερευνητικό πρόγραμμα, το οποίο για τις ανάγκες της συζήτησής μας δε χρειάζεται να ονοματιστεί, ζητήθηκε κεκλεισμένων των θυρών από πέντε κορυφαίες ευρωπαϊκές εταιρείες μελέτης φορέων αυτοματοποιημένων ραφιών (Σχ. 1) να παραθέσουν τις παραδοχές τους για τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Πληροφοριακά, ο κλάδος είναι έντονα ανταγωνιστικός και υπάρχει μεγάλη πίεση για σχεδιασμό στα όρια του κανονισμού, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο EN16681 [2]. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν εργαζόμενοι στο χώρο εγκατάστασης των αυτοματοποιημένων (ρομποτικών) ραφιών ο σεισμός σχεδιασμού αντιστοιχεί σε επικινδυνότητα 20% στα 50 χρόνια, αντί του συνήθους 10% στα 50 χρόνια. Επίσης υπάρχει μια σειρά από μειωτικούς συντελεστές ώστε να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική συμπεριφορά των ραφιών και των παλετών, όπως πχ η ενδεχόμενη ολίσθηση των τελευταίων υπό σεισμικές δυνάμεις η οποία μειώνει τις τέμνουσες που μεταφέρονται στην κατασκευή ανά «όροφο» (ορθότερα: στάθμη φορτίου). Επίσης επιτρέπονται συντελεστές συμπεριφοράς της τάξεως του  $q = 1.5 - 2.0$ , αν και πρόκειται για φορείς από χαλύβδινα μέλη ψυχρής έλασης με διατομές κατηγορίας 4 κατά τον EN1993-1-1 [3]. Αναλόγως με την ερμηνεία που δίνει ο κάθε μηχανικός στις διατάξεις του κανονισμού, μπορεί να θεωρηθεί ότι κάποιοι συντελεστές μπορούν ή δεν μπορούν να εφαρμόζονται ταυτόχρονα. Ομοίως μπορεί να επιλέξει χαμηλότερο ή υψηλότερο συντελεστή συμπεριφοράς ανάλογα με την «αναμενόμενη» ανελαστικότητα ή υπεραντοχή που θεωρεί ότι μπορεί να αναπτύξει ο φορέας.

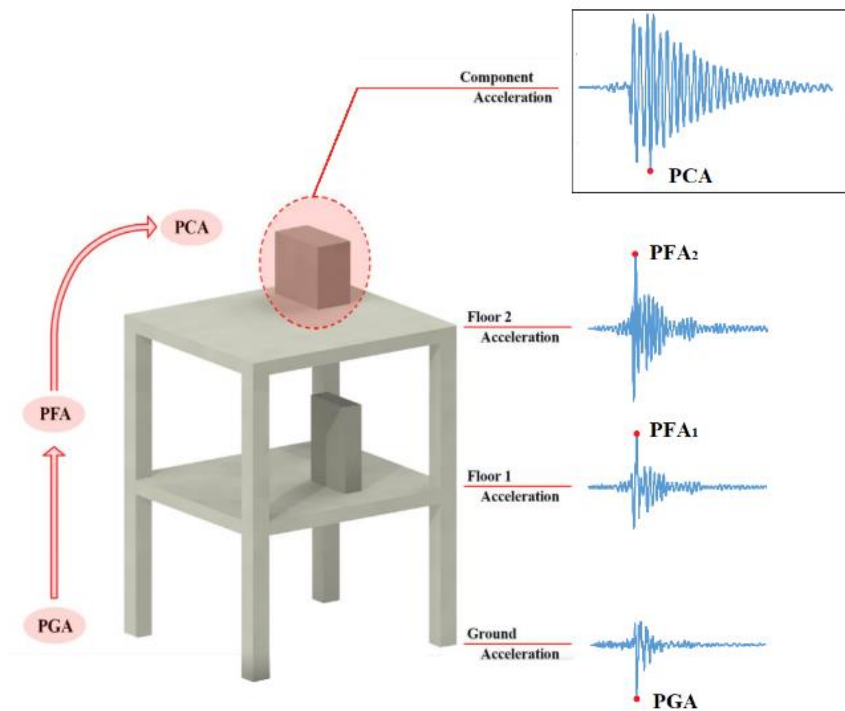


Σχ. 1: (α) Δομικά μέλη ενός Προσαρμόσιμου Φορέα Ραφιών (Adjustable Pallet Rack); (β) Αυτοματοποιημένος φορέας ραφιών στη φάση κατασκευής (από [4]).

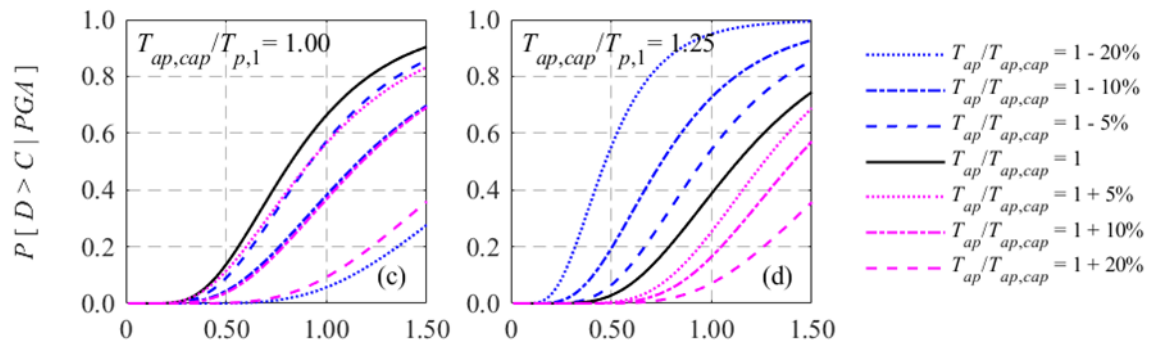
Ελλείπει καλύτερων δεδομένων, και δεδομένου ότι δεν έχει ακόμα γίνει δοκιμή πλήρους κλίμακας σε σεισμική τράπεζα μιας τόσο μεγάλης κατασκευής (παρά μόνο μικρών μερών αυτής), δεν είναι δυνατό να εξακριβώσουμε ποια είναι η σωστή τακτική. Εν τέλει, οι πέντε εταιρείες κατέληξαν σε τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις στο πώς λαμβάνουν υπόψη τα σεισμικά φορτία, οδηγούμενες σε τρία διαφορετικά επίπεδα ασφάλειας. Ατυχώς, το ποιος έχει δίκιο θα μπορέσει να το αποδείξει μόνο ο επόμενος σεισμός, ή ελπίζουμε η πρώτη πλήρους κλίμακας δοκιμή, χωρίς να ευθύνονται ούτε στο ελάχιστο οι μελετητές που λειτουργούν στα όρια της τρέχουσας γνώσης μας.

### 3.2 Μη δομικά στοιχεία σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις

Ο μηχανολογικός εξοπλισμός αποτελεί σημαντικό, αν όχι το κυριότερο, μέρος πολλών βιομηχανικών εγκαταστάσεων, ιδιαίτερα σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας, σε διυλιστήρια και γενικότερα στη χημική βιομηχανία. Αποτελεί μη δομικό στοιχείο το οποίο σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη τη διπλή ενίσχυση (ή ορθότερα φιλτράρισμα) των σεισμικών κυμάτων δια μέσου της ταλάντωσης της κύριας κατασκευής και του εξοπλισμού καθεαυτού. Έτσι, για παράδειγμα, κατά το Σχ. 2 [5] η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (peak ground acceleration, PGA) παράγει τις μέγιστες επιταχύνσεις ορόφων (peak floor accelerations, PFAs) οι οποίες μας δίνουν τη μέγιστη επιτάχυνση του εκάστοτε στοιχείου (peak component acceleration, PCA). Όταν μάλιστα συμπίπτουν οι περίοδοι ταλάντωσης κατασκευής και μη δομικού στοιχείο έχουμε την κρίσιμη περίπτωση του συντονισμού, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μέσους συντελεστές μεγέθυνσης της σεισμικής φόρτισης της τάξης του 7 όταν τόσο η κατασκευή όσο και το στοιχείο έχουν γραμμική συμπεριφορά. Αντιθέτως, η εμφάνιση μη γραμμικότητας σε οποιοδήποτε σημείο της διαδρομής που ακολουθούν τα φορτία δρα ευεργετικά, αποσυντονίζοντας το στοιχείο από την κατασκευή και μειώνοντας σημαντικά τη μεγέθυνση των σεισμικών φορτίων. Με άλλα λόγια, χρειάζεται ακριβής γνώση των δυναμικών χαρακτηριστικών και της αναμενόμενης συμπεριφοράς τόσο της κατασκευής όσο και του μη δομικού στοιχείου (βλέπε Σχ. 3 [5]) καθώς και της αλληλεπίδρασης όλων των σχετικών στοιχείων με την κατασκευή για να έχουμε ορθό σχεδιασμό [6].



Σχ. 2: Ενίσχυση της εδαφικής επιτάχυνσης στο επίπεδο της πλάκας και του μη δομικού στοιχείου (από [5])



Σχ. 3: Καμπύλες τρωτότητας για μη δομικό στοιχείο όταν έχει γίνει σωστή (αριστερά) ή λάθος (δεξιά) εκτίμηση της ιδιοπεριόδου του στοιχείου ή της κατασκευής κατά το σχεδιασμό. Στη δεύτερη περίπτωση, η διάμεση PGA που μπορεί να επιφέρει αστοχία πέφτει κάτω των 0.50g (από [5]).

Ο τρέχων EN1998-4:2006 [7] που θεραπεύει τον αντισεισμικό σχεδιασμό των βιομηχανικών κατασκευών δεν προσφέρει κάποια οδηγία ως προς το πώς να εκτιμώνται οι σεισμικές φορτίσεις των μη δομικών στοιχείων, πρακτικά οδηγώντας στις αντίστοιχες διατάξεις του EN1998-1:2004 [8] για συμβατικά κτίρια. Ωστόσο υπάρχουν σαφείς διαφορές ως προς τη σημασία και την κρισιμότητα των μη δομικών στοιχείων σε μια βιομηχανία έναντι ενός τυπικού κτιρίου, ενώ ταυτόχρονα διαφέρει σημαντικά ο σχεδιασμός της κύριας κατασκευής μεταξύ των δύο αυτών περιπτώσεων. Συγκεκριμένα, κατά μεγάλη πλειονότητα τα βιομηχανικά κτίρια είναι κατασκευές σχετικά χαμηλής πλαστιμότητας, της τάξεως του  $q = 1.5 - 2$ , ενώ δεν είναι σπάνιο να υπάρχει μεγάλη υπεραντοχή ως προς τα σεισμικά φορτία, κυρίως λόγω απαιτήσεων πυροπροστασίας. Κατά συνέπεια, ο συντελεστής συμπεριφοράς που χρησιμοποιήθηκε κατά το σχεδιασμό δεν είναι ενδεικτικός της πλαστιμότητας που μπορεί να αναπτύξει η κατασκευή πριν επέλθει βλάβη στα μη δομικά στοιχεία. Επιπλέον, ο

μηχανικός που σχεδιάζει την αγκύρωση του εξοπλισμού επί της κατασκευής δεν έχει πάντα πλήρη γνώση των ιδιοπεριόδων ταλάντωσης. Αυτό είναι το σύνηθες για τον εξοπλισμό, αλλά ισχύει σε πολλές περιπτώσεις και για την κύρια κατασκευή, καθότι δεν είναι σπάνιο να εγκαθίσταται νέος εξοπλισμός σε υφιστάμενα κτίρια πολλά χρόνια μετά την ανέγερσή τους. Πρόκειται για σοβαρά ζητήματα τα οποία δεν δύναται να αντιμετωπίσει ο τρέχων κανονισμός.

Κατά τη σύνταξη του ανανεωμένου prEN1998-4:2022 [9] είχαμε την ευτυχή συγκυρία να διαθέτουμε τα αποτελέσματα από δύο ερευνητικά προγράμματα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (SERA-SPIF και SERA-NSFUSE [10]) και ένα στις ΗΠΑ [11], τα οποία παρείχαν τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά των μη δομικών στοιχείων σε συνθήκες εντός και εκτός συντονισμού. Χάρη σε αυτά, υιοθετήθηκε μια ενιαία διαδικασία σχεδιασμού των μη δομικών στοιχείων βιομηχανικών κατασκευών με βασικό παράγοντα διαφοροποίησης το διαθέσιμο επίπεδο γνώσης του μηχανικού. Συγκεκριμένα, εφόσον υπάρχει ακριβής γνώση των περιόδων ταλάντωσης αλλά και της αναμενόμενης υπεραντοχής και πλαστιμότητας της κατασκευής, τότε επιτρέπεται η χρησιμοποίηση της ακριβούς διαδικασίας που προτείνει ο (επίσης ανανεωμένος) prEN1998-1-2:2022 [12] για συμβατικά κτίρια (με μικρές τροποποιήσεις για λόγους αυξημένης αξιοπιστίας). Όταν δεν διατίθεται η απαραίτητη πληροφορία, τότε ο μηχανικός μπορεί να διαλέξει μεταξύ ενός συμβατικού μη πλαστικού σχεδιασμού με ιδιαίτερα αυξημένους συντελεστές μεγέθυνσης (και ασφαλείας) ή να μειώσει τις επιταχύνσεις και δυνάμεις σχεδιασμού με τη χρήση πλαστικών μελών με πιστοποιημένη πλαστιμότητα και υπεραντοχή τα οποία μπορούν να εισαγάγουν την απαιτούμενη ανελαστικότητα στη διαδρομή των φορτίων χωρίς να μειώνουν την ασφάλεια. Σε κάθε περίπτωση, η ελάχιστη επιτυγχανόμενη ασφάλεια είναι αντίστοιχη της πρώτης περίπτωσης, δηλαδή της πλήρους γνώσης των ιδιοτήτων της κατασκευής και του εξοπλισμού, αφαιρώντας κατά το δυνατό την επιρροή της αβεβαιότητας από τη διαστασιολόγηση και δίνοντας στο μηχανικό να επιλέξει το επίπεδο πληροφορίας που θέλει ή μπορεί να συλλέξει. Αναμφισβήτητα πρόκειται για μια καλοδεχούμενη εξέλιξη (αφού και ο γράφων συνέβαλε σε αυτή), όμως θα ήταν πολύ καλύτερα αυτή να είχε προκύψει από μια στοχευμένη δράση παρά από μια σύμπτωση.

### 3.3 Συνδυασμός σεισμικών φορτίων σε αξονοσυμμετρικές κατασκευές

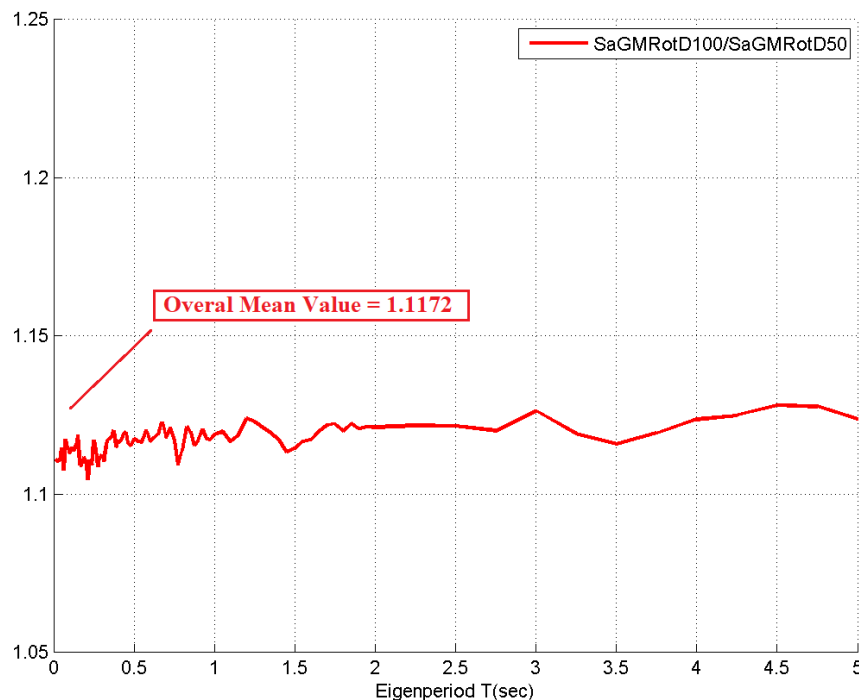
Ο τρέχων EN1998-1:2004 [8], αλλά και ο επερχόμενος prEN1998-1-1:2021 [13] προτείνουν το γνωστό συνδυασμό 100% συν 30% για τις οριζόντιες συνιστώσες X-Y του σεισμού (ή ορθότερα για τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από αυτές) όταν χρησιμοποιείται το σεισμικό φάσμα για να τις αντιπροσωπεύσει (και όχι οι χρονοϊστορίες):

$$\begin{aligned} E_{Edx} & \text{ "+" } 0,30E_{Edy} \\ 0,30E_{Edx} & \text{ "+" } E_{Edy} \end{aligned} \quad (1)$$

Αυτός ο κανόνας προτάθηκε το 1975-77 [14, 15] και προκύπτει πιθανοτικά από το γεγονός ότι σε πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα, αν και υπάρχει σαφής συσχέτιση των δύο οριζόντιων συνιστωσών, υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες απομείωσης: (α) Οι μέγιστες τιμές (φασματικής ή εδαφικής) επιτάχυνσης δε συμβαίνουν ταυτόχρονα στις δύο συνιστώσες και (β) ενώ υπάρχουν άξονες κατά τους οποίους μια σεισμική διέγερση εμφανίζει τις μέγιστες επιταχύνσεις της, αυτοί δε συμπίπτουν εν γένει με τους κύριους άξονες τις κατασκευής [16].

Τα παραπάνω όμως έχουν εκτιμηθεί έχοντας κατά νου κατασκευές με δύο διακριτούς κύριους άξονες στην κάτοψή τους, όπως πχ τετραγωνικές ή ορθογωνικές. Τι συμβαίνει όμως

για αξονοσυμμετρικά δομήματα, όπως πχ κυλινδρικές δεξαμενές ή σιλό, τα οποία είναι κλασικές περιπτώσεις βιομηχανικών κατασκευών; Σε αυτές τις περιπτώσεις, λόγω της απόλυτης συμμετρίας, η χρήση των συνδυασμών της Εξίσωσης (1) οδηγεί σε μια τέμνουσα βάση ίση με  $\sqrt{(1^2+0.3^2)} \approx 1.04$  αυτής που θα υπολογίζαμε αν λαμβάναμε υπόψη μόνο τη μία εκ των δύο οριζόντιων συνιστωσών. Δηλαδή η ύπαρξη δύο συνιστωσών αντί μόνο μίας απλά αυξάνει κατά 4% τη σεισμική δράση. Στην πραγματικότητα όμως, αν και τα μέγιστα των συνιστωσών και πάλι δε θα συμβούν ταυτόχρονα, η αξονική συμμετρία σημαίνει ότι ο χείριστος προσανατολισμός της σεισμικής διέγερσης δε θα είναι η εξαίρεση αλλά ο αποκλειστικός κανόνας. Για να ληφθεί αυτό υπόψη, χρειάζεται να εκτιμηθεί ο συντελεστής μετατροπής του φάσματος από τη διάμεση τιμή του γεωμετρικού μέσου GMRotD50 [17], που αποτελεί τη βάση του prEN1998-1-1:2021 [13], στη μέγιστη τιμή GMRotD100. Ο λόγος αυτών των τιμών διαφέρει με την περίοδο του φάσματος (Σχ. 4), και βάσει της στατιστικής ανάλυσης ενός μεγάλου αριθμού ισχυρών επιταχυνσιογραφημάτων [18] έχει μια μέση τιμή ~1.12 η οποία και έχει πλέον ενσωματωθεί στο prEN1998-4:2022 [9]. Ακόμα μεγαλύτεροι συντελεστές της τάξης του 1.20–1.25 θα μπορούσαν να προκύψουν με μια δυσμενέστερη θεώρηση που δε βασίζεται στο γεωμετρικό μέσο (RotD50), αλλά ελλείψει περισσότερων στοιχείων, θεωρήθηκε ότι δεν θα ήταν εύκολα αποδεκτοί.



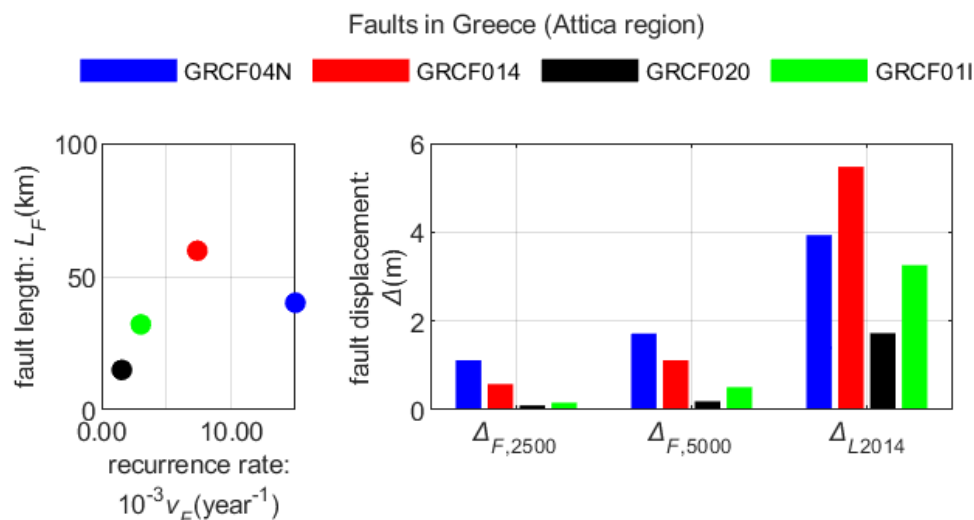
Σχ. 4: Λόγος των φασματικών τιμών SaGMRotD100 προς SaGMRotD50 για το σύννηθες εύρος περιόδων (από [18]).

### 3.4 Μετακινήσεις σχεδιασμού για αγωγούς που διασχίζουν ενεργά ρήγματα

Ο EN1998-4:2006 [7] δεν προσφέρει κάποια οδηγία ως προς το σχεδιασμό αγωγών στο σημείο που διασταυρώνονται με ενεργά ρήγματα. Πρακτικώς επαφίεται στο μηχανικό να επιλέξει πώς θα υπολογίσει τη μετακίνηση σχεδιασμού εντός και εκτός της επιφάνειας του ρήγματος. Για μεγάλης σημασίας αγωγούς και επικίνδυνα ρήγματα, συχνά ζητείται η συνδρομή τεχνικών σεισμολόγων και γεωτεχνικών για την κατάρτιση μιας εξειδικευμένης μελέτης για τη συγκεκριμένη τοποθεσία. Λόγω του κόστους και του χρόνου που απαιτείται,

όμως, σε πολλές περιπτώσεις προτιμάται η χρήση απλοποιημένων προσεγγιστικών σχέσεων για την εκτίμηση της αναμενόμενης μέγιστης μετακίνησης ρήγματος βάσει σεισμολογικών παρατηρήσεων ανά τον κόσμο. Οι πιο γνωστές και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ανάγονται στο 1994 και τους Wells and Coppersmith [19]. Αν και έχουν γίνει νεότερες και πιο εμπειριστατωμένες έρευνες την τελευταία δεκαετία, πχ το 2014 από τον Leonard [20], και έχουν προταθεί νέες και ακριβέστερες σχέσεις οι οποίες δεν είναι ευρύτερα γνωστές στους μηχανικούς, υπάρχει ένα βασικό πρόβλημα που αγνοείται: Η χρήση αυτών των σχέσεων αφορά γεωμετρικά μεγέθη του ρήγματος (μεγάλο ρήγμα = μεγάλη μέγιστη μετακίνηση) χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η σεισμικότητα. Με άλλα λόγια, ένα κανονικό ρήγμα του ίδιου μήκους σε Γερμανία, Ελλάδα και Τουρκία θα έχει την ίδια μέση εκτίμηση μέγιστης μετακίνησης. Στην πραγματικότητα, θα έπρεπε να μας ενδιαφέρει η μετακίνηση σχεδιασμού του ρήγματος με μέση περίοδο επαναφοράς 2500 ή 5000 έτη, εφόσον πρόκειται για σημαντικό αγωγό, και όχι η μέγιστη τιμή, η οποία όντως περιορίζεται μόνο από τα γεωμετρικά μεγέθη του ρήγματος. Σε αυτή την περίπτωση, λογικά θα έπρεπε να περιμένουμε τη μεγαλύτερη μετακίνηση σχεδιασμού στην Τουρκία, κατόπιν στην Ελλάδα και τέλος στη Γερμανία.

Κατά τη σύνταξη του prEN1998-4:2022 [9] έτυχε να υπάρχει διαθέσιμη πρόδρομη έρευνα σε θέματα απλοποιημένης πιθανοτικής εκτίμησης της μετακίνησης ρηγματών η οποία και αξιοποιήθηκε για την κατάρτιση των σχετικών διατάξεων [21]. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους φαίνονται στο Σχ. 5 για τέσσερα ρήγματα της Αττικής, δίνοντας σαφώς μικρότερες μετακινήσεις σχεδιασμού ακόμα και για 5000 έτη περίοδο επαναφοράς από ό,τι δίνουν οι σχέσεις Leonard [20].



Σχ. 5: Για τέσσερα ρήγματα στην Αττική, στα αριστερά, φαίνεται το μήκος ρήγματος έναντι της παραγωγικότητάς του (αριθμός γεγονότων ανά έτος), ενώ στα δεξιά εμφανίζονται οι μετακινήσεις στο μέσο ρήγματος σύμφωνα με τον prEN1998-4:2022 [9] για περιόδους επαναφοράς 2500 έτη ( $\Delta_{F,2500}$ ) και 5000 έτη ( $\Delta_{F,5000}$ ), συγκρινόμενες με τις «άγνωστης σεισμικότητας» εκτιμήσεις του Leonard [20] ( $\Delta_{L2014}$ ) (από [21]).

#### 4. ΠΩΣ ΘΕΛΟΥΜΕ ΝΑ ΓΡΑΦΕΤΑΙ Ο ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ;

Οι Ευρωκώδικες γράφονται από ολιγομελείς ομάδες (5-6 άτομα) αποτελούμενες από ακαδημαϊκούς και επαγγελματίες μηχανικούς. Έκαστο μέλος αποζημιώνεται με ένα ποσό της τάξης των 15,000 – 25,000 ευρώ, αναλόγως της εκτιμώμενης έκτασης του μέρους του

Ευρωκώδικα που αναλαμβάνει. Το ποσό αυτό οφείλει να καλύπτει τα έξοδα για συναντήσεις, εργασία, συγγραφή, διορθώσεις, απαντήσεις σε σχόλια από κράτη-μέλη, υποστηρικτικά έγγραφα, σεμινάρια προβολής και διάχυσης για ένα διάστημα περίπου 4-5 ετών. Πρακτικά οι συμμετέχοντες στις επιτροπές και ομάδες εργασίας προσφέρουν εθελοντική εργασία με μόνο επιπλέον πόρο την επιχείρησή τους ή την ερευνητική τους ομάδα που αφιλοκερδώς συμβάλει.

Εν τέλει, αν μιλάμε για μέρος του κανονισμού για το οποίο διατίθεται εκτεταμένη υποστηρικτική βιβλιογραφία, μπορεί να χρειάζεται απαιτητική εργασία για να κωδικοποιηθεί αλλά τουλάχιστον υπάρχει το απαιτούμενο υπόβαθρο. Ατυχώς, όταν πρόκειται για θέματα βιομηχανικών κατασκευών, τα πράγματα είναι πιο δύσκολα. Σε κάποια θέματα θα βρεθούν οι πληροφορίες (βλέπε τα 3.1 έως 3.4 παραπάνω) σε πολλά άλλα όχι. Οι ικανότητες και η εμπειρία του μηχανικού σίγουρα θα βοηθήσουν στο να αποφεύγει τις κακοτοπιές. Γνωρίζοντας όμως όλα αυτά, εσείς πιστεύετε ότι φταίγανε τα γουρουνάκια; Η μήπως απλά το ένα ήταν τυχερό και τα άλλα άτυχα στην εφαρμογή του κανονισμού;

## 5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υποστηρίχθηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της Δράσης «2<sup>η</sup> 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”).

## 6. REFERENCES

- [1] CETIN K.O., BRAY J.D., FROST J.D., HORTACSU A., MIRANDA E, MOSS R.E.S and STEWART J.P. “February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: Report on Geoscience and Engineering Impacts”, *GEER Association Report 082*, 2023. URL: <https://10.18118/G6PM34>
- [2] CEN. “Steel static storage systems - Adjustable pallet racking systems - Principles for seismic design.” EN 16681:2016, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2016
- [3] CEN. “Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings.” EN1993-1-1:2005, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2005.
- [4] TSARPALIS D., VAMVATSIKOS D., DELLADONNA F., FABINI M., HERMANEK J., MARGOTAN P.D., SESANA S., VANTUSSO E., VAYAS I. “Macro-characteristics and taxonomy of steel racking systems for seismic vulnerability assessment”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 20, 2022, pp. 2695-2718. DOI: 10.1007/s10518-022-01326-x
- [5] KAZANTZI A.K., KARAFERIS N.D., MELISSIANOS V.E., VAMVATSIKOS D. “Acceleration-sensitive ancillary elements in industrial facilities: alternative seismic design approaches in the new Eurocode”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2023, DOI: 10.1007/s10518-023-01656-4
- [6] BUTENWEG C., BURSI O.S., PAOLACCI F., MARINKOVIĆ M., LANESE I., NARDIN C., QUINCI G. “Seismic performance of an industrial multi-storey frame structure with process equipment subjected to shake table testing”, *Engineering Structures*, Vol. 243, 2021, 112681.



- [7] CEN. “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 4: Silos, tanks and pipelines”, EN 1998-4:2006, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2006.
- [8] CEN. “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings”, EN 1998-1:2004, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2004.
- [9] CEN. “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 4: Silos, tanks and pipelines, towers, masts and chimneys”, prEN 1998-4:2022, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2022.
- [10] SERA. “Deliverable D2.17 - Final compilation of technical reports”, *SERA Consortium*, URL:[http://www.sera-eu.org/export/sites/sera/home/.galleries/Deliverables/SERA\\_D2.17\\_Technical-Reports\\_final.pdf](http://www.sera-eu.org/export/sites/sera/home/.galleries/Deliverables/SERA_D2.17_Technical-Reports_final.pdf)
- [11] NIST. “Recommendations for improved seismic performance of nonstructural components”, *Report No. NIST GCR 18-917-43*, prepared by the Applied Technology Council for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [12] CEN. “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 1-2: Rules for new buildings”, prEN 1998-1-2:2022, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2022.
- [13] CEN. “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 1-1: General rules and seismic action”, prEN 1998-1-1:2021, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2021.
- [14] NEWMARK NM. “Seismic design criteria for structures and facilities, Trans-Alaska pipeline system”, *Proceedings of the US National Conference on Earthquake Engineering*, 1975, pp. 94-103.
- [15] ROSENBLUETH E., CONTRERAS H. “Approximate design for multicomponent earthquakes”, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 103, No. 5, 1977, pp. 881-893.
- [16] MENUN C., DER KIUREGHIAN A. “A replacement for the 30%, 40%, and SRSS rules for multicomponent seismic analysis”, *Earthquake Spectra*, Vol. 14, No. 1, 1998, pp.153-163.
- [17] BOORE D.M., WATSON-LAMPREY J., ABRAHAMSON N.A. “Orientation-independent measures of ground motion”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 4A, 2006, pp.1502-1511.
- [18] KARAFERIS N., VAMVATSIKOS D. “Seismic action combination rules for the design of azimuth-independent structures”, *Proceedings of the 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2021)*, Athens, Greece, 2021. DOI: 10.7712/120121.8854.18598
- [19] WELLS D.L., COPPERSMITH K.J. “New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacements.” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, 1994, pp. 974–1002. DOI: 10.1785/BSSA0840040974
- [20] LEONARD M. “Self-consistent earthquake fault-scaling relations: Update and extension to stable continental strike-slip faults”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 6, 2014, pp. 2953–2965. DOI: 10.1785/0120140087
- [21] MELISSIANOS V.E., VAMVATSIKOS D., DANCIU L., BASILI R. (2023). Design fault displacement for lifelines at fault crossings: The code-based approach for Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering* (in review).

## **INDUSTRIAL STRUCTURE DESIGN AT THE EDGE OF THE CODE: A TRUE STORY OF THREE LITTLE PIGS**

**Dimitrios Vamvatsikos**

*School of Civil Engineering*

*National Technical University of Athens, Greece*

e-mail: [divamva@mail.ntua.gr](mailto:divamva@mail.ntua.gr)

Three little pigs designed three low-ductility industrial buildings for agricultural usage. Two collapsed under a known extreme hazard. Fortunately, there was no loss of life, but two structures and two livelihoods were destroyed. Was the subpar straw and wood material to blame? Were the designers to be held accountable? History seems to have concluded thus. On the contrary, our recent investigations conclusively show that it was only a case of honest and well-meaning engineers, who were betrayed by an honest and well-meaning design code. They were misled to place their trust on a thought-up  $q$ -factor of 1.5 to 2.0 for industrial structure design. This factor was introduced into the code without proper verification, and it could not provide an adequate safety margin for collapse of low-ductility systems under extreme loads. Two, admittedly swine, engineers were framed by the powers that be. Follow us on the journey to uncover one of the greatest misdeeds of history that is still being taught to our children.