

Απεικόνιση Βλαβών, Κόστους και Χρονοδιαγράμματος Επισκευών για τη Μετασεισμική Αποκατάσταση Κτιρίων Visualizing Damage, Cost and Repair Scheduling for Post- Earthquake Building Rehabilitation

Δημήτριος ΒΑΜΒΑΤΣΙΚΟΣ¹, Συμεών ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ², Χαράλαμπος ΓΕΩΡΓΙΟΥ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Παρουσιάζεται μεθοδολογία για την αυτόματη και ολοκληρωμένη εκτίμηση σεισμικών βλαβών, τον υπολογισμό του κόστους, τον προγραμματισμό των εργασιών μετασεισμικής αποκατάστασης κτιρίου και την τρισδιάστατη απεικόνιση τους. Η μέθοδος βασίζεται στην διασύνδεση εργαλείων διαθέσιμων στον κλάδο μηχανικής, όπως σχεσιακές βάσεις δεδομένων και εργαλεία διαχείρισης έργου, με το πλαίσιο εκτίμησης σεισμικών βλαβών που έχει αναπτυχθεί από το Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Η μέθοδος επιτρέπει την αυτοματοποιημένη απεικόνιση των βλαβών, του κόστους αποκατάστασης ανά στοιχείο, όροφο και κτίριο και το προτεινόμενο πρόγραμμα εργασιών για την αποκατάσταση των ζημιών για δεδομένο σεισμικό γεγονός. Προσφέρεται συνεπώς η δυνατότητα σε μηχανικούς και κατασκευαστές να δημιουργήσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη σεισμική συμπεριφορά ενός κτιρίου η οποία γίνεται εύκολα κατανοητή από μη μηχανικούς πελάτες ή υπεύθυνους.

ABSTRACT : A methodology is presented for integrated and automated damage assessment, cost estimating, scheduling and 3D visualization for post-earthquake building rehabilitation. The methodology relies on the integration of tools currently-available to the Architectural, Engineering and Construction industry such as relational databases and project management tools with the framework developed by the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) for post-earthquake damage assessment, to automate the generation of damage-assessment visualizations, cost estimation and schedule-of-work sequences per element, story or building for a given earthquake scenario. Thus, engineers and constructors can develop a comprehensive view of the structural performance of a building that can be easily communicated to non-engineer clients.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη σεισμική μηχανική έχουν φέρει μια επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο κατανοούμε τα κτίρια και τη συμπεριφορά τους. Η σεισμική μηχανική βάσει επιτελεσματικότητας έχει αρχίσει να καθιερώνεται και οι μελέτες σιγά-σιγά απομακρύνονται από την κλασική σχεδίαση απλής ικανοποίησης του κανονισμού (ένα μέγεθος για όλες τις

¹ Λέκτορας, Τμήμα Πολ. Μηχ. και Μηχ. Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: divamva@ucy.ac.cy

² Επ. Καθηγητής, Τμήμα Πολ. Μηχ. και Μηχ. Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: schristo@ucy.ac.cy

³ Μετ. Φοιτητής, Τμήμα Πολ. Μηχ. και Μηχ. Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: ce03qc1@ucy.ac.cy

ανάγκες) κατευθυνόμενες προς τη σχεδίαση με στόχο τον πελάτη και τις ανάγκες του. Ο ιδιοκτήτης κάθε κτιρίου δύναται πλέον να αποφασίζει για την επιθυμητή επιτελεστικότητα σε κάθε επίπεδο έντασης (και συνεπαγόμενης σπανιότητας) του σεισμού.

Η επικοινωνία, όμως, μεταξύ πελάτη και μηχανικού παραμένει προβληματική. Μπορεί να διαθέτουμε ισχυρές μεθόδους ανάλυσης καθώς και προγράμματα για την εφαρμογή αυτών σε ακριβή προσομοιώματα των κατασκευών, τα λεπτομερή αποτελέσματα που προκύπτουν όμως για κάθε στοιχείο (π.χ. πλαστικές στροφές των διατομών ή μετατοπίσεις ορόφων) ελάχιστο νόημα έχουν για τους μη μηχανικούς ιδιοκτήτες. Πρόσφατες προσπάθειες να εκφραστεί η συμπεριφορά μιας κατασκευής σε πιο κατανοητούς όρους, όπως το κόστος μετασεισμικής αποκατάστασης, ο αριθμός των θυμάτων και ο χρόνος που θα μείνει το κτίριο εκτός λειτουργίας (π.χ. Miranda 2003, Goulet 2007), έχουν εμφανώς βελτιώσει τις δυνατότητες επικοινωνίας. Ωστόσο εξακολουθεί να λείπει ένας τρόπος απεικόνισης του τι πραγματικά θα συμβεί σε ένα κτίριο, καθώς τα ίδια συνολικά νούμερα κόστους μπορούν να σημαίνουν πολύ διαφορετικά πράγματα για το ίδιο κτίριο. Λείπει δηλαδή κάτι ενδιάμεσο που θα δώσει λύσεις μεταξύ της πλήρους εικόνας για μηχανικούς (ροπές, τέμνουσες, μετατοπίσεις) και της συνοπτικής εικόνας των λίγων αριθμών (κόστος, θύματα, χρόνος αποκατάστασης)

Η πρότασή μας είναι να αξιοποιηθούν τεχνικές για 3D απεικόνιση των βλαβών, του κόστους και του χρόνου επισκευής για κάθε στοιχείο και για όλο το κτίριο. Πρόκειται για εργαλεία που επιτρέπουν καλύτερη και πληρέστερη επικοινωνία μεταξύ αρχιτεκτόνων, μελετητών και πελατών ώστε έτσι ώστε να αποφεύγονται σφάλματα π.χ. λόγω χωρικών περιορισμών (Griffis 2000). Με την προσθήκη της χρονικής διάστασης για 4D απεικόνιση γίνεται δυνατή η προσομοίωση και προσεκτική μελέτη των εργασιών αποκατάστασης μέσω της ολοκλήρωσης της τρισδιάστατης γεωμετρίας με το χρονικό προγραμματισμό. Χρησιμοποιώντας το τετραώροφο κτίριο οπλισμένου σκυροδέματος που φαίνεται στο Σχήμα 1 θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα εφαρμογής των τεχνικών αυτών σε ένα σύγχρονο κτίριο.



Σχήμα 1. Τρισδιάστατο αρχιτεκτονικό μοντέλο της τετραώροφης κατασκευής.

ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η σεισμική μηχανική βάσει επιτελεστικότητας είναι η φυσική εξέλιξη της διαδικασίας σχεδιασμού κατασκευών ώστε να συμπεριλάβει τις αυξανόμενες ανάγκες για κτίρια που ικανοποιούν τις ιδιαίτερες απαιτήσεις του εκάστοτε ιδιοκτήτη. Επιτρέπει το σχεδιασμό κατασκευών που μπορούν να αντέξουν σε λιγότερο ή περισσότερο συχνούς σεισμούς παρέχοντας την επιθυμητή επιτελεστικότητα, για παράδειγμα παραμένοντας πλήρως λειτουργικές για χαμηλής εντάσεως συνήθη γεγονότα, υφιστάμενες χαμηλές βλάβες για λιγότερο συχνά γεγονότα ενώ απαιτούν σοβαρές επισκευές ή και αντικατάσταση για τους ισχυρότερους σεισμούς, χωρίς όμως να καταρρέουν. Διάφοροι κανονισμοί που αναγνωρίζουν αυτές τις ανάγκες έχουν παρουσιαστεί προσφάτως, όπως για παράδειγμα οι SAC/FEMA-350/351, FEMA-356 και ATC-40. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η μεθοδολογία του PEER Center (Cornell 2000) που παρέχει μια πλήρη εκτίμηση της κτιριακής συμπεριφοράς για κάθε επίπεδο σεισμικής έντασης και για οποιαδήποτε στάθμη επιτελεστικότητας μέσω της ολοκλήρωσης της σεισμικής επικινδυνότητας και των αποτελεσμάτων της δομικής ανάλυσης με δεδομένα βλαβών και κόστους για να παραχθούν ρεαλιστικές εκτιμήσεις των επιπτώσεων που συνεπάγεται ένας σεισμός.

Αυτό που λείπει είναι ένας τρόπος να απεικονιστούν αυτά τα αποτελέσματα επί της τρισδιάστατης κατασκευής χρησιμοποιώντας υπάρχον επαγγελματικό λογισμικό ως μία διοδο επικοινωνίας μεταξύ πελάτη και μηχανικού. Οι ιδιοκτήτες σπανίως καταλαβαίνουν την ορολογία που χρησιμοποιείται από μηχανικούς και δεν μπορούν να αξιολογήσουν τις διαφορές μεταξύ των εναλλακτικών σχεδιάσεων και την πραγματική τους απόδοση σε σεισμό. Η βελτίωση της επιτελεστικότητας τυπικά συνεπάγεται την επένδυση μεγαλύτερου αρχικού κεφαλαίου για την κατασκευή το οποίο αναμένεται να αποπληρωθεί μελλοντικά από τις μειωμένες βλάβες που θα έχει το κτίριο κατά τη διάρκεια ζωής του. Επομένως, για να διευκολυνθεί η διάθεση των απαραίτητων κεφαλαίων απαιτείται η ορθή επικοινωνία και κατανόηση των συνεπειών κάθε απόφασης που λαμβάνεται κατά το σχεδιασμό.

Δυστυχώς η τρέχουσα πρακτική περιορίζει τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ ιδιοκτητών και μηχανικών σε αριθμούς που ελάχιστα σημαίνουν για μη μηχανικούς. Ακόμα και όταν γίνεται η προσπάθεια να προσεγγιστούν το πραγματικό κόστος και ο χρόνος μετασεισμικής αποκατάστασης, συνήθως υπάρχει μια μεγάλη αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις της τάξεως του 100% ή και περισσότερο. Επιπρόσθετα, ακόμα και απλές εκτιμήσεις αυτών των μεταβλητών δεν καταφέρνουν να μεταφέρουν ένα βασικό στοιχείο της σχεδίασης βάσει επιτελεστικότητας, την πραγματική λειτουργικότητα της κατασκευής μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Η επιτελεστικότητα εμπεριέχει τις βλάβες σε δομικά στοιχεία (δοκούς, υποστυλώματα), σε μη δομικά στοιχεία (αγωγούς ύδρευσης, θέρμανσης, πόρτες, τοιχοπλήρωση) και στα περιεχόμενα του κτιρίου. Χωρίς την κατάλληλη δυνατότητα απεικόνισης, αυτά τα δεδομένα παραμένουν απλοί αριθμοί. Για παράδειγμα, μια μικρή ποσότητα από χαλάσματα που θα πέσουν σε ένα διάδρομο νοσοκομείου μπορεί να τον καταστήσουν αδιάβατο σε ασθενείς και να αχρηστεύσουν μια σειρά από δωμάτια. Τέτοιου είδους συνέπειες δεν είναι εύκολο να αποκρυπτογραφηθούν από τα αποτελέσματα οποιουδήποτε προγράμματος δομικής ανάλυσης, πόσο μάλλον να εξηγηθούν στον πελάτη.

Η διαθεσιμότητα των δεδομένων μιας ανάλυσης βάσει επιτελεστικότητας στο τρισδιάστατο χώρο βελτιώνει σημαντικά την κατανόησή τους. Πελάτες και σχεδιαστές μπορούν πλέον να αναγνωρίσουν τους απρόσιτους χώρους, να διερευνήσουν πιθανές διαδρομές πρόσβασης για τα συνεργεία και τα υλικά και εν γένει να κατανοήσουν ουσιαστικά τη μετασεισμική ικανότητα της κατασκευής τους να λειτουργεί κατά το επιθυμητό. Για να επιτύχουμε αυτό το σκοπό προτείνουμε να συνδυάσουμε τις τρέχουσες μεθόδους σεισμικής μηχανικής βάσει επιτελεστικότητας με ήδη υπάρχουσες τεχνικές απεικόνισης σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που θα μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε τεχνικό γραφείο.

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΚΑΙ 3Δ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

Η χρήση εξελιγμένων τεχνικών ανάλυσης, όπως η Ανάλυση Δυναμικής Αντίστασης (ΑΔΑ, Vamvatsikos 2002), στα πλαίσια της σεισμικής μηχανικής βάσει επιτελεστικότητας μπορεί να συνδυαστεί με την τεχνική της Τρωτότητας Βάσει Δομών (ΤΒΔ, Porter 2001) ώστε να επιτρέψει τον υπολογισμό μεγεθών κόστους και χρόνου αποκατάστασης του κτιρίου. Η ΤΒΔ είναι ένα πλαίσιο για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας και επιτελεστικότητας των κατασκευών με καθημερινούς και κατανοητούς όρους. Όπως και άλλες μέθοδοι που έχουν προταθεί (π.χ. Miranda 2003) η ΤΒΔ χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα της ανάλυσης για κάθε «δομή» του κτιρίου σε συνδυασμό με την αντίστοιχη καμπύλη τρωτότητας για να εκτιμήσει την πιθανότητα η δομή να υποστεί ζημιά που θα απαιτήσει επισκευή ή αντικατάσταση. Οι «δομές» περιλαμβάνουν δομικά, μη δομικά στοιχεία καθώς και περιεχόμενα του κτιρίου. Η προκύπτουσα πιθανοτική κατανομή των ζημιών χρησιμοποιείται για την προσομοίωση πιθανών σεναρίων βλαβών και την εκτίμηση του κόστους και της διάρκειας εργασιών αποκατάστασης για κάθε δομή που αποτελεί το κτίριο.

Οι επιλογή των δομών βασίζεται είτε σε κατά περίπτωση διαχωρισμό των στοιχείων και των εργασιών είτε σε καθιερωμένα πρωτόκολλα ταξινόμησης εργασιών όπως π.χ. του Construction Specifications Institute (CSI) ή του Υπουργείου ΠΕΧΩΔΕ. Η υποδιαίρεση των εργασιών μπορεί να είναι όσο λεπτομερής θέλουμε, όμως είναι προς όφελός μας να παραμένουμε κοντά στα καθιερωμένα πρότυπα κοστολόγησης εργασιών σε κάθε χώρα καθώς αυτά είναι ευρέως διαθέσιμα και ανανεώνονται τακτικά.

Η κατάσταση βλάβης κάθε δομής θεωρείται ότι εξαρτάται από ένα συγκεκριμένο μέτρο απόκριση της κατασκευής. Για παράδειγμα, οι τοίχοι πλήρωσης εξαρτώνται από τη μέγιστη ανηγμένη σχετική μετατόπιση του ορόφου τους, οι δοκοί και τα υποστυλώματα από τις μέγιστες πλαστικές στροφές των άκρων τους ενώ τα περιεχόμενα του κτιρίου από τη μέγιστη επιτάχυνση των ορόφων. Όταν το κτίριο μπορεί να διαιρεθεί σε περισσότερες της μίας λειτουργικές μονάδες που μπορούν να επιδιορθωθούν αυτόνομα, δηλαδή κάθε μία μπορεί να λειτουργήσει ενώ συνεχίζονται οι επισκευές σε άλλη μονάδα, αυτό οφείλει να ληφθεί υπόψη (π.χ. για χαμηλές καταστάσεις βλάβεις, ένας όροφος μπορεί να λειτουργεί ενώ οι υπόλοιποι επισκευάζονται). Σε κάθε περίπτωση, το ολικό κόστος C για την αποκατάσταση της δομής είναι συνδυασμός του κόστους επισκευής C_R και του κόστους απώλειας χρήσης C_U (π.χ. εισόδημα από ενοίκια). Οι Porter et al (2001) προτείνουν

$$C_R = \sum_j \sum_d F_{C,j,d}^{-1}(u) N_{j,d} \quad (1)$$

$$C_U = \sum_m R_m U_m \quad (2)$$

όπου

j = τύπος δομής

d = κατάσταση βλάβης

$C_{j,d}$ = το κόστος για να επισκευαστεί η δομή τύπου j όταν είναι σε κατάσταση βλάβης d

$F^1_{C_{j,d}}(u)$ = η τιμή του κόστους επιδιόρθωσης $C_{j,d}$ με πιθανότητα υπέρβασης u

$N_{j,d}$ = ο αριθμός των δομών τύπου j σε κατάσταση βλάβης d

R_m = χρόνος επισκευής μονάδας m

U_m = ημερήσια αποζημίωση ενοικίασης για μονάδα m

Επίσης ορίζουν το χρόνο για την επισκευή κάθε λειτουργικής μονάδας, R_m , μετρούμενης σε ημέρες από το σεισμό, βασισμένη στις πραγματικές εργάσιμες μέρες R_m^* , συν τα σαββατοκύριακα και την καθυστέρηση έναρξης εργασιών. Λαμβάνεται ιδιαίτερως υπόψη ο αριθμός των διαφορετικών συνεργείων που πρέπει να εργαστούν για την αποκατάσταση, θεωρώντας ότι μόνο ένα συνεργείο εργάζεται κάθε φορά σε μια μονάδα:

$$R_m^* = \sum_j R_{j,d,m} + n_m R_T + R_{T0,m} \quad (3)$$

όπου

$R_{j,d,m}$ = χρόνος αποκατάστασης όλων των δομών τύπου j στη μονάδα m από κατάσταση d

R_T = καθυστέρηση αλλαγής συνεργείου (π.χ. από συνεργείο επιχρισμάτων σε βαφής)

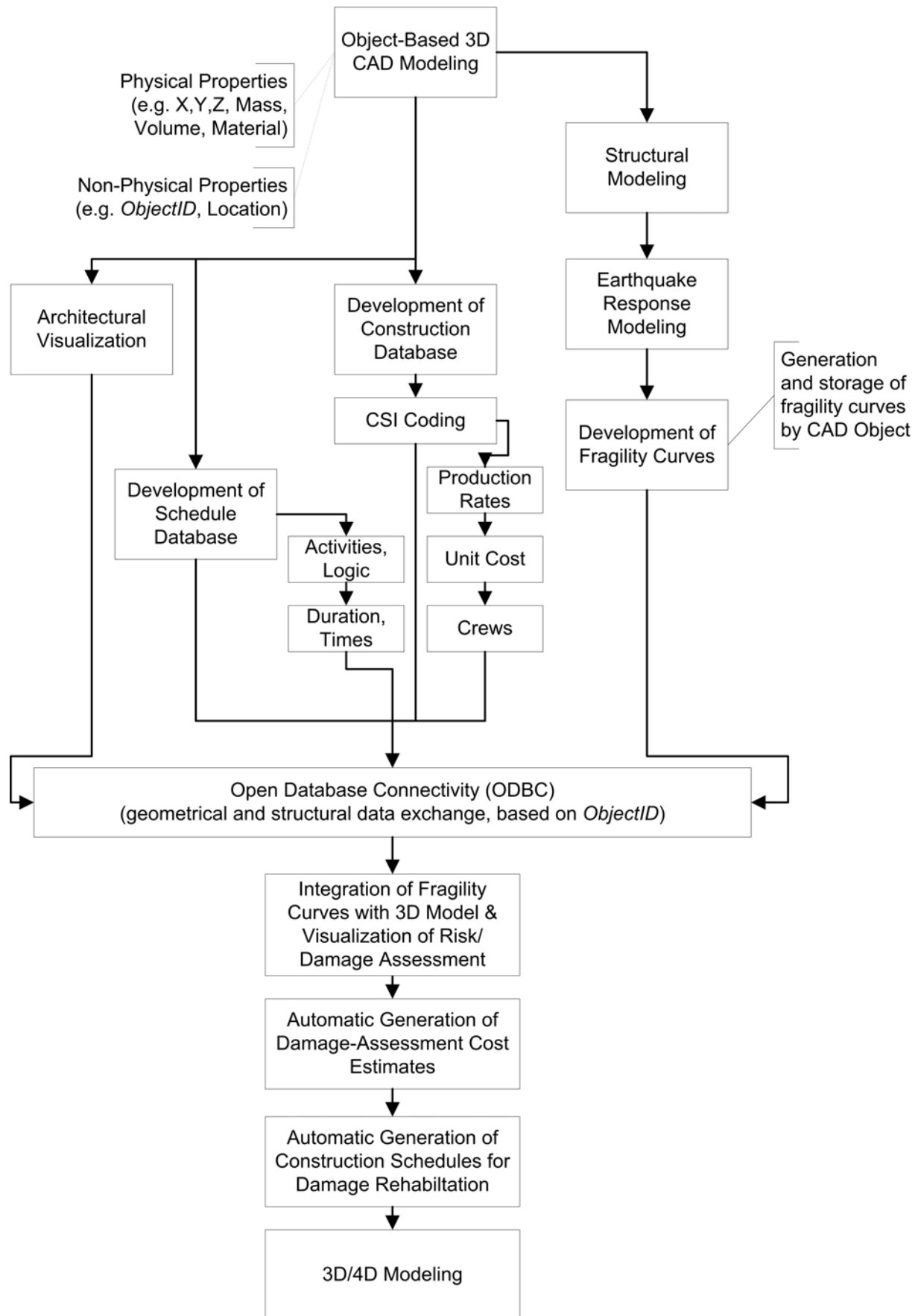
$R_{T0,m}$ = αρχική καθυστέρηση πριν την έναρξη εργασιών στη μονάδα m

n_m = αριθμός συνεργείων που απαιτούνται για την επιδιόρθωση της μονάδας m

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

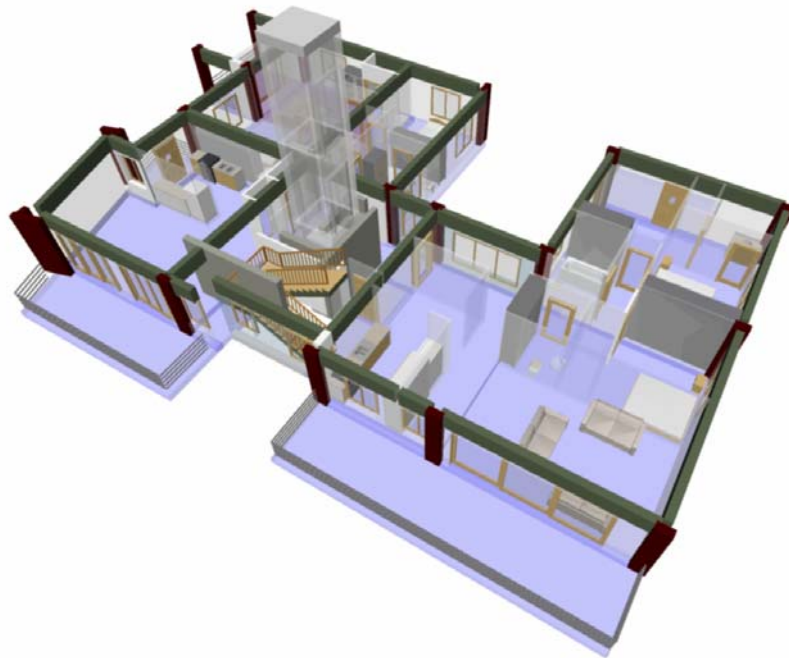
Η μεθοδολογία του PEER και η μέθοδος ΤΒΔ διασυνδέονται με το Μοντέλο Πληροφορίας Κτιρίου (ΜΠΚ) και σχεσιακές βάσεις δεδομένων για τη δημιουργία ενός πλαισίου για την απεικόνιση όλων των ενεργειών για μετασεισμική αποκατάσταση του κτιρίου: εκτίμηση βλαβών, κόστους και προγραμματισμός εργασιών. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.

Αρχικά δημιουργείται ένα 3D προσομοίωμα βάσει αντικειμένων σύμφωνα με το πρότυπο ΜΠΚ (Σχήμα 1). Πολλά σύγχρονα αρχιτεκτονικά προγράμματα παρέχουν αυτόματα αυτή τη δυνατότητα. Το προσομοίωμα περιέχει και τα δομικά στοιχεία (δοκούς, υποστυλώματα, πλάκες, κλπ) και τα μη δομικά (τοιχοπλήρωση, αγωγούς, επίπλωση, κλπ) και χρησιμοποιείται ως αποθήκη πληροφορίας αλλά και ως εργαλείο απεικόνισης. Το αρχιτεκτονικό προσομοίωμα, για παράδειγμα το τετραώροφο κτίριο που φαίνεται στο Σχήμα 1, χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του στατικού προσομοιώματος αλλά και τη σύνταξη της λίστας των στοιχείων – δομών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ποσοτήτων και την εκτίμηση του κόστους επισκευής κάθε στοιχείου.



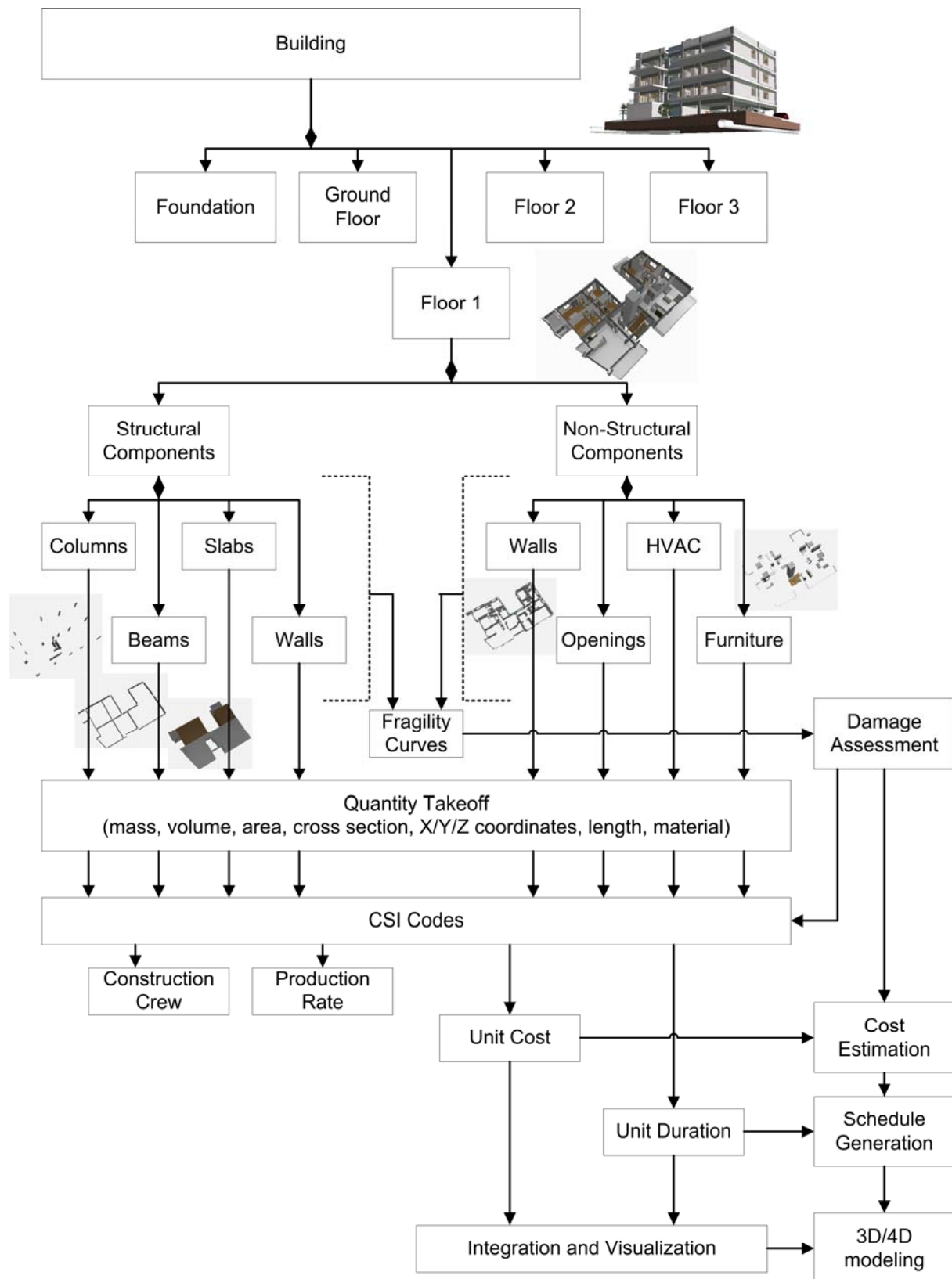
Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής της ολοκληρωμένης αυτόματης μετασεισμικής εκτίμησης ζημιών και 3Δ/4Δ απεικόνισης κτιρίων.

Μια σχεσιακή βάση δεδομένων αναπτύσσεται παράλληλα με το τρισδιάστατο μοντέλο, η οποία περιέχει τις δομές από τις οποίες αποτελείται η κατασκευή, τους κώδικες εργασιών CSI, το κόστος μονάδας και την ταχύτητα επισκευής. Η βάση δεδομένων παρέχει δεσμούς μεταξύ των αντικειμένων ΜΠΚ και των υπολοίπων δεδομένων. Για παράδειγμα, κάθε αντικείμενο ΜΠΚ έχει ένα μοναδικό κωδικό ο οποίος συνδέεται, μέσω ενός πίνακα συσχέτισης, με ένα κώδικα CSI και μέσω αυτού με ένα συνεργείο επισκευής. Οι δεσμοί μπορεί να είναι τύπου «πολλά προς ένα» ή «ένα προς πολλά» επιτρέποντας στον χρήστη να συνδέσει πολλά αντικείμενα ΜΠΚ με έναν ή περισσότερους κωδικούς CSI κατά τα απαιτούμενα. Για παράδειγμα, ένα αντικείμενο «υποστύλωμα οπλισμένου σκυροδέματος» μπορεί να συσχετιστεί με τους κώδικες CSI για «καλούπι», «όπλιση», «σκυροδέτηση», «μόνωση» και «βαφή». Τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου (μάζα, επιφάνεια, μήκος, όγκος) σε συνδυασμό με τις ταχύτητες (επανα)κατασκευής από τα ανάλογα άρθρα του CSI (ή του ΥΠΕΧΩΔΕ) καθορίζουν τη διάρκεια της αντίστοιχης εργασίας αποκατάστασης. Δεδομένου ότι σκοπός μας είναι ο υπολογισμός κατά το δυνατό ακριβούς κόστους επιδιόρθωσης και διάρκειας εργασιών, το τρισδιάστατο μοντέλο περιλαμβάνει και τα περιεχόμενα του κτιρίου (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Τρισδιάστατη απεικόνιση των δομικών και μη δομικών στοιχείων και των περιεχομένων του 1^{ου} όροφου του κτιρίου.

Η σχεσιακή βάση δεδομένων περιέχει επίσης δεδομένα ιεράρχησης των εργασιών αποκατάστασης. Η κάθε εργασία περιλαμβάνει σχέσεις με άλλες όμορες εργασίες και ακολουθεί την τυπική δομή CSI, όπου εργασίες με χαμηλότερο κωδικό CSI προηγούνται εργασιών με υψηλότερο κωδικό CSI. Η διάρκεια κάθε εργασίας υπολογίζεται με βάση τα αντικείμενα ΜΠΚ που περιέχονται στην εργασία και την ταχύτητα παραγωγής του συνεργείου που την εκτελεί σύμφωνα με τους κώδικες CSI για κάθε αντικείμενο (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Διάγραμμα της ολοκλήρωσης του μοντέλου πληροφοριών κτιρίου με τη στατική ανάλυση, το κόστος και τον προγραμματισμό των εργασιών επισκευής σε 4D περιβάλλον.

Το 3D προσομοίωμα και οι πληροφορίες ΜΠΚ (ιδιότητες των αντικειμένων) χρησιμοποιούνται στην ανάλυση της κατασκευής και την εκτίμηση της απόκρισης σε σεισμικά φορτία χρησιμοποιώντας προκαθορισμένες βιβλιοθήκες καμπυλών τρωτότητας για κάθε δομή. Όταν εκτελεστεί η δομική ανάλυση υπολογίζεται το κατάλληλο μέτρο απόκρισης για κάθε δομή το οποίο ανταποκρίνεται απευθείας σε μια καμπύλη τρωτότητας. Αυτές οι καμπύλες αποτελούν την πιθανοτική έκφραση της αντοχής κάθε στοιχείου και αντιστοιχίζουν τη δομική απόκριση με διάφορα επίπεδα βλάβης, παράγοντας την πιθανότητα η κάθε δομή να φτάσει ή να υπερβεί ένα επίπεδο ζημιάς. Οι στάθμες αυτές μπορούν να οριστούν με πολλούς τρόπους αλλά συνήθως χρησιμοποιούνται μόνο τέσσερις: «καθόλου ή ελάχιστη», «μέτρια», «σοβαρή» και «πλήρης» απώλεια.

Η αντιστοίχιση των καμπυλών τρωτότητας με τα αντικείμενα ΜΠΚ και τους κωδικούς CSI παράγει την προτεινόμενη ενέργεια (απαντώντας στο δίλημμα «επισκευή ή αντικατάσταση»), το κόστος επισκευής και την αντίστοιχη διάρκεια. Οι πληροφορίες αυτές επιστρέφονται στο 3D προσομοίωμα μέσω ενός καναλιού πληροφορίας που μεταφέρει τις αντίστοιχες πληροφορίες για κάθε αντικείμενο του ΜΠΚ και τις επισυνάπτει σε αυτά ως νέες ιδιότητες. Για παράδειγμα, ένα αντικείμενο τοίχου, πέραν των φυσικών ιδιοτήτων του (επιφάνεια, υλικό κλπ) διαθέτει πλέον και πληροφορίες για τις ζημιές που έπαθε και το πιθανότερο κόστος του. Αυτό επιτρέπει την τρισδιάστατη απεικόνιση των επιθυμητών μεταβλητών με κατάλληλο χρωματισμό των 3D αντικειμένων σύμφωνα με τη μετασεισμική κατάστασή τους.

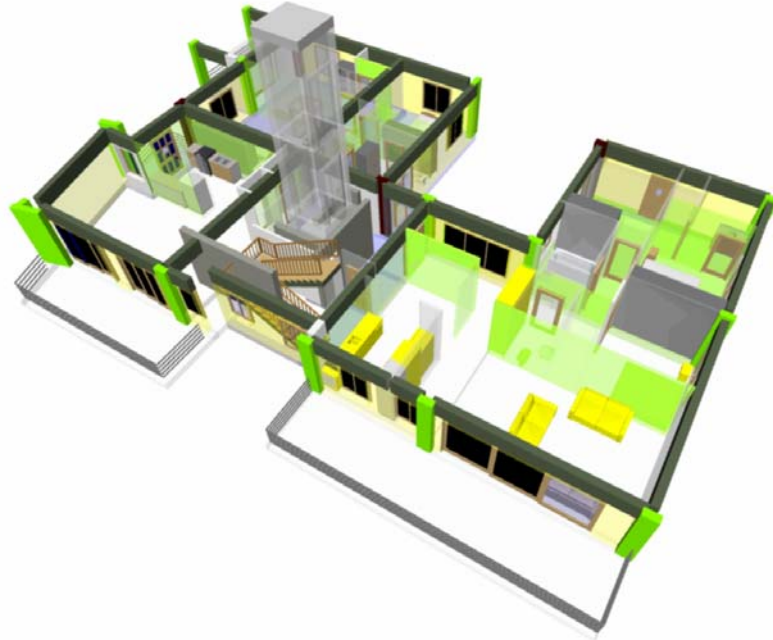
Στο παράδειγμα του κτιρίου που εξετάζουμε οι μεταβλητές που απεικονίζονται είναι: (α) η κατάσταση βλάβης, (β) το κόστος και (γ) ο χρόνος αποκατάστασης. Το μέτρο βλάβης μπορεί να είναι είτε μια συνεχής μεταβλητή στο διάστημα $[0,1]$ (όπου «0» σημαίνει καμία βλάβη και «1» πλήρη απώλεια), είτε μια διακριτή μεταβλητή (συνήθως με τις τέσσερις στάθμες που παρουσιάστηκαν παραπάνω) που αντιστοιχεί σε κατάλληλο χρώμα:

- Πράσινο: ελάχιστη ή καθόλου ζημιά, καμία ενέργεια δεν απαιτείται
- Κίτρινο: ελαφρές ζημιές, επισκευάσιμο μέλος
- Κόκκινο: σοβαρές ζημιές, χρειάζεται αντικατάσταση (επισκευές είναι αντικοινομικές)
- Μαύρο: πλήρης απώλεια.

Το κόστος και ο χρόνος εργασιών παρουσιάζονται ως συνεχείς μεταβλητές και χρωματίζονται όπως σε ένα τυπικό γράφημα ισοϋψών καμπυλών (contour plot).

Η εξεταζόμενη περίπτωση αντιστοιχεί στην αναμενόμενη μετασεισμική κατάσταση του τετραώροφου κτιρίου για ένα σεισμό σε στάθμη Ασφάλειας Ζωής (Life Safety). Υπάρχουν μικρές δομικές ζημιές σε όλους τους όροφος του κτιρίου με εξαίρεση τον πρώτο (δεύτερος από τέσσερις) όπου είναι κάπως σοβαρότερες. Ο ικανοτικός σχεδιασμός των κόμβων έχει αποτρέψει την εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα, ενώ οι δοκοί εμφανίζουν κάποια μικρή πλαστικοποίηση και στις δύο κύριες διευθύνσεις της κατασκευής. Ωστόσο έχουμε σοβαρές ζημιές σε όλα τα παράθυρα και τις πόρτες (έως και πλήρη απώλεια), ενώ οι εξωτερικές και εσωτερικές τοιχοπληρώσεις, ιδιαίτερα στον πρώτο όροφο έχουν υποστεί εκτεταμένη ρωγμάτωση. Τέλος, τα περιεχόμενα του κτιρίου έχουν υποστεί έως και 30% απώλειες λόγω των μέτριων επιταχύνσεων των ορόφων. Τα αποτελέσματα της

τρισεπίστας απεικόνισής για τον πρῶτο ὄροφο του κτιρίου (δεύτερος ἀπὸ τους τέσσερις) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5, ὅπου μπορούμε με μια ματιά να διαπιστώσουμε την πραγματική κατάσταση της κατασκευής.



Σχήμα 5. Τρισεπίστας απεικόνισής των πιθανότερων σεισμικών βλαβών στον 1^ο ὄροφο του κτιρίου με κατάλληλο χρωματισμό δομικών και μη στοιχείων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη προσέγγισής για την εκτίμησή και απεικόνισής των μετασεισμικών βλαβών κτιρίων δια της ενοποίησης του πληροφοριακού μοντέλου του κτιρίου με σχεσιακές βάσεις δεδομένων, τρισεπίστας προσομοιώματα και πιθανοτικές μεθόδους εκτίμησής κόστους και βλαβών. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για τον τεχνικό κόσμο καθώς επιτρέπει την αυτοματοποίηση των αναλύσεων κόστους και προγραμματισμού εργασιών αποκατάστασης και την εμφάνισή τους σε τρισεπίστας γραφήματα για μια ολοκληρωμένη απεικόνισής της μετασεισμικής κατάστασης του κτιρίου. Πρόκειται για εργαλείο χρησιμότερο κατά το σχεδιασμό αλλά και ως ένα ὄργανο για ταχεία μετασεισμική ενέργεια καθώς προσφέρει μια άμεση εικόνα των πιθανότερων βλαβών και προβλημάτων που ενδέχεται να αντιμετωπίσει ὅποιος μπαίνει στο κτίριο μετά το σεισμικό γεγονός. Σε κάθε περίπτωση, η απεικόνισής των δεδομένων βλάβης ἐπὶ του τρισεπίστας προσομοιώματος της κατασκευής είναι ένα ανεκτίμητο στοιχείο το οποίο βοηθά στην πληρέστερη κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς με τρόπο κατανοητό ἀπὸ ἀκόμα και ἀπὸ μη μηχανικούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ATC (1996), "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", *Report No. ATC-40*, Applied Technology Council, Redwood City, CA.

- Cornell C.A., and Krawinkler H. (2000). "Progress and challenges in seismic performance assessment", *PEER Center News*, 3(2), pp. 1–2.
- FEMA (2000), "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", *Report No. FEMA-356*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Goulet C., Haselton C., Mitrani-Reiser J., Beck J., Deierlein G., Porter K., and Stewart J. (2007), "Evaluation of the seismic performance of a code-conforming reinforced-concrete frame building - from seismic hazard to collapse safety and economic losses", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36, p.p. 1973–1997.
- Griffis F.H., and Struts C.S. (2000), *Three-dimensional computer models and the fully integrated and automated project process for the management of construction*, Construction Industry Institute (CII).
- Kamat V.R., and El-Tawil S. (2007), "Evaluation of augmented reality for rapid assessment of earthquake-induced building damage", *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, 21(5), pp. 303–310.
- McKenna F., and Fenves G.L. (2001), *The OpenSees Command Language Manual - Version 1.2.*, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley.
- Miranda E., and Aslani H. (2003), "Probabilistic response assessment for building-specific loss estimation", *Report No 2003/03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.
- Porter K.A., Kiremdjian A.S., and LeGrue J.S. (2001), "Assembly-based vulnerability of buildings and its use in performance evaluation", *Earthquake Spectra*, 17, p.p. 291–312.
- SAC (2000), "Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings", *Report No. FEMA-350*, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000.
- Vamvatsikos D., and Cornell C.A. (2002), "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, pp. 491–514.