



Νίκος Πνευματικός

Nikos Pnevmatikos

Σχεδιασμός μεταλλικών κατασκευών με μεθόδους αυτομάτου ελέγχου Structural control design of steel structures

Διδακτορική διατριβή, 2007

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής

Doctoral Thesis, 2007

Supervisor: Charis J. Gantes, Assoc. Professor

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι να συμβάλει στην εξέλιξη της επιστημονικής περιοχής του ελέγχου των κατασκευών και συγκεκριμένα στη σύνθεση της φιλοσοφίας του αντισεισμικού σχεδιασμού κτιριακών κατασκευών και της θεωρίας αυτομάτου ελέγχου. Επιχειρείται δηλαδή η σύνδεση στοιχείων από αυτούς τους δύο χώρους και προτείνεται μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία ελέγχου για την αντισεισμική προστασία κτιριακών κατασκευών. Σε αυτά τα πλαίσια διερευνώνται, τροποποιούνται, και προσαρμόζονται σε προβλήματα ελέγχου της σεισμικής απόκρισης κτιρίων, υπάρχοντες αλγόριθμοι ελέγχου που έχουν αναπτυχθεί κυρίως για μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές κατασκευές.

Στη διατριβή διερευνώνται και τροποποιούνται ο αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων και ο αλγόριθμος μορφής ολίσθησης. Επιπλέον, προτείνεται ένας αλγόριθμος ελέγχου για συστήματα μεταβλητής δυσκαμψίας. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ρυθμίζει τη λειτουργία των συσκευών μεταβλητής δυσκαμψίας που τοποθετούνται στην κατασκευή.

Για καθέναν από τους παραπάνω αλγόριθμους τεκμηριώνεται η προτεινόμενη διαδικασία ελέγχου με μια σειρά αναλύσεων μονοβάθμιων και πολυβάθμιων συστημάτων. Διερευνώνται πρακτικά θέματα που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων αλγορίθμων, όπως οι θέσεις και αριθμός των συσκευών ελέγχου, η ταυτόχρονη επιρροή της χρονικής καθυστέρησης και του κορεσμού της δύναμης ελέγχου. Από τα αποτελέσματα των συσχετισμών, επιβεβαιώνεται η δυσμενής επιρροή που έχουν στον έλεγχο οι παραπάνω παράγοντες, αλλά και η αναγκαιότητα να λαμβάνονται υπόψη στις αριθμητικές αναλύσεις ελέγχου πριν από την εγκατάσταση του συστήματος ελέγχου στην κατασκευή.

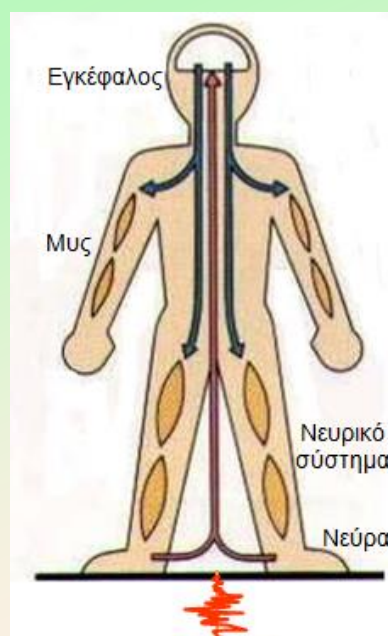
Abstract

The purpose of this thesis is to contribute to the scientific area of structural control, and more specifically, to the combination of earthquake engineering and control theory. It is attempted to bring together these two scientific areas, and to make appropriate modifications, where needed, in order to have an integrated control procedure suitable to control civil structures.

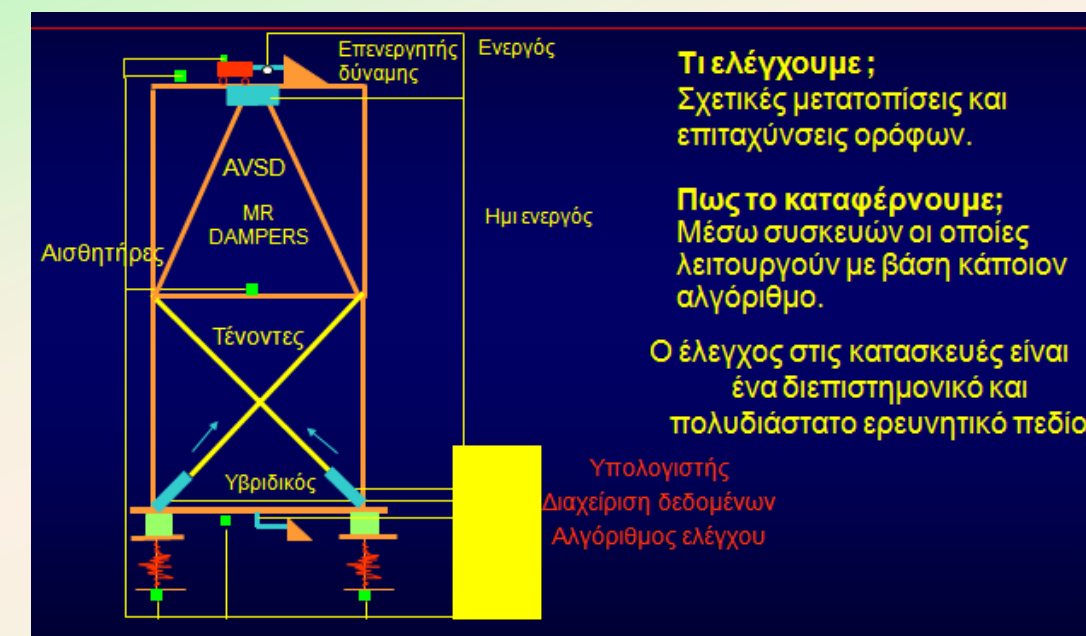
In this dissertation the pole placement algorithm and the sliding mode control algorithm are studied and modified. Furthermore, a new control algorithm for active variable stiffness systems is proposed. The proposed algorithm controls the function of the active variable stiffness devices that are located into the structure.

The verification of the above control algorithms is carried out by means of numerical simulations. Dynamic control analysis for single and multi degree of freedom systems subjected to sinusoidal, earthquake and pulse loading are performed. The numerical results show that the above algorithms are efficient in reducing the response (displacements and accelerations) of building structures. Practical issues that influence the effectiveness and the reliability of the proposed control algorithms are studied. First, the effect of the location and the number of the control forces is examined. Two more practical issues, namely time delay and saturation of the control force, are also investigated. The expected negative influence of those parameters is verified. It is concluded that there is a need to take them into account in the design procedure and in the numerical simulations before the installation of the control system on the actual building.

1



Ανθρώπινος έλεγχος / Human being control



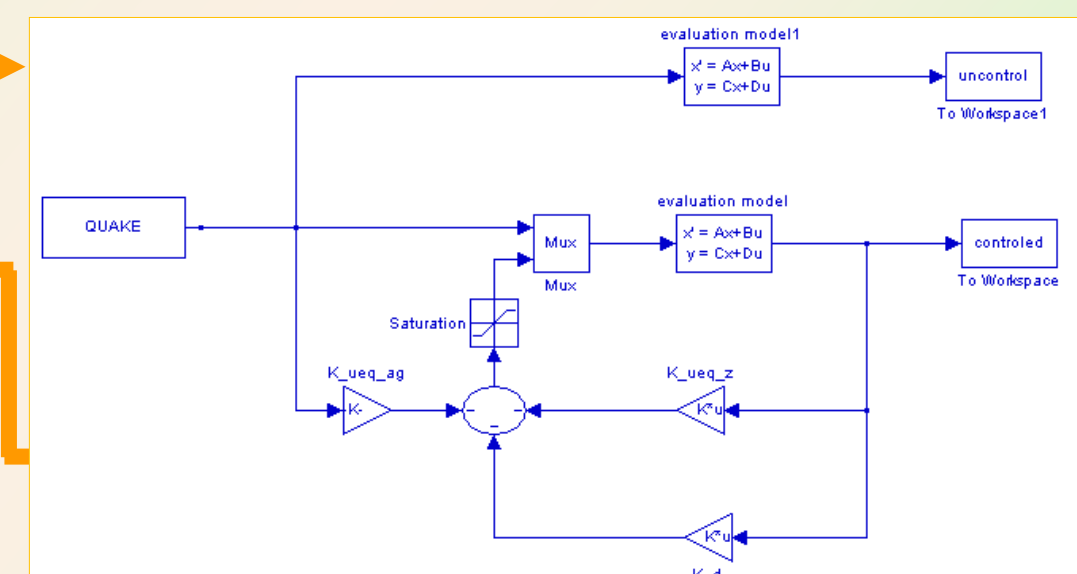
Έλεγχος κατασκευών / Structural control

3

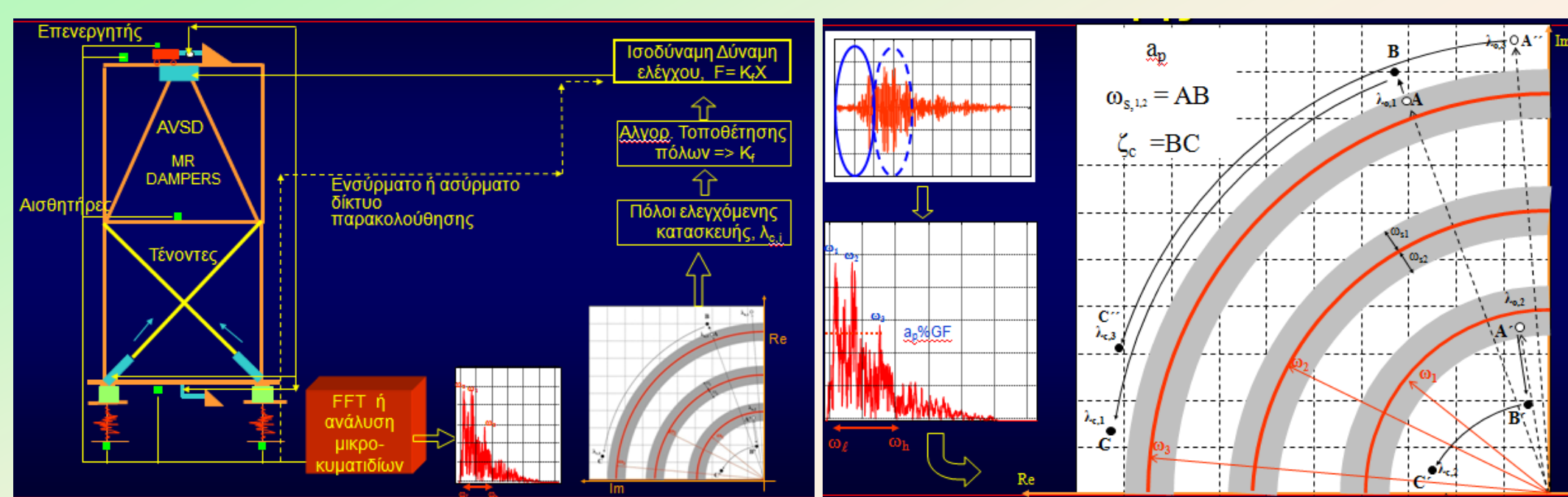
- Υπολογισμός μητρώων M , C , K
- Καθορισμός συστήματος A , B στο χώρο κατάστασης
- Υπολογισμός T , ω , ξ
- Καθορισμός παραμέτρων: a_p , I_p , x , x_d , πλῆθος κομματιών σήματος
- Επιλογή σήματος
- Αρχικές συνθήκες
- Για το i^{th} κομμάτι του σήματος:
 - Υπολογισμός μητρώου επιφάνειας ολίσθησης P
 - Δυναμική ανάλυση στο SIMULINK

- Μέθοδος FFT
- Επιλογή συχνότητων
- Με βάση το a_p και το I_p γίνεται ο σχεδιασμός κύκλων σεισμού, μη ασφαλούς ζώνης, ω_p , στο μιγαδικό επίπεδο
- Τοποθέτηση πόλων-ιδιοτιμών του αρχικού συστήματος στο μιγαδικό επίπεδο
- Επιλογή των πόλων του ελεγχόμενου συστήματος με βάση παρακάτω κανόνες:
 - Αν οι πόλοι είναι μέσα στη ζώνη μη ασφαλούς περιοχής τοποθετήσε τους έξω
 - Αν οι πόλοι είναι έξω από τις ζώνες ως άφησε τους εκεί προσωρινά
 - Για παρατέρα μείωση της απόκρισης υπολογισμός της ισοδύναμης απόσβεσης
 - Αν το σήμα πολύ μικρό δεν πραγματοποιείται έλεγχος
- Υπολογισμός νέων τιμών πόλων, $\lambda_c = \alpha + \beta i$

- Αποθήκευση της απόκρισης και δυνάμεων ελέγχου
- Ενημέρωση αρχικών συνθηκών
- Επανάληψη για το επόμενο κομμάτι της διέγερσης



2



Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων / Pole placement algorithm

Προτεινόμενος τρόπος επιλογής πόλων της κατασκευής / Proposed pole location calculation

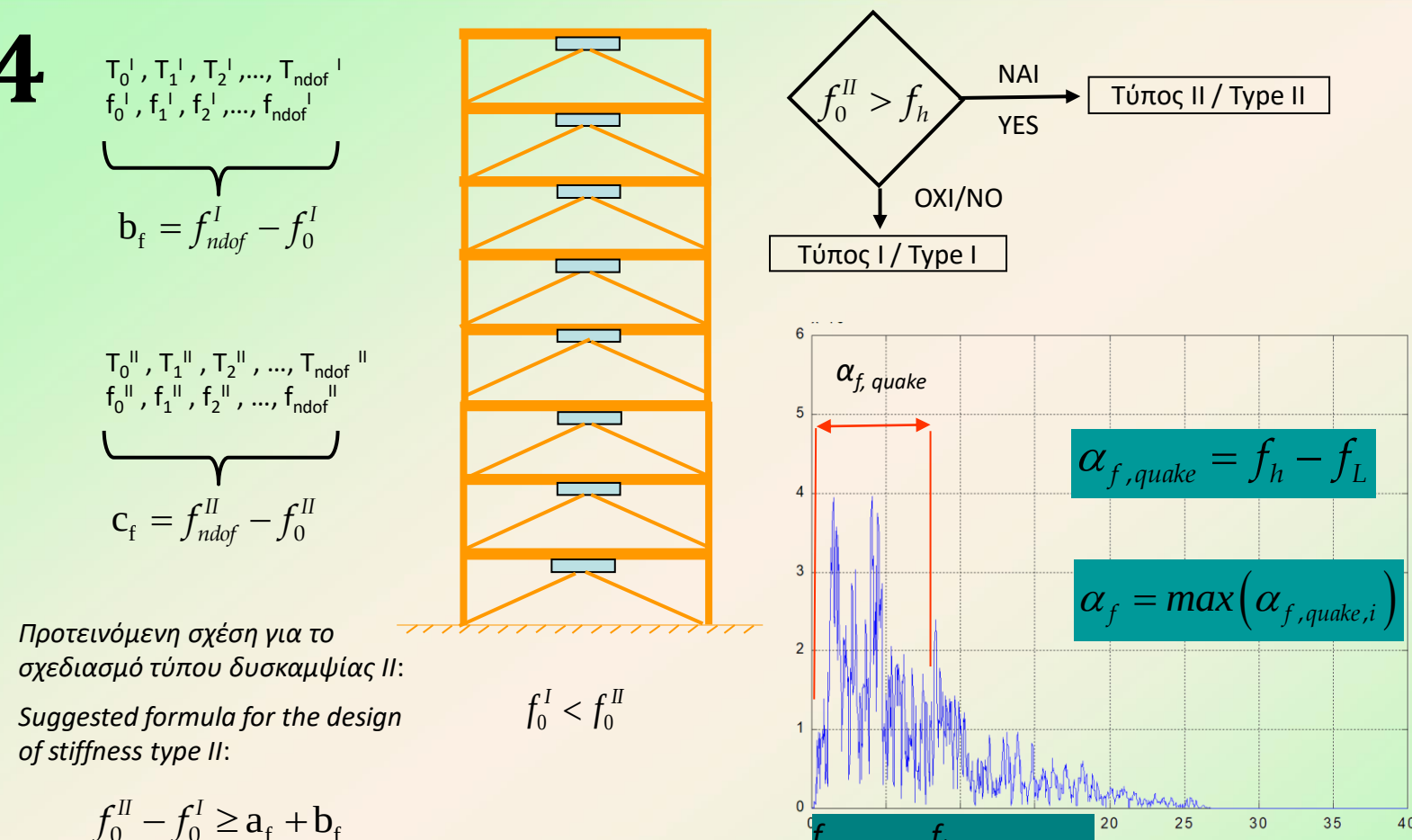
Αλγόριθμος τοποθέτησης πόλων. Κατά τον έλεγχο της κατασκευής με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πόλων αρχικά η εισερχόμενη διέγερση στη βάση της κατασκευής αναλύεται και βρίσκεται το συχνотικό περιεχόμενό της. Με βάση αυτό υπολογίζονται οι πόλοι (ιδιοτιμές) της ελεγχόμενης κατασκευής και στη συνέχεια προκύπτει το μητρώο ανάδρασης και η δύναμη ελέγχου που θα πρέπει να εφαρμοστεί στην κατασκευή.

Pole placement algorithm. According to pole placement algorithm, initially the incoming excitation at the base of the structure is analyzed and the frequency content is calculated. Based on the frequency content the poles (eigenvalues) of the controlled structure are also computed, and then the feedback matrix and the control force to be applied on the structure are obtained.

Αλγόριθμος μορφής ολίσθησης. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό η δύναμη έλεγχου υπολογίζεται έτσι ώστε να οδηγήσει τη φάση του συστήματος πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης. Η κίνηση πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης θα πρέπει να είναι ευσταθής. Έτσι σχεδιάζεται πρώτα μια ευσταθής επιφάνεια ολίσθησης με βάση το συχνотικό περιεχόμενο της εισερχόμενης διέγερσης. Στη συνέχεια καθορίζεται η δύναμη ελέγχου, με βάση τη θεωρία ευστάθειας κατά Lyapunov που θα οδηγήσει το σύστημα στην επιφάνεια ολίσθησης.

Sliding mode algorithm. According to sliding mode algorithm, initially a stable sliding surface is designed based on the frequency content of the incoming excitation at the base of the structure. Then, the control force is calculated using the Lyapunov stability theory.

4



Προτεινόμενη σχέση για το σχεδιασμό τύπου δυσκαμψίας II:
Suggested formula for the design of stiffness type II:

$$f_0^{II} - f_0^I \geq a_i + b_i$$

Αλγόριθμος μεταβλητής δυσκαμψίας. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό επιλέγεται ο τύπος δυσκαμψίας ώστε να αποφεύγεται ο συντονισμός της κατασκευής με την σεισμική διέγερση.

Variable stiffness algorithm. According to this algorithm the choice to activate or not the braces is based on the frequency content of the incoming excitation in order to avoid the resonance.

Χαρακτηριστικές δημοσιεύσεις Key publications

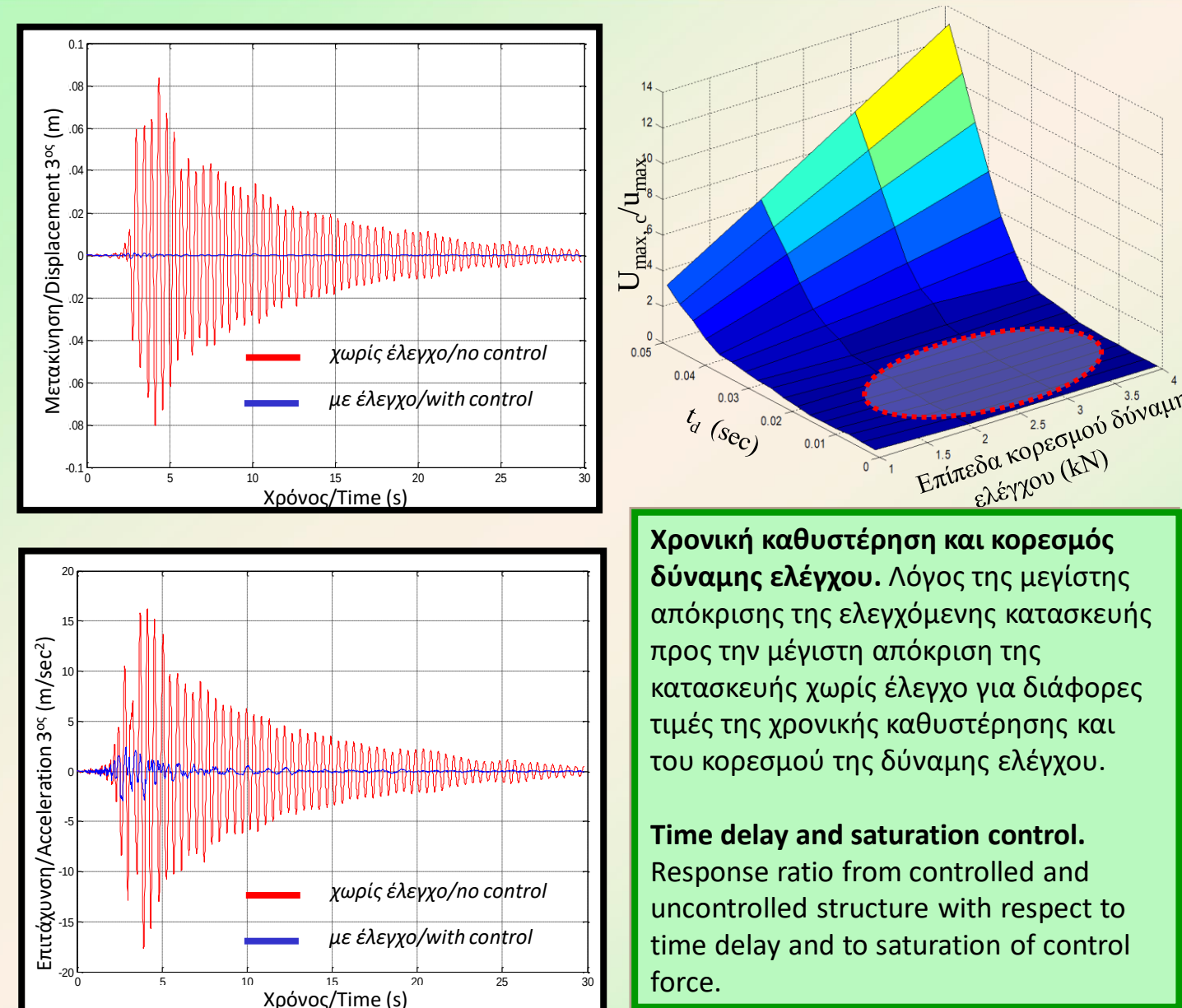
Pnevmatikos, N.G., Kallivokas, L.F. and Gantes, C.J., "Feed-Forward Control of Active Variable Stiffness Systems for Mitigating Seismic Hazard in Structures", *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 4, pp. 471-483, 2004.

Pnevmatikos, N.G. and Gantes, C.J., "Pole selection for structural control using the complex Fourier characteristics of the incoming earthquake", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 14, pp. 428-447, 2007.

Pnevmatikos, N.G. and Gantes, C.J., "Sliding mode control for structures based on the frequency content of the earthquake loading", *Smart Structures and Systems*, Vol. 5, No. 3, pp. 209-221, 2009.

Pnevmatikos, N.G. and Gantes, C.J., "Design and control algorithm for structures equipped with active variable stiffness devices", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 17, Issue 6, pp. 591-613, 2010.

5



Χρονική καθυστέρηση και κορεσμός δύναμης ελέγχου. Λόγος της μέγιστης απόκρισης της ελεγχόμενης κατασκευής προς την μέγιστη απόκριση της κατασκευής χωρίς έλεγχο για διάφορες τιμές της χρονικής καθυστέρησης και του κορεσμού της δύναμης ελέγχου.

Time delay and saturation control. Response ratio from controlled and uncontrolled structure with respect to time delay and to saturation of control force.

