3MURI
Project

3Muri Module

Ειδικά εργαλεία για την ανάλυση και τον έλεγχο θόλων και αψίδων

ERGOCAD®

www.ergocad.eu/3muri

Τίτλος φυλλαδίου: 3Muri Module, Ειδικά εργαλεία για την ανάλυση και τον έλεγχο θόλων και αψίδων

Κεντρική διάθεση: Αρετής 13, Περιστέρι Τ.Κ. 12135
Τηλ. 2114112619 - 2114112620
Fax: 2105760870
Email: info@ergocad.eu
Δικτυακός τόπος της Γ. Τσιαμτσιακίρης & Συν. Ε.Ε. : www.ergocad.eu

Το 3Muri αποτελεί καινοτόμο λογισμικό για τον έλεγχο και τις ενισχύσεις κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία και είναι προϊόν έρευνας του Πανεπιστημίου της Γένοβα & του Ευρωπαϊκού κέντρου ερευνών με επικεφαλής τον καθηγητή S. Lagomarsino – Μέλος της ομάδας σύνταξης του EC8.3

3MURI Module - Ανάλυση και έλεγχος θόλων και αψίδων

Ο έλεγχος και η διαστασιολόγηση τοξωτών στοιχείων όπως είναι οι θόλοι και οι αψίδες απαιτούν ειδικούς ελέγχους οι οποίοι δεν περιλαμβάνονται συνολικά στους ευρωκώδικες.

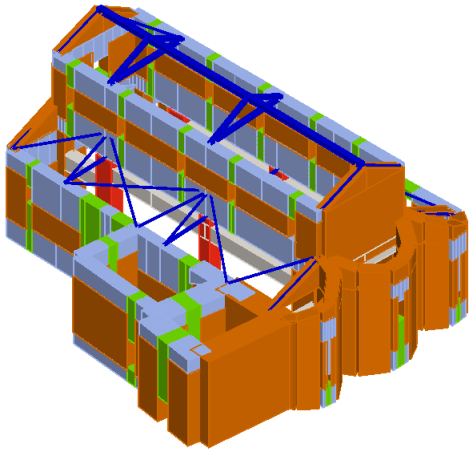
Με το module αυτό, είναι δυνατή η διενέργεια ελέγχων έναντι στατικών και σεισμικών φορτίων σύμφωνα με διατάξεις από τη διεθνή βιβλιογραφία και κάποιες βασικές παραμέτρους (κυρίως για τους στατικούς ελέγχους) από τους ευρωκώδικες.

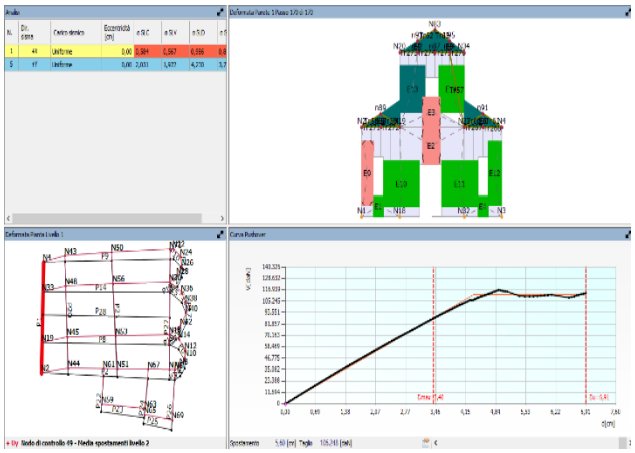
Σημείωση: Το συγκεκριμένο υπολογιστικό εργαλείο του 3Muri μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως αυτόνομη εφαρμογή χωρίς ο χρήστης να έχει κάποια από τις βασικές άδειες του προγράμματος

Ο έλεγχος ενός θόλου (π.χ. τρούλος ενός ναού) ή μιας αψίδας (π.χ. καμάρα που συνδέει δύο πεσσούς) χρειάζεται ειδικά εργαλεία για τον έλεγχο καθώς δεν επαρκεί η προσομοίωση με κάποιο ισοδύναμο πλαίσιο (π.χ. υποστύλωμα, δοκός) ενώ και η ανάλυση με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία υστερεί καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων κατά την διάρκεια της ταλάντωσης και την δυναμική που υπάρχει στην εξέλιξη των παραμορφώσεων.

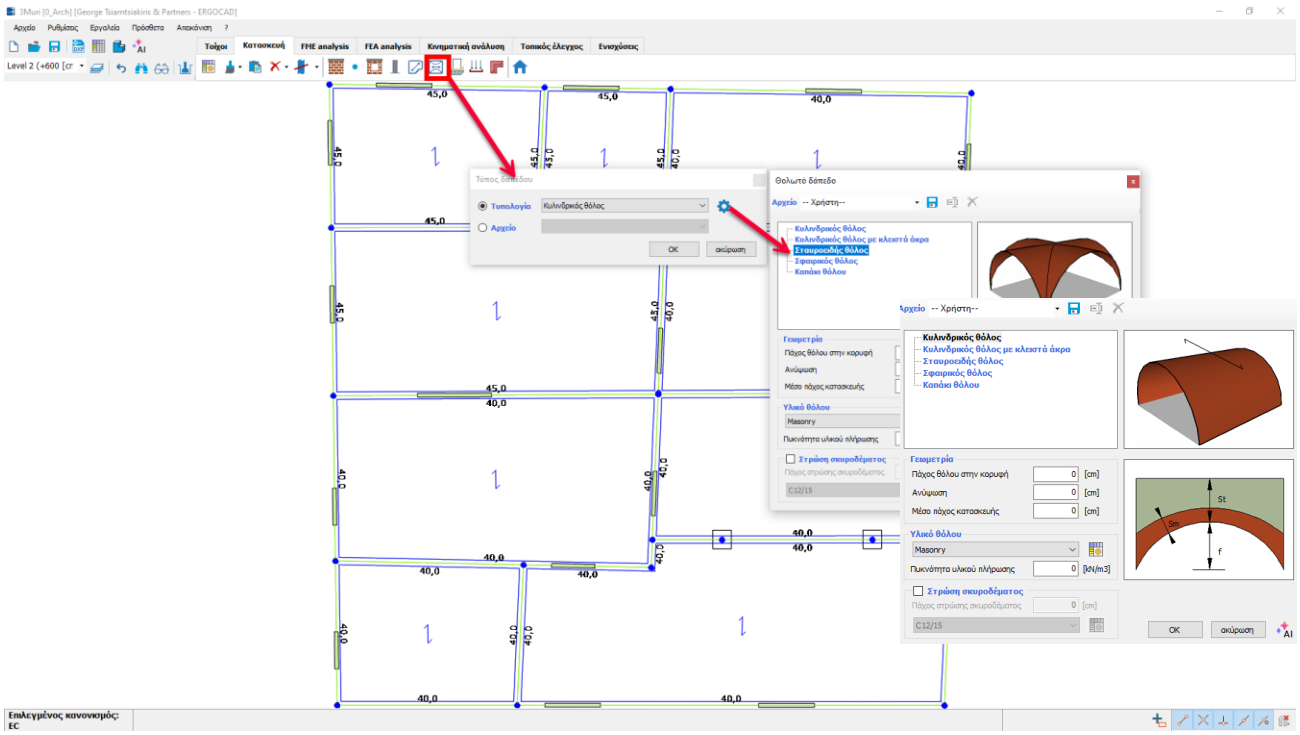
Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα 3Muri ένα νέο υπολογιστικό εργαλείο το οποίο βασίζεται στην ανάλυση με την γραμμή ώθησης και τις μεθόδους της γραμμικής κινηματικής και μη-γραμμικής κινηματικής ανάλυσης, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά παρακάτω.

Αρχικά αξίζει να τονίσουμε ότι η πορεία υπολογισμού ενός κτιρίου που περιλαμβάνει θόλους ή αψίδες ξεκινάει από την δημιουργία ενός μοντέλου που συμπεριλαμβάνει την **καθολική μορφή** του υπό μελέτη φορέα.



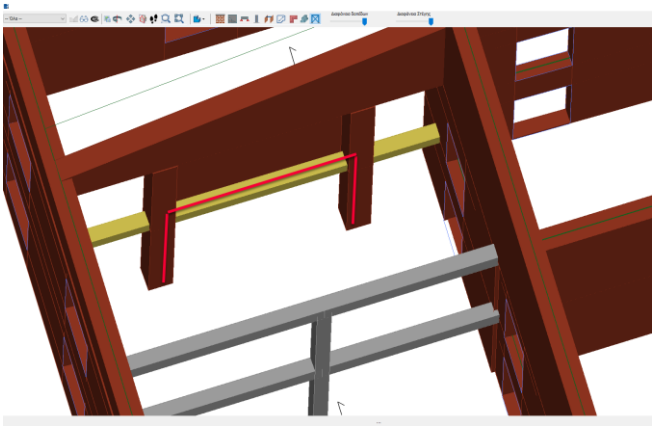


Στο μοντέλο αυτό, ο μελετητής εισάγει την γεωμετρία του κτιρίου όπως είναι στην πραγματικότητα, αλλά στα σημεία που υπάρχει θόλος επιλέγονται τα έτοιμα στοιχεία θόλων μέσα από το πεδίο της κατασκευής του μοντέλου.



*Στο 3D μοντέλο θα φαίνεται η προβολή του θόλου (ως οριζόντιο δάπεδο), αλλά η συνεισφορά του θόλου στην καθολική ανάλυση (pushover) λαμβάνεται από την χωρική διαφραγματική λειτουργία που παρέχει στο υπολογιστικό μοντέλο το ίδιο το πρόγραμμα.

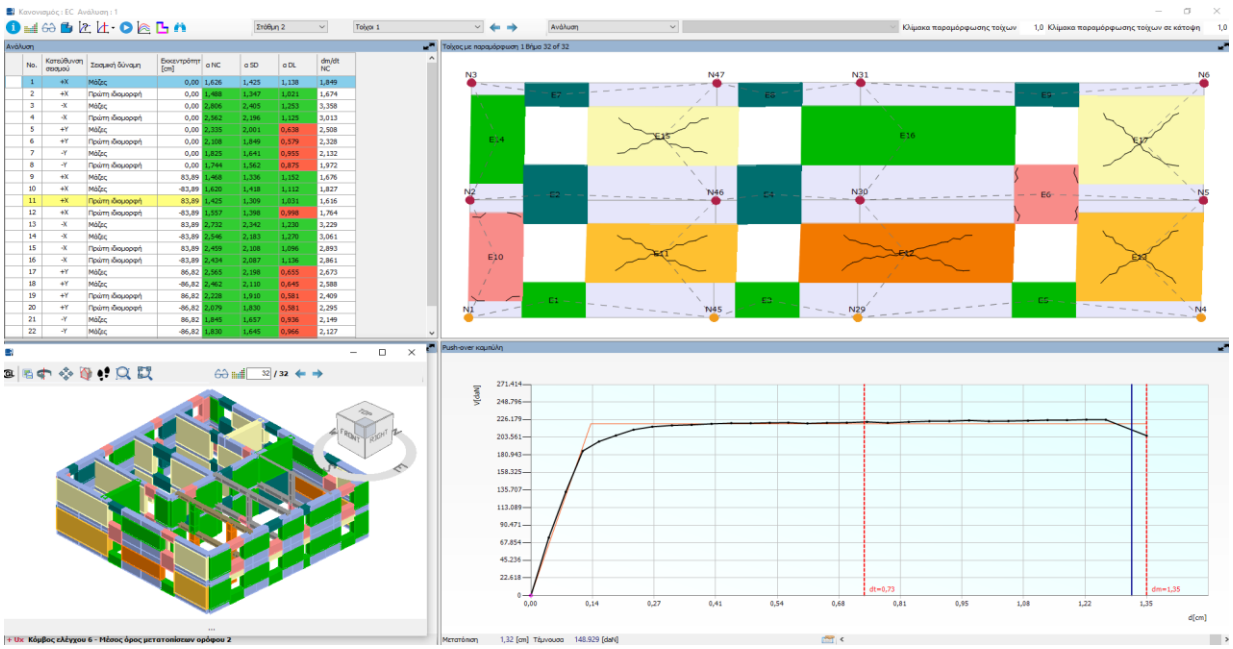
Αντίστοιχα στα σημεία που υπάρχουν οι καμάρες (αψίδες) σε τοίχους, ο μελετητής καθορίζει τα περιγεγραμμένα ορθογώνια και εισάγει τα ανοίγματα στους τοίχους:



*Στο 3D μοντέλο τα ανοίγματα που περιλαμβάνουν τα περιγεγραμμένα ορθογώνια θα δώσουν μία αξιόπιστη προσομοίωση για την καθολική ανάλυση (pushover) και θα ληφθεί υπόψη η επίδραση τους στην απόκριση της κατασκευής.

Η πορεία των υπολογισμών και των ελέγχων για το **καθολικό μοντέλο** μπορεί να περιλαμβάνει πλήθος αναλύσεων που διαθέτει το πρόγραμμα 3Muri, όπως για παράδειγμα :

- **Pushover ανάλυση** καθολικού φορέα (24 έτοιμα σενάρια ή από χρήστη)
- **Pushover ανάλυση** μεμονωμένου τοίχου ή με ορισμό κατευθυντικότητας σεισμού
- **Δυναμική φασματική** (επιλογή αριθμού ιδιομορφών από τον χρήστη)
- **Στατική ανάλυση** χωρίς σεισμό (έλεγχοι ευρωκώδικα 6)
- Σεισμική ανάλυση για τον συνολικό έλεγχο της **εκτός επιπέδου κάμψης**
- Ανάλυση **ευαισθησίας δεδομένων** (sensitivity analysis)
- **Ελαστική ανάλυση** (έλεγχος σεισμοπλήκτων)
- **Ανάλυση χρονοϊστορίας με πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα** (Time history)

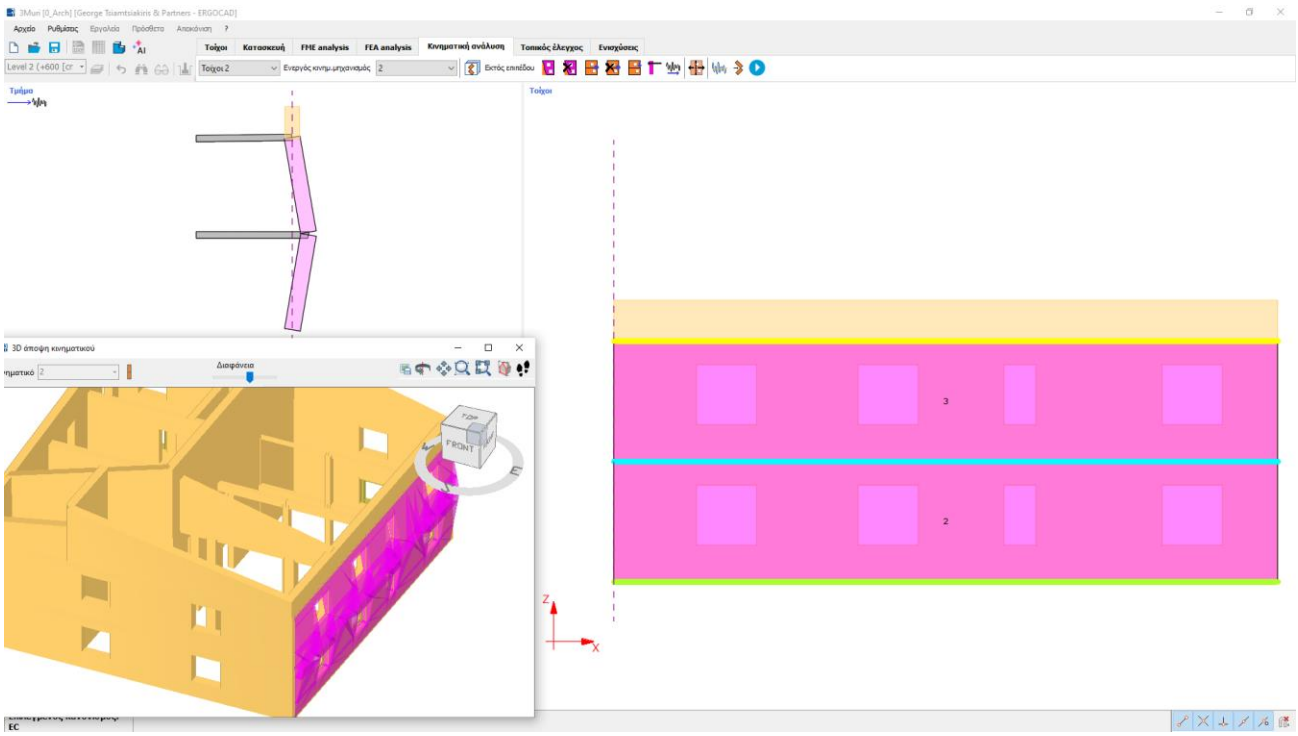


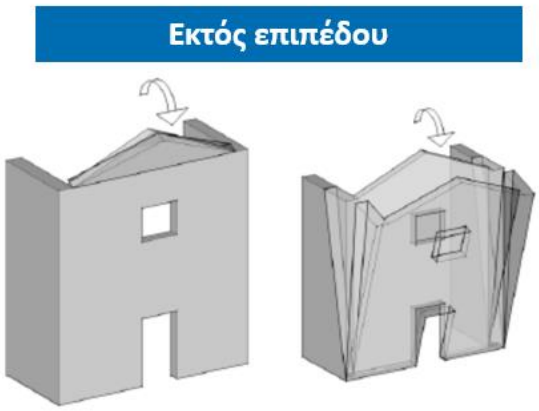
Από τη στιγμή που έχουν ολοκληρωθεί οι καθολικοί έλεγχοι, η στρατηγική των υπολογισμών συνεχίζεται με τους ελέγχους σε τοπικό επίπεδο. Εδώ το πρόγραμμα 3Muri περιλαμβάνει διάφορα πρόσθετα εργαλεία, όπως :

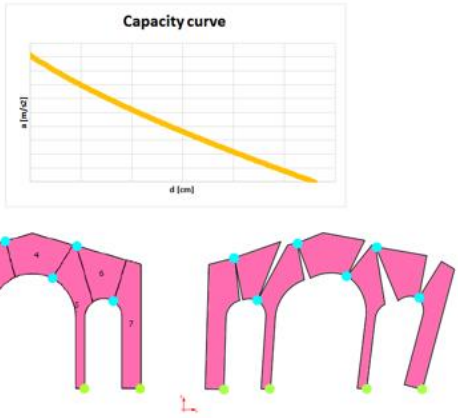
- Έλεγχος τοπικών μηχανισμών (κινηματική ανάλυση)
- Ανάλυση σύνθετου τοίχου με χρήση του επιλύτη Open (κινηματική ανάλυση)
- Διαστασιολόγηση στοιχείων σκυροδέματος (EC2) και χάλυβα (EC3) για κατακόρυφα φορτία

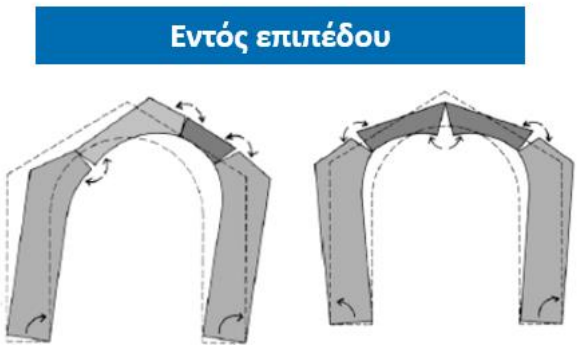
  (*να αναφέρουμε ότι στον καθολικό έλεγχο όλα τα στοιχεία όπως τοίχοι, υποστυλώματα, δοκάρια, υπέρθυρα, ελκυστήρες κλπ και από οποιοδήποτε υλικό όπως λιθοσώματα, σκυρόδεμα, χάλυβα, ξύλο ελέγχονται σε όρους παραμορφώσεων έναντι των σεισμικών φορτίων).

- Έλεγχος θόλων και αψίδων (κινηματική ανάλυση)





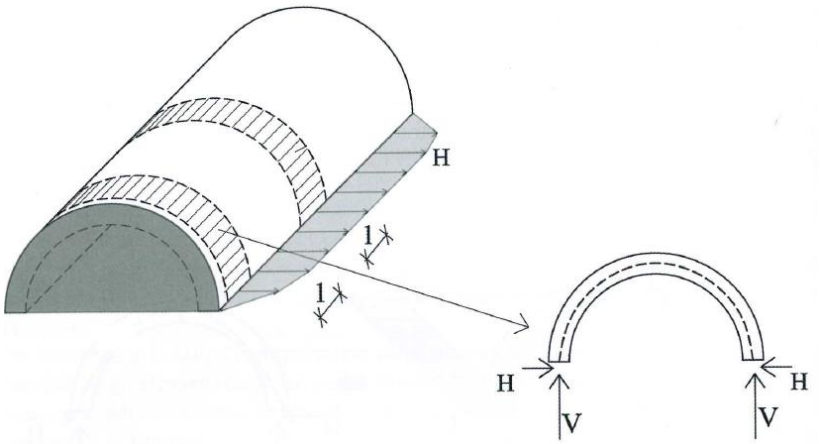


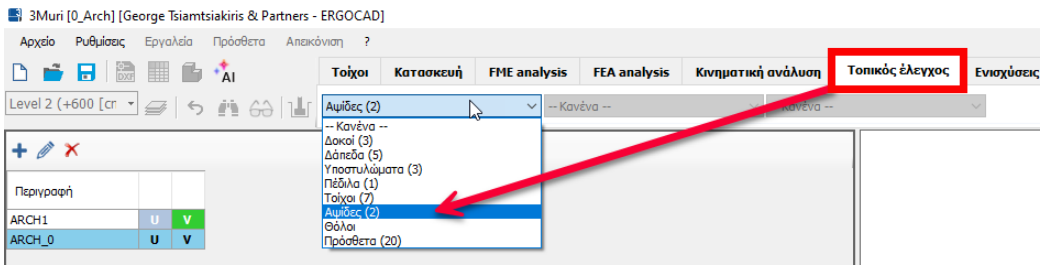


Για την εκπόνηση μιας ολοκληρωμένης λοιπόν μελέτης, ειδικά για την περίπτωση των ναών ή γενικά κατασκευών που περιλαμβάνουν θόλους και αψίδες, χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί το αντίστοιχο πρόσθετο module.

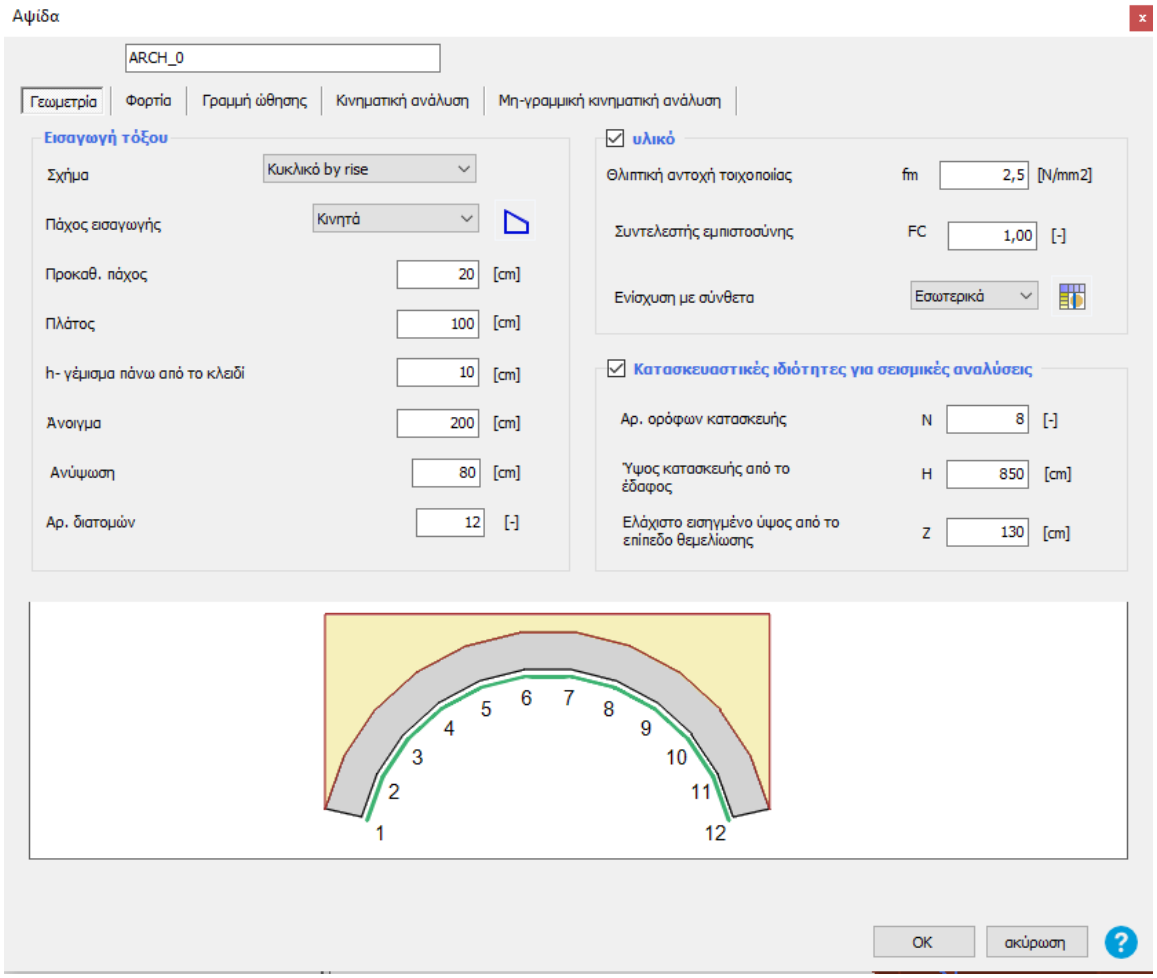
Η πορεία του ελέγχου ενός θόλου περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα :

1. **Βήμα πρώτο – Γεωμετρία**
   Εισαγωγή γεωμετρίας του θόλου (εδώ στην ουσία ο μελετητής χρησιμοποιεί μία τομή ανά διεύθυνση στο υψηλότερο συνήθως σημείο του θόλου) μέσα από το αντίστοιχο πλαίσιο διαλόγου του προγράμματος που εμφανίζεται όταν επιλεγεί το σχετικό πεδίο:

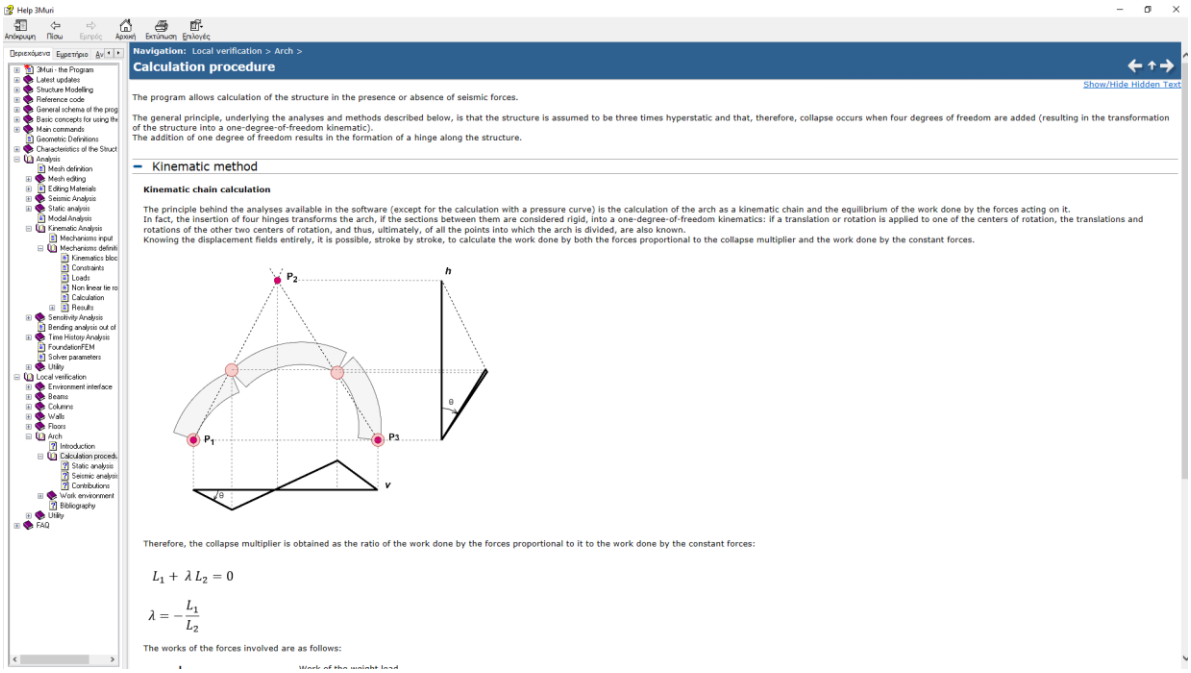




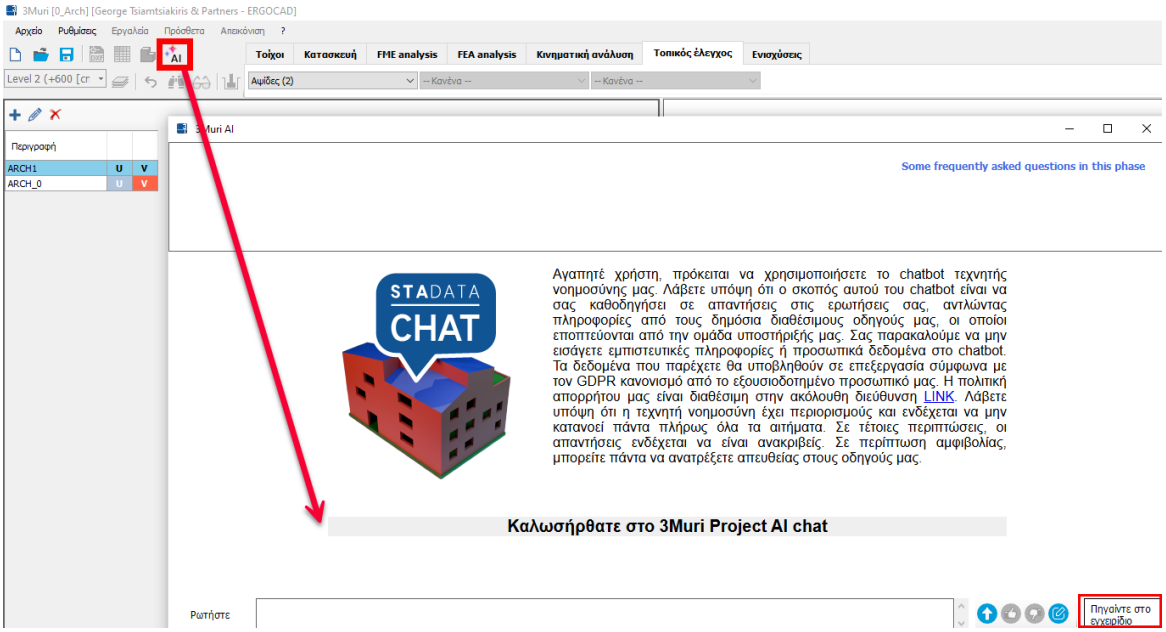
Στο παράθυρο αυτό χρειάζεται να οριστεί η γεωμετρία, το υλικό από το οποίο αποτελείται ο θόλος, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του όπως η θλιπτική αντοχή στην περίπτωση των λιθοσωμάτων – κονιάματος, οι πιθανές ενισχύσεις που υπάρχουν ή πρόκειται να εφαρμοστούν (π.χ. Frps) καθώς και οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι που αφορούν τις σεισμικές αναλύσεις όπως το ύψος της κατασκευής από το έδαφος, ο αριθμός των ορόφων και η απόσταση από την θεμελίωση:



*Σημείωση: Σε κάθε πεδίο του προγράμματος που ο χρήστης βλέπει το σύμβολο του ερωτηματικού, υπάρχει η δυνατότητα προβολής του αναλυτικού εγχειριδίου περιγραφής εντολών που είναι ενσωματωμένο στο πρόγραμμα και είναι στην αγγλική γλώσσα,

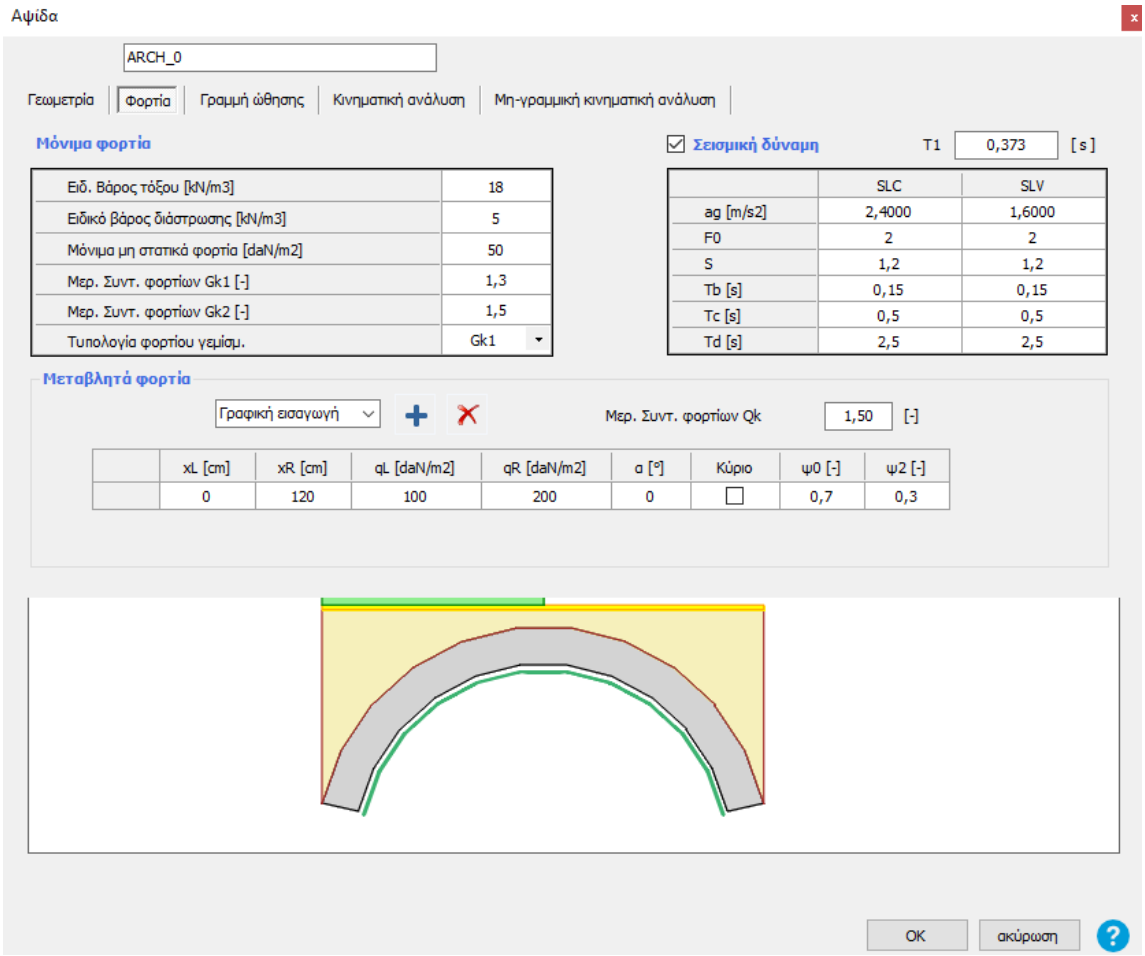


ενώ στο βασικό περιβάλλον εργασίας στο επάνω μενού υπάρχει το σύμβολο του βοηθού AI (πεδίο ερωταπαντήσεων που αφορούν το πρόγραμμα 3Muri με βάση την τεχνητή νοημοσύνη) .



2. Βήμα δεύτερο – Φορτία

Αφού καθοριστεί η γεωμετρία, το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των φορτίων.



Στο πεδίο αυτό εισάγονται τα μόνιμα φορτία, τα μεταβλητά (είτε μέσω του πίνακα είτε με γραφική εισαγωγή), οι συντελεστές ασφαλείας των φορτίων καθώς και τα σεισμικά φορτία.

Κατηγορία Εδάφους	S	$T_B(s)$	$T_C(s)$	$T_D(s)$
A	1,0	0,15	0,4	2,5
B	1,2	0,15	0,5	2,5
C	1,15	0,20	0,6	2,5
D	1,35	0,20	0,8	2,5
E	1,4	0,15	0,5	2,5

Για τα σεισμικά φορτία ισχύουν οι σχέσεις του ευρωκώδικα EN 1998-1.

*Το F0 είναι η μέγιστη φασματική ενίσχυση που λαμβάνεται ίση με 2,5

3.2.2.2 Horizontal elastic response spectrum

(1)P For the horizontal components of the seismic action, the elastic response spectrum $S_e(T)$ is defined by the following expressions (see Figure. 3.1):

$$0 \le T \le T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2{,}5 - 1)\right] \quad (3.2)$$

$$T_B \le T \le T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2{,}5 \quad (3.3)$$

$$T_C \le T \le T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2{,}5\left[\frac{T_C}{T}\right] \quad (3.4)$$

$$T_D \le T \le 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2{,}5\left[\frac{T_C T_D}{T^2}\right] \quad (3.5)$$

where

$S_e(T)$ is the elastic response spectrum;

T is the vibration period of a linear single-degree-of-freedom system;

a_g is the design ground acceleration on type A ground ($a_g = \gamma_I . a_{gR}$);

T_B is the lower limit of the period of the constant spectral acceleration branch;

T_C is the upper limit of the period of the constant spectral acceleration branch;

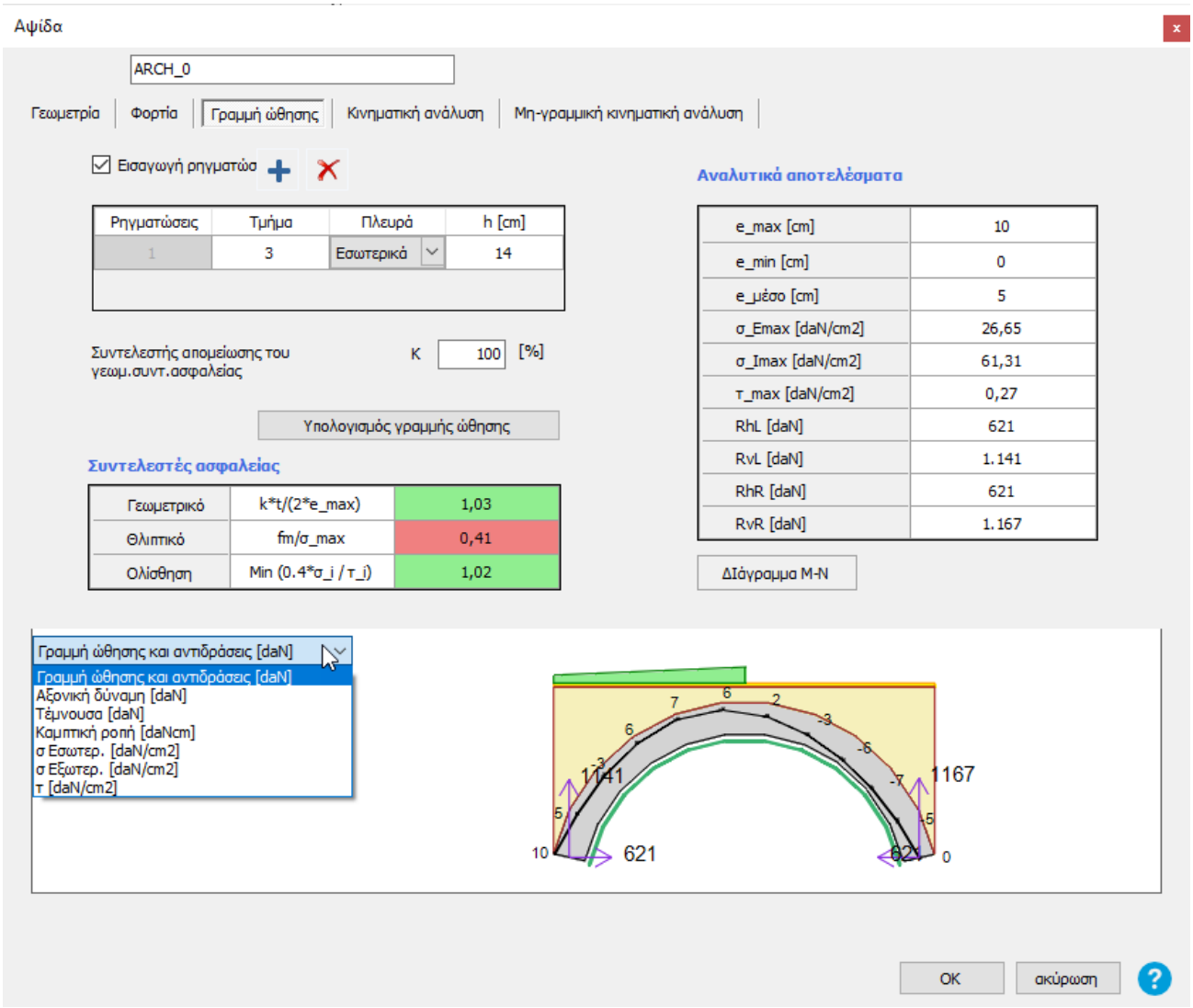
T_D is the value defining the beginning of the constant displacement response range of the spectrum;

S is the soil factor;

η is the damping correction factor with a reference value of $\eta = 1$ for 5% viscous damping, see (3) of this subclause.

3. Βήμα τρίτο – γραμμή ώθησης

Στο επόμενο πεδίο εισάγονται οι παράμετροι για τον υπολογισμό της γραμμής ώθησης.



Λίγα λόγια για την γραμμή ώθησης:

Η ισορροπία σε έναν τοξωτό φορέα τοιχοποιίας μπορεί να απεικονιστεί χρησιμοποιώντας μια γραμμή ώθησης. Αυτή είναι μια θεωρητική γραμμή, η οποία αντιπροσωπεύει την ***πορεία των συνιστωσών των θλιπτικών δυνάμεων μέσα στην πέτρινη κατασκευή****. Αυτή η γραμμή είναι στην ουσία μία ανεστραμμένη αλυσοειδής γραμμή. Για να βρίσκεται μια κατασκευή που βρίσκεται υπό θλίψη σε ισορροπία με τα εφαρμοζόμενα φορτία, πρέπει να υπάρχει μια γραμμή ώθησης που να βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός της τοιχοποιίας. Η έννοια διατυπώθηκε αυστηρά για πρώτη φορά από τον Moseley [1833] και μια εξαιρετική μαθηματική επεξεργασία ολοκληρώθηκε από τον Milankovitch [1907]. Η αναλυτική λύση για αυτήν την έννοια έχει οριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια ως ο τόπος των σημείων θλίψης από τον Ochsendorf [2002].*

Το πιο σημαντικό άρθρο όμως για την γραμμή ώθησης δημοσιεύτηκε από τον καθηγητή Jacques Heyman το 1966 με τίτλο «The Stone Skeleton» το οποίο έχει επηρεάσει γενικά την επιστήμη της μηχανικής της τοιχοποιίας που αφορά τους τοξωτούς φορείς, καθώς βασίζεται σε περιοριστικές υποθέσεις σχετικά με τη συμπεριφορά των τοξωτών στοιχείων και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ένας τοξωτός φορέας μπορεί να

είναι σταθερός με βάση τη θέση μιας στατικά αποδεκτής γραμμής ώθησης όταν αυτή βρίσκεται μέσα στο τόξο. Η θεωρία που βασίζεται στο άρθρο The Stone Skeleton είναι μια εφαρμογή των θεωρημάτων της πλαστικής αστοχίας. Ο Heyman σημείωσε ότι τα τόξα από τοιχοποιία, όπως και τα χαλύβδινα πλαίσια, αναπτύσσουν αρθρώσεις υπό φορτίο και ότι η οριακή τους κατάσταση συμβαίνει όταν δημιουργείται μία άρθρωση μεγαλύτερη από τον βαθμό στατικής αοριστίας.

Πριν από την εφαρμογή των μεθόδων πλαστικότητας στην ανάλυση των άοπλων τοιχοποιιών, υπήρχε μια εξάρτηση από τον «κανόνα του μέσου 1/3». Ο κανόνας αυτός ανέφερε ότι η γραμμή ώθησης ενός τόξου πρέπει να παραμένει εντός του μέσου 1/3 για να διασφαλίζεται η ασφάλεια του τόξου. Στην πραγματικότητα, όπως αναφέρει ο Heyman, μια εκτροπή της γραμμής ώθησης εκτός του μέσου 1/3 δεν προκαλεί ούτε τοπική ούτε καθολική αστοχία του τόξου. Απλώς υποδεικνύει μια ***μετατόπιση της ζώνης θλίψης*** *προς την άκρη του τόξου. Για ένα στοιχείο με θεωρητικά απεριόριστη θλιπτική ικανότητα, η ζώνη θλίψης μπορεί να εκτείνεται μέχρι την άκρη του τόξου. Μετά τη δημοσίευσή της, η μέθοδος του Heyman έγινε το βασικό μέσο ανάλυσης ενός τόξου που είναι διαθέσιμο στους περισσότερους μηχανικούς. Αν και υπάρχουν πολλές προηγουμένως δημοσιευμένες ελαστικές μέθοδοι, τόσο αναλυτικές όσο και γραφικές, όλες απαιτούν σύνθετους υπολογισμούς και όλες εξαρτώνται από τον εντοπισμό της γραμμής ώθησης στο μεσαίο τρίτο του τόξου. Ο «κανόνας του μεσαίου τρίτου» είναι ένας περιττός περιορισμός που περιορίζει την φαινομενική ικανότητα ενός τόξου και δεν εξηγεί γιατί τόσα πολλά παραδείγματα τοξοτών φορέων εξακολουθούν να υπάρχουν με μια γραμμή ώθησης έξω από το μεσαίο τρίτο. Οι μέθοδοι του Heyman βρήκαν άμεση εφαρμογή στην ανάλυση της γοτθικής αρχιτεκτονικής και επέτρεψαν στους πολιτικούς μηχανικούς να κατανοήσουν καλύτερα τα θέματα της ανάλυσης τοξωτών φορέων και να ερμηνεύσουν τις τεχνικές της μεσαιωνικής αρχιτεκτονικής.*

Πηγή: https://web.mit.edu/masonry/papers/block_dejong_ochs_NNJ.pdf

https://www.researchgate.net/publication/380310805_The_Stone_Skeleton_A_Reappraisal

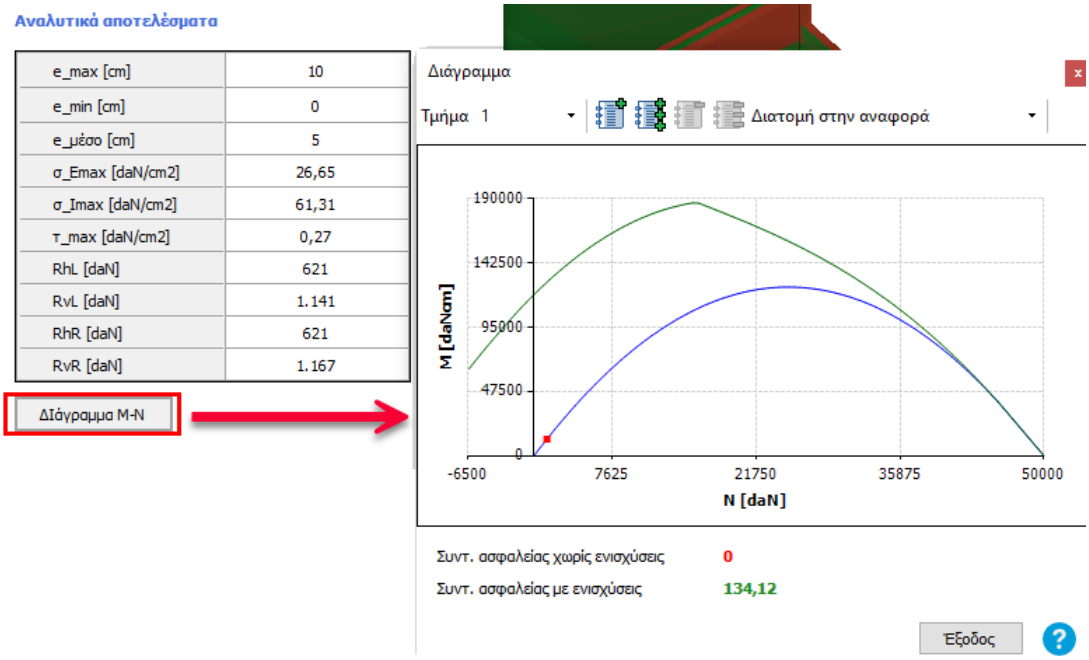
Επανερχόμενοι στο πρόγραμμα 3Muri, αξίζει να σημειωθεί ότι εδώ υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης υφιστάμενων ρηγματώσεων με άμεση επιρροή στον καθορισμό της γραμμής ώθησης. Αν επιλεγεί αυτή η δυνατότητα τότε η γραμμή ώθησης θα περνάει μόνο από τα άθικτα μέρη της κατασκευής.

Ο μελετητής μπορεί μετά τον καθορισμό (ή χωρίς) των ρηγματώσεων να επιλέξει το αντίστοιχο κουμπί για να γίνει ο υπολογισμός της γραμμής ώθησης και αμέσως μετά εμφανίζονται οι συντελεστές ασφαλείας της κατασκευής (με πράσινο εμφανίζονται οι λόγοι επάρκειας).

Στη συνέχεια παράγονται και τα αναλυτικά αποτελέσματα για τα οποία παραθέτουμε τις σχετικές επεξηγήσεις:

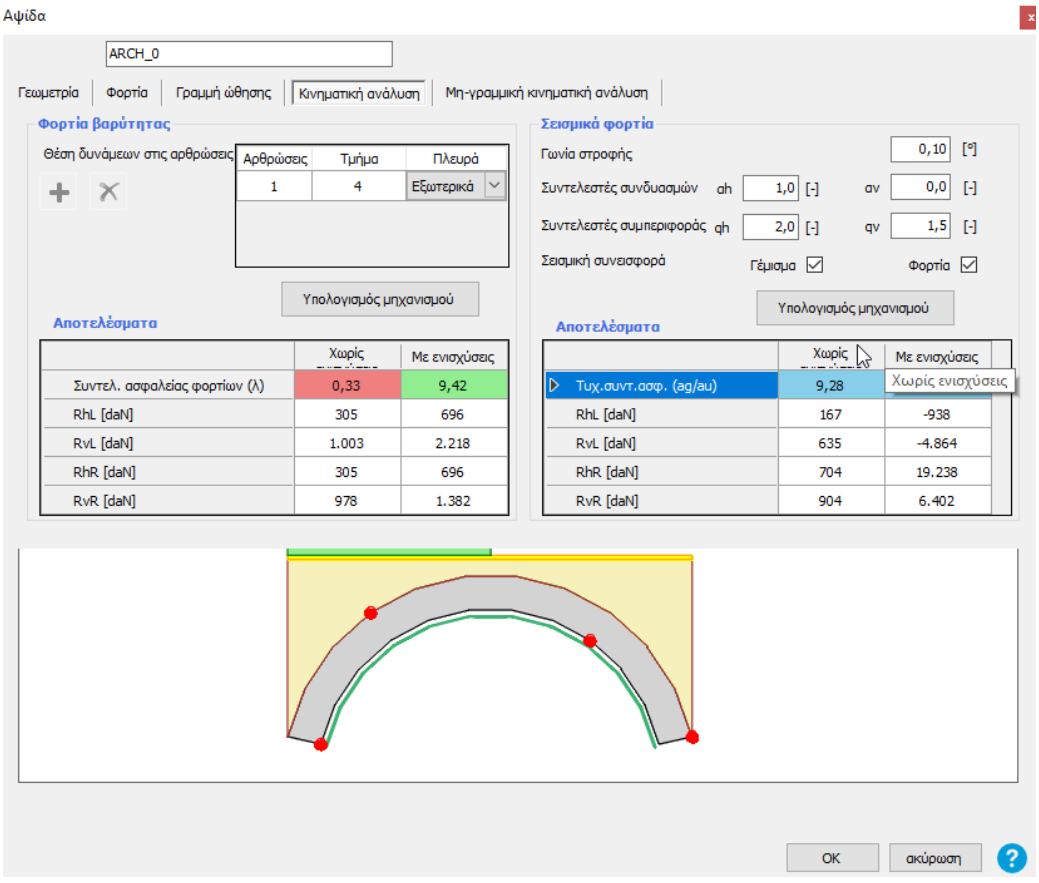
- Τα **e_max , e_min και e_μέσο** είναι αντίστοιχα η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση εκκεντρότητα στην καμπύλη θλίψης.
- Τα **σ_Emax, σ_I_max και T_max** είναι αντίστοιχα η μέγιστη τιμή της αξονικού εφελκυσμού στην εσωτερική και εξωτερική πλευρά καθώς και η εφαπτομενική τάση εφελκυσμού.
- Τα **RhL και RvL** είναι αντίστοιχα η οριζόντια και η κατακόρυφη αντίδραση στην αριστερή στήριξη.
- Τα **RhR και RvR** είναι αντίστοιχα η οριζόντια και η κατακόρυφη αντίδραση στην δεξιά στήριξη

Στο κάτω μέρος της οθόνης εμφανίζονται ταυτόχρονα τα διαγράμματα με τα εντατικά μεγέθη, η γραμμή ώθησης, οι αντιδράσεις στις στηρίξεις του τόξου, οι τάσεις κλπ.



4. Βήμα τέταρτο – Κινηματική ανάλυση

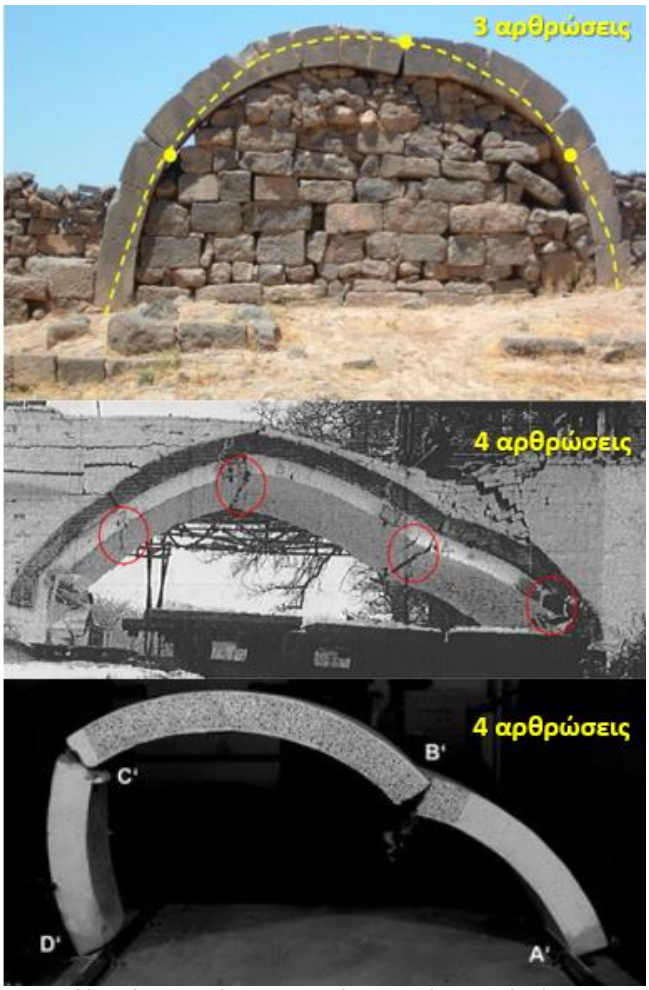
Μετά τον υπολογισμό της γραμμής ώθησης προχωράμε στην κινηματική ανάλυση. Στο παράθυρο που εμφανίζεται ο χρήστης εισάγει τα φορτία βαρύτητας, καθορίζει την θέση των αρθρώσεων σε κάθε τμήμα του τόξου (ανάλογα με τον αριθμό των διατομών/τμημάτων που έχει δηλώσει στην αρχική γεωμετρία του τόξου) και αν αυτή βρίσκεται στην εξωτερική ή εσωτερική πλευρά.



Στη συνέχεια εκτελείται ο υπολογισμός του μηχανισμού (κινηματική ανάλυση) και παράγονται οι συντελεστές ασφαλείας (έλεγχοι επάρκειας).

Αντίστοιχα ο μελετητής εισάγει τα σεισμικά φορτία και κατόπιν εκτελούνται οι υπολογισμοί, ενώ στο κάτω μέρος της οθόνης εμφανίζονται οι θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων.

Σημείωση:

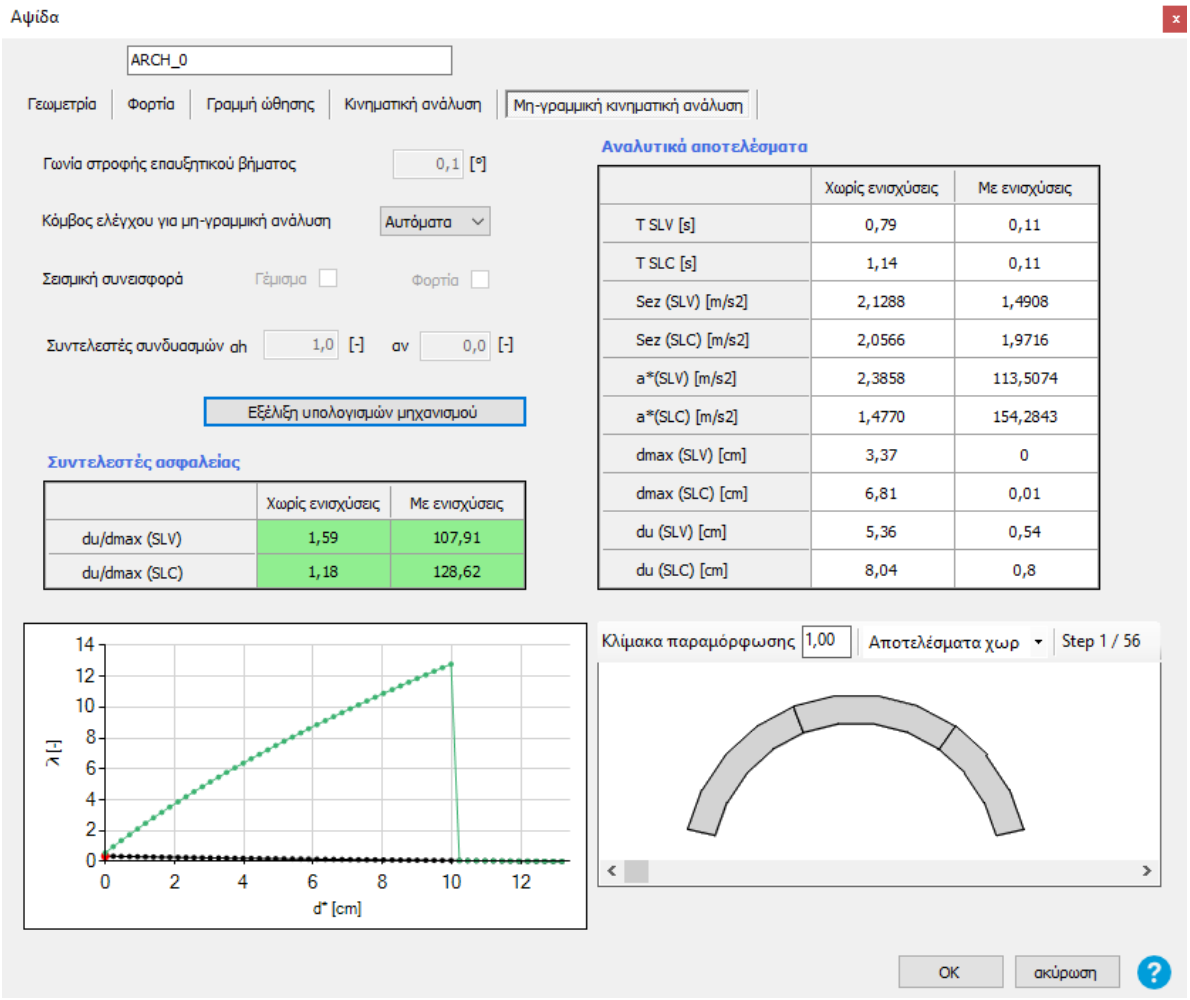


Η γραμμική κινηματική ανάλυση παρουσία σεισμικών φορτίων καθιστά δυνατό τον υπολογισμό του πολλαπλασιαστή των σεισμικών φορτίων έτσι ώστε να ενεργοποιείται ο κινηματικός έλεγχος.
Το πρόγραμμα 3Muri επιτρέπει την προσαρμογή της γωνίας στροφής που επιβάλλεται στην πρώτη άρθρωση του κινηματικού μηχανισμού: τα αποτελέσματα της γραμμικής κινηματικής αναμένεται να είναι ανεξάρτητα από αυτήν τη γωνία στροφής, αλλά μπορεί να είναι απαραίτητη μια μείωσή της για την πιο λεπτομερή διακριτοποίηση της καμπύλης ικανότητας της μη γραμμικής κινηματικής ανάλυσης.
Οι συνδυαστικοί παράγοντες επιτρέπουν να ληφθούν υπόψη οριζόντιες και κατακόρυφες σεισμικές δυνάμεις (με κάποιο φορτίο) (Κεφ. 7.3.5 του ιταλικού κανονισμού NTC 2018). Για παράδειγμα, η εισαγωγή συνδυαστικών παραγόντων αh = 1 και αν = 0,3 θα σημαίνει ότι θα ληφθεί υπόψη το οριζόντιο σεισμικό φορτίο στην πλήρη έκτασή του και θα ληφθεί υπόψη το κατακόρυφο σεισμικό φορτίο σε ποστοστό 30%.
Ο συντ. συμπεριφοράς για την οριζόντια διεύθυνση συνιστάται να λαμβάνεται ίσος με 2 από το Κεφ. C8.7.1.2.1.7. Ο συντ. συμπεριφοράς για την κατακόρυφη διεύθυνση είναι ίσος με 1,5 στο άρθρο Monti, G., et al. Αναλυτικά μοντέλα ικανότητας για οπλισμένες αψίδες τοιχοποιίας που υπόκεινται σε σεισμικές δράσεις, περιγράφονται στο έγγραφο Earthquake Engineering in Italy-ANIDIS 2013 (2013).
Τα φορτία που οφείλονται σε φορτία πλήρωσης και μεταβλητά φορτία μπορούν να θεωρηθούν ως συνεργαζόμενα με τη σεισμική δράση ή όχι μέσω των σχετικών πλαισίων ελέγχου. Ο πίνακας αποτελεσμάτων θα αναφέρει τον πολλαπλασιαστή των σεισμικών φορτίων, ώστε να ενεργοποιηθεί η κινηματική και οι οριζόντιες και κατακόρυφες αντιδράσεις στα ελατήρια.

5. Βήμα πέμπτο – Μη-γραμμική Κινηματική ανάλυση

Στο τελευταίο πεδίο υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης της μη-γραμμικής κινηματικής ανάλυσης. Εδώ ο χρήστης χρειάζεται να επιλέξει ο ίδιος τον κόμβο ελέγχου για την ανάλυση ή να επιτρέψει στο πρόγραμμα να επιλέξει αυτόματα τον κόμβο ελέγχου. Παράλληλα χρειάζεται να επιλεγεί αν η στρώση από το υλικό πλήρωσης (γέμισμα) πάνω από το τόξο θα ληφθεί υπόψη στο σεισμό ή όχι.

Μετά τον καθορισμό αυτών των παραμέτρων εκτελείται η ανάλυση και η εξέλιξη υπολογισμών μηχανισμού.



Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης εμφανίζονται οι συντελεστές ασφαλείας (επάρκειας ή αστοχίας με πράσινο ή κόκκινο χρώμα) τόσο για το σενάριο της υφιστάμενης κατασκευής όσο και αυτής με τις όποιες ενισχύσεις.

Παράλληλα στο κάτω μέρος παράγονται τα διαγράμματα που σχετίζουν το συντελεστή ασφαλείας με την μετατόπιση ενώ ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το κάτω δεξιά πεδίο και την κύλιση για να εμφανίσει την σταδιακή παραμόρφωση του τοξωτού φορέα για κάθε βήμα (εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων).

Τέλος, εμφανίζονται στο πάνω δεξιά πεδίο και τα αναλυτικά αποτελέσματα και για τα 2 σενάρια ελέγχου (χωρίς ενισχύσεις και με ενισχύσεις).

Στη συνέχεια παραθέτουμε χρήσιμα στοιχεία για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

- Τα T SLV και T SLC είναι αντίστοιχα οι χαρακτηριστικές ισοδύναμες περίοδοι των δύο οριακών καταστάσεων SLV και SLC.
- Τα Sez (SLV) και Sez (SLC) είναι αντίστοιχα το φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων στο επίπεδο Z των δύο οριακών καταστάσεων SLV και SLC.
- Τα a*(SLV) και a*(SLC) είναι αντίστοιχα οι φασματικές επιταχύνσεις των δύο οριακών καταστάσεων SLV και SLC
- Τα dmax(SLV) και dmax(SLC) είναι αντίστοιχα οι στοχευόμενες μετατοπίσεις των δύο οριακών καταστάσεων SLV και SLC
- Τα du(SLV) και du(SLC) είναι αντίστοιχα οι οριακές μετατοπίσεις των δύο οριακών καταστάσεων SLV και SLC

Κανονισμός αναφοράς “Circolare NTC18 21 gennaio 2019”

C8.7.1.2.1.8 Displacement check at SLV and SLC (nonlinear kinematic analysis)

Έλεγχος μετατόπισης σε οριακή κατάσταση SLV και SLC (μη γραμμική κινηματική ανάλυση).

Ο έλεγχος μετατόπισης εκτελείται υπολογίζοντας την επιτάχυνση του εδάφους που παράγει μια απαίτηση μετατόπισης στον τοπικό μηχανισμό ίση με αυτήν που ορίστηκε προηγουμένως ως αντίστοιχη με την επίτευξη της στην οριακή κατάσταση SLV ή SLC. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί, ξεκινώντας από την καμπύλη ικανότητας a(d), η χαρακτηριστική ισοδύναμη περίοδος των δύο οριακών καταστάσεων.

Αυτές οι περίοδοι μειώνονται κατάλληλα σε σχέση με εκείνες που αντιστοιχούν στην υποτιθέμενη τελική μετατόπιση, λαμβάνοντας υπόψη τη διασπορά των αποτελεσμάτων κοντά στο όριο δυναμικής αστάθειας.

Η απαίτηση μετατόπισης στον τοπικό μηχανισμό στην οριακή κατάσταση SLV αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της φασματικής μετατόπισης που αξιολογείται στο διάστημα των περιόδων [T0, TSLV].

Αυτό το κριτήριο πρέπει να ακολουθείται στην περίπτωση που έχουν επιλεγεί επιταχυνσιογραφήματα με βάση την τοποθεσία ή έχει πραγματοποιηθεί τοπική σεισμική ανάλυση απόκρισης (το φάσμα μετατόπισης δεν αυξάνεται αυστηρά με την περίοδο T ακόμη και για χαμηλές περιόδους), καθώς οι κορυφές του φάσματος συχνά σχετίζονται με ιδιαίτερα επικίνδυνες μετατοπίσεις.

Στην περίπτωση που ο τοπικός μηχανισμός που συμβαίνει βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους και η επαλήθευση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τα τυπικά φάσματα, η απαίτηση μετατόπισης είναι αυτή που υπολογίζεται μέσω του φάσματος ελαστικής απόκρισης μετατόπισης SDe(T) (§3.2.3.2.3 του NTC) για τις χαρακτηριστικές τιμές της περιόδου που αντιστοιχούν στις δύο οριακές καταστάσεις.

Για μηχανισμούς σε ύψος z του κτιρίου, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε στο φάσμα επιτάχυνσης στο ύψος z (βλ. τύπο [C7.2.5]), το οποίο μετασχηματίζεται σε φάσμα μετατόπισης πάντα στο ύψος z πολλαπλασιάζοντάς το επί $T2/4\pi^2$.

Για την επαλήθευση οριακής κατάστασης των τοπικών μηχανισμών, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι περίοδοι επαναφοράς του φάσματος είναι γενικά μεγάλες, αρκεί να λάβουμε υπόψη μόνο την πρώτη ιδιομορφή ταλάντωσης ή, σε κάθε περίπτωση, την πρώτη μεταξύ εκείνων που χαρακτηρίζονται από σημαντικές μετατοπίσεις στην περιοχή όπου αναπτύσσεται ο τοπικός μηχανισμός.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η απαίτηση μετατόπισης πρέπει να αξιολογηθεί, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε ένα φάσμα μετατόπισης που δεν μειώνεται με την περίοδο T, είναι δυνατόν να αναφερθούμε στις ακόλουθες εκφράσεις για την οριακή κατάσταση SLV:

$$d_{SLV} = S_{eZ}(T_{SLV}, \xi, z)\frac{T_{SLV}^2}{4\pi^2}\left(\geq S_{eZ}(T_1, \xi, z)\frac{b^2 T_1^2}{4\pi^2} \quad per T_{SLV} > bT_1\right) \qquad [C8.7.1.12]$$

Από την σχέση [C8.7.1.12] είναι δυνατό να υπολογιστεί η επιτάχυνση εδάφους ag,SLV (στην περίπτωση που αυτή είναι μικρότερη από την agSLD που υπολογίζεται στην § C8.7.1.2.1.5, η τελευταία θεωρείται επίσης για την SLV).

Για τον έλεγχο, η agSLV πρέπει να συγκριθεί με την επιτάχυνση αναφοράς εδάφους ag που αξιολογείται για την πιθανότητα υπέρβασης της SLV κατά τη διάρκεια ζωής αναφοράς, όπως ορίζεται στην § 3.2 του NTC.

Μια έκφραση παρόμοια με την [C8.7.1.12] επιτρέπει την αξιολόγηση της απαίτησης μετατόπισης στο SLC και των αντίστοιχων τιμών της ag,SLC.

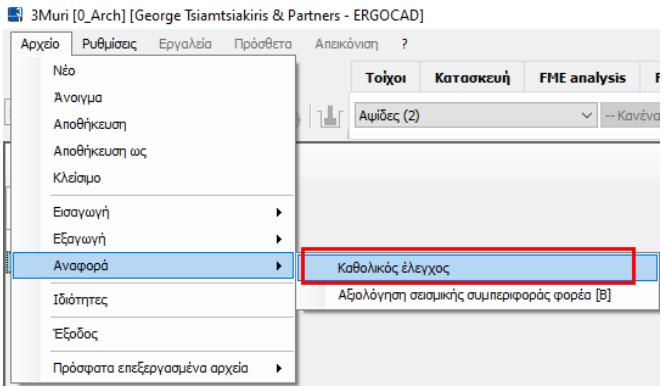
Στον υπολογισμό της απαίτησης μετατόπισης στην οριακή κατάσταση αστοχίας, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η επίδραση της διασποράς, τόσο στον υπολογισμό του φάσματος σε ύψος (μη γραμμικότητα της κύριας δομής) όσο και στην αξιολόγηση της ζήτησης μετατόπισης (μη γραμμικότητα του τοπικού μηχανισμού).

Ελλείψει ακριβέστερων αξιολογήσεων, η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση του τοπικού μηχανισμού μπορεί να θεωρηθεί ίση με 8% για την SLV και 10% για την SLC. Είναι επίσης σκόπιμο η απόσβεση 1 και η περίοδος T1 του κτιρίου να αξιολογηθούν λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο μη γραμμικότητας που επιτυγχάνεται από την κύρια κατασκευή στις τιμές ag,SLV και ag,SLC.

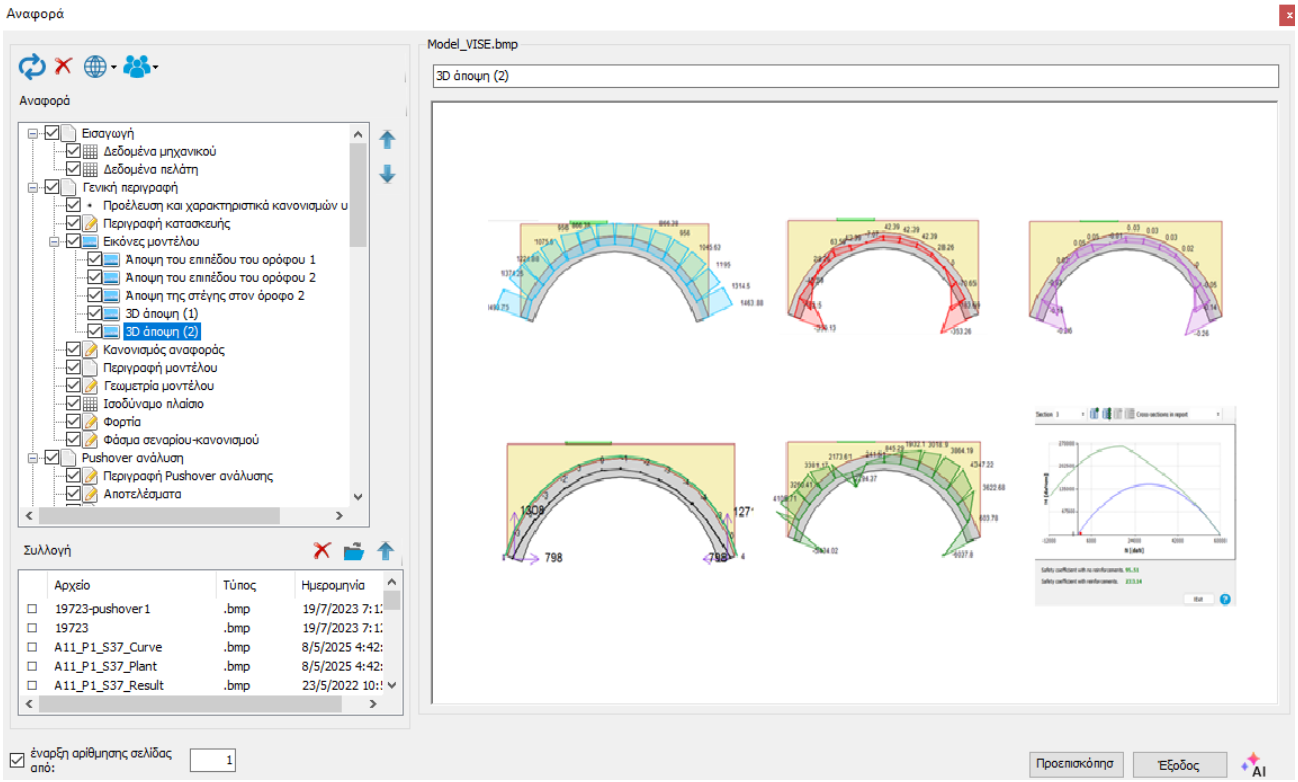
Συνοψίζοντας μπορούμε να δούμε τα ήδη των αναλύσεων που δύναται να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των τοξωτών στοιχείων όπως οι θόλοι και οι αψίδες σε μία κατασκευή από τοιχοποιία:

	Στατική ανάλυση	**Σεισμική ανάλυση**
Ελαστική ανάλυση	- **Ανάλυση με γραμμή ώθησης** - **Κινηματική ανάλυση** (όπου η κατάρρευση οφείλεται σε στατικά φορτία)	- **Κινηματική ανάλυση** (όπου η κατάρρευση οφείλεται σε σεισμικά φορτία)
Μη-γραμμική ανάλυση		- **Μη γραμμική κινηματική ανάλυση** (όπου η κατάρρευση οφείλεται σε σεισμικά φορτία)

Μετά το τέλος των ελέγχων, ο μελετητής μπορεί να δημιουργήσει την αναφορά με το τεύχος υπολογισμών από το σχετικό πεδίο εξαγωγής αποτελεσμάτων του 3Muri, όπως γίνεται και για την pushover ανάλυση του καθολικού φορέα (το τεύχος παράγεται από το ίδιο πεδίο):



Για μία πληρέστερη μελέτη είναι χρήσιμο να προσθέσετε στο τεύχος και κάποιες εικόνες από τα επιμέρους πεδία αποτελεσμάτων του module των αψίδων όπως π.χ. τα διαγράμματα:



Μην ξεχάσετε να κάνετε εγγραφή στο επίσημο κανάλι της ERGOCAD στο youtube όπου ανεβαίνουν τακτικά νέα μαγνητοσκοπημένα webinars για το σύνολο των δυνατοτήτων του 3Muri.

3MURI
Project

3Muri Module

Ειδικά εργαλεία για την ανάλυση και τον έλεγχο θόλων και αψίδων

ERGOCAD®

www.ergocad.eu/3muri