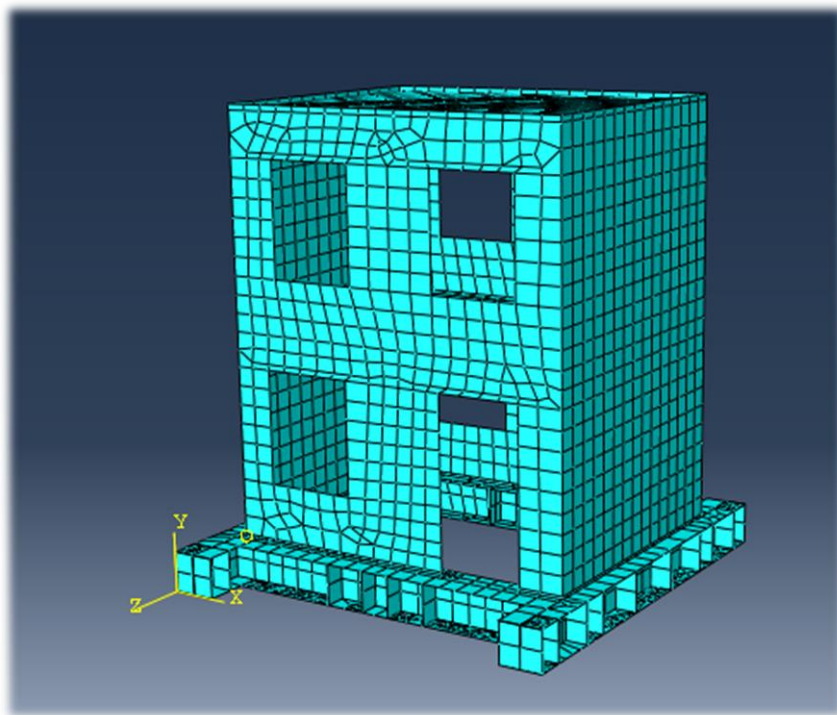




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ*



ΦΟΙΤΗΤΗΣ : ΚΑΛΑΝΔΡΑΝΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΜΟΥΖΑΚΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΕΠ.ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1 Πρόλογος.....	3
1.2 Προένταση και Τοιχοποιία.....	7
2. Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ :.....	8
2.1 Η μηχανική της τοιχοποιίας.....	8
2.2 Η μηχανική της προεντάσεως.....	10
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΟΠΛΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ.....	43
3.1 Αξονική δύναμη αντοχής τοίχου.....	43
3.2 Τέμνουσα δύναμη αντοχής τοίχου	46
3.3 Καμπτική ροπή αντοχής τοίχου.....	46
4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ (ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΥΨΟΣ ΑΝΩΦΛΙΟΥ ΚΑΙ ΠΛΑΤΟΣ ΠΕΣΣΟΥ).....	47
4.1 Εισαγωγή	47
4.2 Πεσσός πλάτους 1.4m.....	47
4.3 Πεσσός πλάτους 1.0m.....	54
4.4 Συμπεράσματα και σύγκριση αποτελεσμάτων	57
5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΑΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	59
6. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ.....	61
6.1 Ο φορέας	61
6.2 Εύρεση ιδιομορφών.....	63
6.3 Επιβολή Προέντασης.....	66
6.4 Ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	70
7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΕΙΑ	90

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προκείμενη εργασία επιχειρεί την εξέταση της μεθόδου ενίσχυσης με προένταση ιστορικών κατασκευών από τοιχοποιία . Η προένταση αυτή στοιχίζεται σε δυο κύριους πυλώνες , της συνεργασίας του τένοντα προέντασης με τη περιβάλλουσα τοιχοποιία και της μη συνεργασίας αυτών . Εστιάζοντας στον δεύτερο, περιγράφονται και υπολογίζονται οι στιγμιαίες και χρόνιες απώλειες που δέχεται ο τένοντας προέντασης. Έπειτα καθορίζεται η εφελκυστική επιβληθείσα δύναμη επί του τένοντα, με αντίκτυπο την θλιπτική αντίδραση της τοιχοποιίας.

Ακολούθως θα μελετηθεί η κατασκευή σε τρεις εκδοχές. Αυτή της μη ενισχυμένης κατασκευής , της κατασκευής αμέσως μετά την επιβολή της προέντασης και τέλος της κατασκευής εκείνης που ολοκληρώθηκαν οι απώλειες επί του τένοντα. Και στις ανωτέρω τρεις εκδοχές εξετάζεται η σεισμική συμπεριφορά του μοντέλου με την μέθοδο της δυναμικής φασματικής ανάλυσης με χρήση χρονοϊστοριών.

Ολοκληρώνοντας παρουσιάζεται παράδειγμα του τρόπου εξέλιξης των ροών των θλιπτικών τάσεων μέσα σε μία τοιχοποιία λόγω της προέντασης, καθώς και το μέτρο της θλιπτικής δύναμης (επίσης λόγω προέντασης) που θα καταλήξει στον πεσσοό. Ενώ παράλληλα, θα διερευνηθεί και η επιρροή του πλάτους του πεσσοού, του ύψους του ανωφλιού και των ξύλινων πρεκιών στην ροή των θλιπτικών τάσεων και του μέτρου της προαναφερθείσας δύναμης.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόλογος

Από την αρχαιότητα καθίσταται εμφανές ότι η τοιχοποιία αποτέλεσε ένα δομικό υλικό για κατοικίες, ναούς, ανάκτορα, γέφυρες, υδραγωγεία και οχυρωματικά έργα μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Έκτοτε ανακαλύφθηκε η σύμπραξη του χάλυβα και του σκυροδέματος, το επονομαζόμενο οπλισμένο σκυρόδεμα. Τεχνική που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις σύγχρονες κατασκευές. Στο παρελθόν της Δωδεκανήσου η τοιχοποιία μονοπώλησε στη κατασκευαστική παραγωγή. Κατά τα ομηρικά έτη, με τους αφιερωμένους στους τότε θεούς ναούς, καθώς και στη μεταγενέστερη εποχή των ιπποτών (1309 μ.Χ) το νησιωτικό σύμπλεγμα των Δωδεκανήσων κοσμήθηκε με κάστρα δομούμενα από τοιχοποιία.



Εικόνα 1.1 Κάστρο στη Λέρο.



Εικόνα 1.2 Κάστρο στη Λέρο



Εικόνα 1.3 Κάστρο στη Ρόδο

Στη Τουρκοκρατία οι κατοικίες οικοδομούνταν από υλικά που το φυσικό εκεί περιβάλλον παρείχε. Πέτρα, λάσπη, για την κατασκευή των περιμετρικών τοίχων, φύκια και ξύλα, για την οροφή, ήσαν ορισμένα από αυτά. Στην αρχιτεκτονική εικόνα των νησιών, όπως αυτή της Λέρου, της Σύμης, της Χάλκης, του Καστελόριζου, ήρθαν να προστεθούν και οι πολυτελείς κατοικίες, τα λεγόμενα Νεοκλασικά Κτίρια.



Εικόνα 1.4 Νεοκλασικό στη Λέρο



Εικόνα 1.5 Νεοκλασικά στο Καστελόριζο



Εικόνα 1.6 Νεοκλασικά στη Σύμη

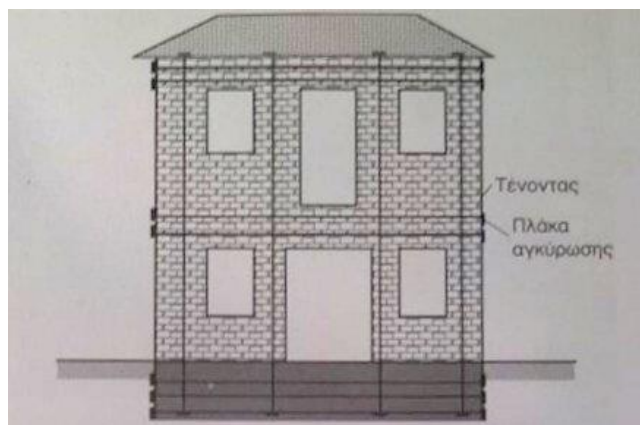
Από την ανωτέρω σύντομη ιστορική αναδρομή απορρέει το συμπέρασμα εκείνο περί της ανάγκης για ενίσχυση των κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία. Και τούτο διότι αποτελούν πυλώνες της ιστορίας του κάθε εκεί τόπου. Εξ'ού και ο χαρακτηρισμός τους ως διατηρητέα μνημεία. Μνημεία, δηλαδή, που χρήζουν τέτοιων ενεργειών ώστε να αυξηθεί ο χρόνος ζωής τους. Την οποία δε ζωή τους φαίνεται να απειλεί κυρίως το φαινόμενο των σεισμικών διεγέρσεων, τόσο εκείνων που έγιναν όσο και εκείνων που θα γίνουν. Αποτέλεσμα αυτών που έγιναν υπήρξε η ανάπτυξη ρηγματώσεων επί των κτιρίων, η οποία και εξακολουθεί να επηρεάζει την σεισμική συμπεριφορά τους. Η κατάσταση αυτή της μόνιμης παραμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της υπολειπόμενης σεισμικής μετακίνησης του κτιρίου. Το οικοδόμημα, λοιπόν, «θυμάτα» τι έχει υποστεί!



Εικόνα 1.7 Διατμητική αστοχία λόγω σεισμού σε ναό στην Κω

Η σεισμική αναβάθμιση ιστορικών κατασκευών οδηγεί πολλές φορές σε σημαντικές αλλοιώσεις της αρχικής μορφής αυτών των κτιρίων από τοιχοποιία. Ωστόσο μία μέθοδος η οποία δεν είναι ευρέως διαδεδομένη για την ενίσχυση υφιστάμενων κτιρίων και μη, είναι η μέθοδος της προεντάσεως. Η ενίσχυσή τους με τη χρήση προεντεταμένων στοιχείων, προσφέρει τη δυνατότητα σημαντικής μείωσης της οπτικής διαστρέβλωσης της αρχικής μορφής των ιστορικών κατασκευών.

Προένταση, εννοείται η επιβολή μιας επιπρόσθετης, ηθελημένης και κατάλληλα προσχεδιασμένης θλιπτικής φόρτισης η οποία έχει ως σκοπό την βελτίωση της στατικής λειτουργίας του φορέα δια της μεγίστης κατά το δυνατόν εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων των υλικών. Η ιδέα για την επιβολή της επιπρόσθετης θλιπτικής δύναμης με τη χρήση χαλύβδινων ράβδων που τανύονται, είναι παλιά και διατυπώθηκε από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Η υλοποίηση της όμως δεν ήταν δυνατή διότι η προτάνυση αυτή και η αρχική δύναμη που αναπτυσσόταν κατ' αυτόν τον τρόπο στις διατομές του στοιχείου με τους χάλυβες μειωνόταν πολύ ή και εκμηδενιζόταν βαθμιαίως με την πάροδο του χρόνου λόγω ερπισμού και συστολής ξηράνσεως του υλικού στο οποίο ασκούταν η προένταση, καθώς και χαλάρωση του χάλυβα. Πράγμα που υποδηλώνει την μη αξιόπιστη επιβολή της προέντασης την εποχή εκείνη.



Εικόνα 1.8 Διάταξη τενόντων σε διώροφο κτίριο

Ωστόσο πλέον οι χρήσεις της προεντεταμένης τοιχοποιίας ποικίλουν. Έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή δεξαμενών υδάτων, σεισμικής ενίσχυσης τοιχοποιιών, συγκράτησης γαιών, βάθρων γεφυρών, αντηρίδων, προκατασκευασμένης τοιχοποιίας, πολυώροφων κτιρίων από τοιχοποιία. Με την αναφορά των προηγούμενων εφαρμογών αποδεικνύεται ότι τα υλικά έχουν εξελιχθεί με τέτοιο τρόπο, που να είναι αξιόπιστη η επιβολή της προεντάσεως στις μέρες μας.

1.2 Προένταση και Τοιχοποιία

Η τοιχοποιία διαθέτει σημαντική θλιπτική αντοχή, ενώ η εφελκυστική αντοχή της είναι αμελητέα. Η συμπεριφορά της τοιχοποιίας είναι η βέλτιστη, όταν ασκούνται σε αυτήν κατακόρυφα θλιπτικά φορτία. Τα οριζόντια φορτία λόγω σεισμού, ανέμου ή πίεσης γαιών ασκούν διατμητική και καμπτική καταπόνηση στην τοιχοποιία. Η αντιμετώπιση των δυναμικών φορτίσεων πραγματοποιείται συνήθως με χρήση οπλισμού ή μέσω εγκιβωτισμού της τοιχοποιίας. Μια νέα τεχνική η οποία έχει αναπτυχθεί είναι η εφαρμογή προέντασης στην τοιχοποιία. Η τεχνική της προέντασης δεν βελτιώνει μόνον τη συμπεριφορά νέων κατασκευών από τοιχοποιία, μα παρέχει επίσης μια νέα μέθοδο για την αποκατάσταση υφιστάμενων κτιρίων, τα οποία υπόκεινται σε οριζόντιες δράσεις.

Η δράση των σεισμών προκαλεί διαχρονικά βλάβες στις υφιστάμενες και κυρίως τις ιστορικές κατασκευές από τοιχοποιία. Σε ιστορικές κατασκευές υπάρχει η ανάγκη, το εξωτερικό κέλυφος να διατηρήσει την αρχική του μορφή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της προέντασης, η οποία είναι μια τεχνική ευέλικτη, οικονομική, δεν έχει αρνητική επίπτωση στην αισθητική του κτιρίου και έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Η ενίσχυση της τοιχοποιίας με προένταση πραγματοποιείται για να αποφευχθεί η ψαθυρή εκτός επιπέδου αστοχία της. Παράλληλα, είναι σημαντικό, ο τένοντας να παραμείνει στην ελαστική περιοχή, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα επαναφοράς του συστήματος στην αρχική του γεωμετρία. Οι τένοντες, οι οποίοι διαπερνούν τα δάπεδα, επιτρέπουν τη σύζευξη τοίχων και στοιχείων των πατώματων από σκυρόδεμα, μειώνοντας τον κίνδυνο αστοχίας της κατασκευής από σεισμικές δράσεις.

Οι τένοντες προέντασης βρίσκονται είτε στο κέντρο του τοίχου, είτε σε κάποια εκκεντρότητα σε σχέση με αυτόν. Συνήθως είναι κατακόρυφοι. Για κάποια ειδική κατασκευή, όπως οι σύνδεσμοι στο επίπεδο του πατώματος, ενδέχεται να τοποθετούνται και οριζόντια. Η προεντεταμένη τοιχοποιία, χωρίς συνοχή τενόντων με τον τοίχο, παρουσιάζει απόσβεση ίση περίπου με εκείνη της άοπλης τοιχοποιίας. Με την τοποθέτηση αποσβεστήρων, επιτυγχάνεται και η ανάπτυξη απόσβεσης στον τοίχο. Οι αποσβεστήρες μπορεί να είναι ράβδοι από οπλισμό, οι οποίοι θα παραμορφώνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Οι ράβδοι αυτοί είναι εγκιβωτισμένες σε χαλύβδινους σωλήνες, για την αποφυγή λυγισμού κατά την ανάπτυξη θλιπτικών δυνάμεων. Για να επιτευχθούν συνθήκες μη συνοχής των τενόντων με την τοιχοποιία, οι τένοντες τοποθετούνται μέσα σε χαλύβδινους σωλήνες.

Το επίπεδο της δύναμης προέντασης μειώνεται εξαιτίας του ερπυσμού και της συστολής ξήρανσης της τοιχοποιίας, καθώς επίσης και εξαιτίας της χαλάρωσης των τενόντων. Ακόμη, πιθανές μειώσεις οφείλονται στην μείωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, στην κάθιση της τοιχοποιίας καθώς και

στις απώλειες λόγω ελαστικής παραμόρφωσης της τοιχοποιίας. Παράλληλα, η δύναμη προέντασης των τενόντων σε συνάφεια με την τοιχοποιία μειώνεται κατά μήκος του τένοντα λόγω δυνάμεων τριβής. Η δρώσα δύναμη προέντασης διαφοροποιείται λοιπόν, ανάλογα με τη χρονική στιγμή εξέτασης της τοιχοποιίας και για αυτό απαιτείται η εξέταση σε διάφορα στάδια και συνθήκες φόρτισης της κατασκευής, στη διάρκεια ζωής της.



Εικόνα 1.9 Τένοντας προέντασης και πλάκα αγκύρωσης

2. Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ :

2.1 Η μηχανική της τοιχοποιίας

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε για πολύ λίγο για τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας, καθώς αυτό το κομμάτι έχει αναπτυχθεί αρκετά σε προηγούμενες έρευνες. Ωστόσο είναι απαραίτητο για την πληρότητα της εργασίας αυτής.

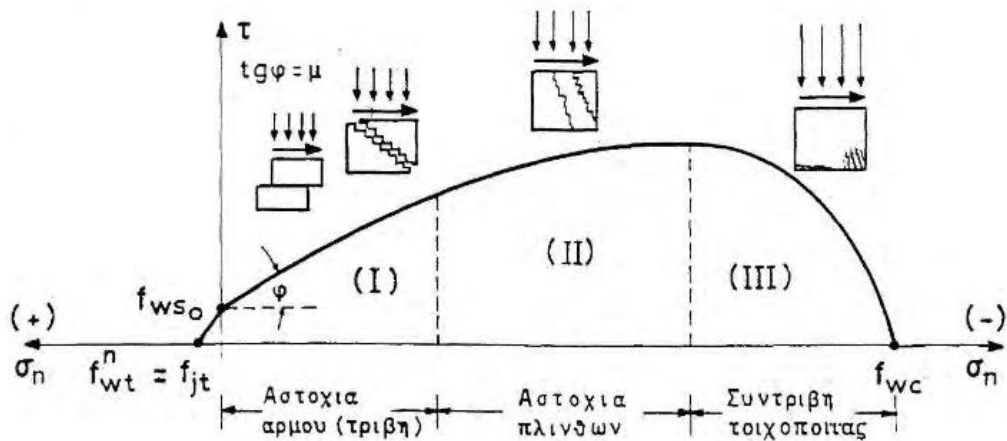
Χρήσιμη για το σχεδιασμό υπό σεισμικά φορτία είναι η περιβάλλουσα αστοχίας τοιχοποιίας υπό συνδυασμό (τ, σ_n). Σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Χαμηλές τιμές σ_n (περιοχή I) : Αστοχία τριβής -ολίσθησης οριζόντιου αρμού ή κλιμακωτή αποκόλληση και ολίσθηση κατακόρυφων και οριζόντιων αρμών. Αποδεκτό γενικά το γραμμικό κριτήριο αστοχίας Coulomb:

$$\tau_u = f_{ws} = f_{wso} + \mu \sigma_n \quad (\text{όπου η θλιπτική } \sigma_n \text{ θεωρείται θετική)}$$

- Μέσες τιμές σ_n (περιοχή II) : Αστοχία από λοξή ρηγμάτωση που διαπερνά και πλίνθους. Συνήθως εμφανίζεται σε πεσοούς μεταξύ ανοιγμάτων .

- Υψηλές τιμές σ_n (περιοχή III) : Αστοχία από συντριβή θλιβόμενης γωνίας. Αστοχία καμπτικού τύπου η οποία προηγείται της διατμητικής αστοχίας.
- Περιοχή εφελκυστικής ορθής τάσης σ_n : Η περιβάλλουσα αστοχίας είναι σχεδόν ευθεία γραμμή με έντονη κλίση καθώς συνήθως ισχύει $f_{wso} > f_{jt}$.



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα σ - τ για την αστοχία της τοιχοποιίας

- **Θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.**

Κατά τον Ευρωκώδικα 6 η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή f_{wk} της άοπλης τοιχοποιίας από κονίαμα γενικής χρήσης με πληρωμένους τους κατακόρυφους αρμούς, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_{wk} = K f_b^{0.7} f_m^{0.3} \quad (MPa)$$

Όπου :

K είναι συντελεστής εξαρτώμενος από τον τύπο των τοιχοσωμάτων και του κονιάματος.

f_b είναι η ανηγμένη αντοχή των τοιχοσωμάτων.

f_m η μέση θλιπτική αντοχή του συνδετικού κονιάματος.

- **Διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας.**

Η διατμητική τάση αστοχίας μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση :

$$\tau_u = f_{vwo} + 0.40\sigma_d$$

Όπου :

τ_u είναι η ονομαστική τιμή της διατμητικής τάσης αστοχίας.

f_{vw} είναι η διατμητική αντοχή όταν η κατακόρυφη ορθή τάση σ_d είναι μηδέν, δηλαδή η συνάφεια μεταξύ λιθοσώματος και κονιάματος.

σ_d είναι η κατακόρυφη ορθή τάση.

- *Μέτρο Ελαστικότητας τοιχοποιίας.*

Σύμφωνα με τους Αμερικάνικους Κανονισμούς το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$E = \frac{1}{\frac{\delta}{E_b} + \frac{1-\delta}{E_m}}$$

Όπου $\delta = t_b / (t_b + t_m)$, t_b =ύψος λιθοσώματος, t_m =πάχος αρμών, E_b = μέτρο ελαστικότητας λιθοσώματος και E_m =μέτρο ελαστικότητας κονιάματος αρμών.

Το μέτρο διάτμησης G της τοιχοποιίας είναι περίπου ίσο με το 40% του μέτρου ελαστικότητας .

2.2 Η μηχανική της προεντάσεως

Ανάλογα με τον τρόπο συνεργασίας του χάλυβα προέντασης και της τοιχοποιίας διακρίνονται δύο περιπτώσεις προεντεταμένης τοιχοποιίας:

- **Τένοντες σε συνεργασία με την τοιχοποιία (bonded tendons)**

Είναι η συνήθης περίπτωση εφαρμογής προέντασης. Σε αυτήν την περίπτωση μετά την επιβολή της προβλεπόμενης προέντασης πληρώνονται με πίεση οι σωλήνες προέντασης με ειδικό τοιμεντένεμα και κατ' αυτόν τον τρόπο αποκαθίσταται η συνάφεια και η συνεργασία μεταξύ του τένοντα και της περιβάλλουσας τοιχοποιίας. Η αποκατάσταση της συνάφειας και της συνεργασίας του τένοντα με της τοιχοποιίας έχει μεγάλα πλεονεκτήματα τόσο για την ασφάλεια του έργου από πλευράς τοπικών αστοχιών όσο και για την συντήρηση του τένοντα έναντι διάβρωσης. Επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι με την τοποθέτηση τοιμεντενέματος στους σωλήνες προεντάσεως βελτιώνει την εκτός επιπέδου συμπεριφορά της τοιχοποιίας. Ωστόσο το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν επιτρέπει την επιβολή πρόσθετης τάνυσης κατά την διάρκεια της ζωής του έργου.

- **Τένοντες χωρίς συνεργασία με την τοιχοποιία (unbonded tendons)**

Σε αυτήν την περίπτωση δεν προβλέπεται η αποκατάσταση της συνάφειας και της συνεργασίας του τένοντα με την τοιχοποιία μετά την επιβολή της προέντασης. Έχει σημαντικά μειονεκτήματα σχετικά με την ασφάλεια και την εξασφάλιση των χαλύβων προέντασης έναντι διάβρωσης. Ένα ακόμη μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι σε πλευρικά φορτία είναι πιο ευαίσθητη σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο, με αποτέλεσμα μετά από κάποια σεισμική μετακίνηση να μην έχει αρκετή υπολειπόμενη παραμόρφωση να προσφέρει η τοιχοποιία. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπει την επιβολή πρόσθετης τάνυσης κατά την διάρκεια της ζωής του έργου.

2.2.1 Υλικά και μέσα προεντάσεως

Τα βασικά υλικά για την υλοποίηση της προεντεταμένης τοιχοποιίας είναι :

- Χάλυβες Προεντάσεως που περιλαμβάνουν ραβδωτές ή λείες ράβδους (deformed or smooth round bars), ψυχρής έλασης σύρματα (cold drawn wires), συρματόσχοινα (stands) και καλώδια.

Για τους χάλυβες προέντασης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 ορίζονται οι χαρακτηριστικές τιμές των μεγεθών :

- ✓ Εφελκυστική αντοχή (f_{pk})
- ✓ Συμβατικό όριο διαρροής 0,1% ($f_{p0.1k}$)
- ✓ Επιμήκυνση υπό το μέγιστο φορτίο (ϵ_{uk})

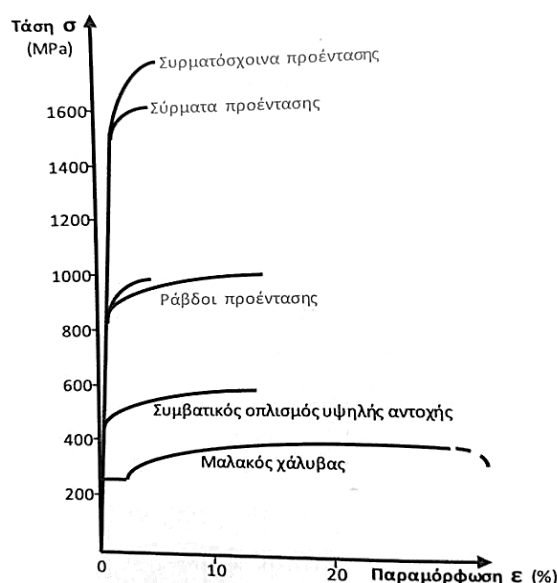
Γενικά θεωρείται ότι οι απαιτήσεις του EC2 για την ποιότητα και τις ιδιότητες των χαλύβων προέντασης ικανοποιούνται όταν οι μέθοδοι παραγωγής των χρησιμοποιούμενων χαλύβων καθώς και οι μέθοδοι δοκιμής και συμμόρφωσης ακολουθούν το EN10138.

Οι χάλυβες προέντασης κατηγοριοποιούνται με βάση τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τις τιμές των μεγεθών
 - ✓ Αντοχή $f_{p0.1k}$ κατά το συμβατικό όριο διαρροής 0,1%
 - ✓ Το λόγο $f_{pk} / f_{p0.1k}$
 - ✓ Την επιμήκυνση υπό το μέγιστο φορτίο ϵ_{uk}
- Την κατηγορία χαλάρωσης. Ορίζονται τρεις κατηγορίες:
 - ✓ Κατηγορία 1 (σύρματα ή συρματόσχοινα συνήθους χαλάρωσης)
 - ✓ Κατηγορία 2 (σύρματα ή συρματόσχοινα μικρής χαλάρωσης)
 - ✓ Κατηγορία 3 (ράβδοι θερμής έλασης και επεξεργασμένες ράβδοι)

- iii. Μέγεθος.
- iv. Χαρακτηριστικά επιφάνειας χάλυβα.

Επιπλέον ο χάλυβας ως υλικό ανάλογα με τις διάφορες ποιότητες του παρουσιάζει υψηλές αντοχές και σημαντική δυνατότητα για μεταλαστική παραμόρφωση που αποδίδεται με τον όρο πλαστιμότητα ή ολκιμότητα. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων διαφόρων τύπων χαλύβων. Υψηλή πλαστιμότητα παρουσιάζουν οι χάλυβες χαμηλής αντοχής ενώ η πλαστιμότητα μειώνεται με την αύξηση της αντοχής και ιδιαίτερα στους χάλυβες προέντασης.



Εικόνα 2.2 Συγκριτική παρουσίαση των διαφόρων τύπων χαλύβων και επιρροή της αντοχής στην πλαστιμότητα του χάλυβα.

- Τοιμεντένεμα είναι το υλικό που εισπιέζεται μέσα στους σωλήνες προέντασης μετά την επιβολή της προέντασης, με σκοπό να αποκατασταθεί η συνάφεια μεταξύ των τενόντων και της περιβάλλουσας τοιχοποιίας.
- Σωλήνες Προεντάσεως είναι οι σωλήνες καθοδηγήσεως των τενόντων στη συνήθη περίπτωση επιβολής της προέντασης. Οι τένοντες είναι εγκιβωτισμένοι μέσα σε ανάγλυφους σωλήνες προέντασης από χαλυβδόφυλλα ψυχρής έλασης οι οποίοι μερικές φορές είναι γαλβανισμένοι ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Μετά την επιβολή της προέντασης εισπιέζεται στους σωλήνες προέντασης ένεμα με ειδική τοιμεντοκονία ή άλλο αντισκωριακό υλικό ώστε οι τένοντες να αποκτήσουν συνάφεια με την τοιχοποιία και να ενσωματωθούν πλήρως με αυτό. Σε ορισμένες περιπτώσεις για βέλτιστη αντισκωριακή προστασία είναι δυνατή η χρήση σωλήνων από πολυαιθυλένιο.

- Αγκυρώσεις. Οι μηχανικές αγκυρώσεις των τενόντων χρησιμοποιούνται στην συνήθη περίπτωση επιβολής της προέντασης διακρίνονται σε :
 - ο **Ενεργές** αγκυρώσεις είναι εκείνες που επιτρέπουν την τάνυση των τενόντων και εξασφαλίζουν αμέσως μετά την ασφαλή αγκύρωση τους. Είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να διευκολύνουν τη μεταφορά της δύναμης προέντασης στον τένοντα από τους γρύλους (στην περίπτωση που τανύουμε συρματόσχοινο) κατά την διάρκεια της τάνυσης. Συνήθως η αγκύρωση επιτυγχάνεται με σφήνες οι οποίες συγκρατούν τον τένοντα. Κατά τη διάρκεια της ενσφήνωσης του τένοντα με την σφήνα μικρό μέρος της παραμόρφωσης του τένοντα χάνεται διότι ο τένοντας ολισθαίνει μέσα στην σφήνα μέχρι να εξασφαλισθεί η πλήρης ενσφήνωση και αγκύρωση του. Η μικρή ολίσθηση που προκαλεί την μείωση της εφελκυστικής παραμόρφωσης έχει ως τελικό αποτέλεσμα την τοπική μείωση της δύναμης προέντασης. Η μείωση αυτή γίνεται αμέσως μετά την αγκύρωση και ανήκει στις άμεσες ή στιγμιαίες απώλειες προέντασης.
 - ο **Νεκρές** αγκυρώσεις είναι εκείνες που χρησιμοποιούνται μόνο για την αγκύρωση των τενόντων χωρίς να επιτρέπουν και την τάνυση τους. Αυτές χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που οι αγκυρώσεις πρέπει να εγκιβωτισθούν μέσα στο σκυρόδεμα των θεμελίων, δηλαδή σε θέσεις που δεν θα είναι προσπελάσιμες.
- Γρύλλοι και αντλίες προέντασης, είναι ειδικές συσκευές που εκτελούν την τάνυση των τενόντων και την αγκύρωσή τους αμέσως μετά την χρήση σφηνών. Υπάρχουν γρύλλοι για την τάνυση μεμονωμένων συρματόσχοινων κα γρύλλοι για την ταυτόχρονη τάνυση πολλών συρματόσχοινων ταυτόχρονα. Οι πρώτοι είναι ελαφροί και κινούνται χωρίς την χρήση γερανού ενώ οι δεύτεροι απαιτούν τη βοήθεια γερανού.



Εικόνα 2.3 Επιβολή προέντασης σε τοιχοποιία με την χρήση αντλίας προέντασης

- Συστήματα προέντασης. Τα μέσα εφαρμογής της προέντασης κατασκευάζονται από ειδικές εταιρίες και πρέπει για την επιτυχή εφαρμογή της να χρησιμοποιούνται κάθε φορά μέσα εφαρμογής συμβατά μεταξύ τους. Προς τον σκοπό αυτό κάθε εταιρία που παράγει μέσα εφαρμογής προέντασης παράγει ένα ολοκληρωμένο σύνολο εξαρτημάτων και εξοπλισμού εφαρμογής που ονομάζεται σύστημα προέντασης και περιλαμβάνει ιδιαίτερες οδηγίες και τεχνικά χαρακτηριστικά.

2.2.2 Στιγμαίεις απώλειες προεντάσεως

Η δύναμη προέντασης θα ήταν επιθυμητό μετά την τάνυση και την αγκύρωση του τένοντα να παραμένει αμετάβλητη όπως επιβάλλεται τόσο στην θέση αγκύρωσης όσο και σε όλες τις θέσεις από τις οποίες διέρχεται κατά μήκος του στοιχείου. Αμέσως όμως μετά την τάνυση και την αγκύρωση του τένοντα παρατηρείται πτώση της δύναμης προέντασης η τιμή της οποίας δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται από θέση σε θέση κατά μήκος της τροχιάς του. Μέρος της μείωσης της αρχικά επιβαλλόμενης δύναμης προέντασης αλλά και η διαφοροποίηση της τιμής της κατά μήκος του στοιχείου παρατηρείται αμέσως μετά την τάνυση και αγκύρωση του τένοντα ενώ επί πλέον μείωση συμβαίνει με την πάροδο του χρόνου κατά την διάρκεια της ζωής του έργου. Οι μειώσεις της δύναμης προέντασης που παρατηρούνται αμέσως μετά την τάνυση και αγκύρωση του τένοντα ονομάζονται στιγμιαίες απώλειες.

Οι στιγμιαίες απώλειες της δύναμης προέντασης οφείλονται σε τρεις κυρίως αιτίες ως εξής:

- Απώλειες λόγω τριβών που αναπτύσσονται κατά την τάνυση (καθώς ο τένων τραβιέται προς τα έξω) μεταξύ του τένοντα και του σωλήνα προέντασης.
- Απώλειες λόγω ολίσθησης του τένοντα κατά τη στιγμή της αγκύρωσης του.
- Απώλειες λόγω ελαστικής βράχυνσης της τοιχοποιίας στις περιπτώσεις που η συνολική προένταση επιβάλλεται από πολλούς τένοντες.

Απώλειες λόγω τριβών

- *Η τριβή αντίζεται στην επιμήκυνση του τένοντα*

Η δύναμη της προέντασης που επιβάλλεται στην ακραία διατομή ενός πεσσού μεταβιβάζεται κατά μήκος του στοιχείου χάριν της δυνατότητας για

ελεύθερη επιμήκυνση που έχει ο τένοντας καθ' όλο το μήκος του. Για να είναι δυνατή όμως η ελεύθερη επιμήκυνση κατά μήκος του τένοντα θα πρέπει να επιτυγχάνεται κατά την εφαρμογή της προέντασης ανεμπόδιστη μετακίνηση του τένοντα σε όλα τα σημεία κατά μήκος της τροχιάς του.

Στην πράξη όμως η μετακίνηση του τένοντα κατά μήκος της τροχιάς του μόνο σε ιδανικές συνθήκες μπορεί να θεωρηθεί τελείως ανεμπόδιστη. Αντιθέτως σε κάθε θέση ανάλογα με τη μορφή της τροχιάς του και τη φύση των υλικών δημιουργούνται δυσκολίες που αντιτίθενται στην απρόσκοπτη μετακίνηση του τένοντα. Οποιαδήποτε δυσκολία στη μετακίνηση σημαίνει ότι αναπτύσσεται κάποια δύναμη που αντιτίθεται στην μετακίνηση. Σε αυτή τη περίπτωση για να πραγματοποιηθεί τελικά η επιμήκυνση ένα μέρος της δύναμης του τένοντα καταναλώνεται για να εξισορροπηθεί η αντιτιθέμενη δύναμη.

Οι δυνάμεις που αντιτίθενται στη μετακίνηση και προκαλούν μείωση της δύναμης του τένοντα οφείλονται σε δράσεις τριβής οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ του τένοντα και του σωλήνα προέντασης κατά την επιβολή της τάνυσης και επιμήκυνσης του τένοντα. Τα κύρια αίτια της ανάπτυξης της τριβής αυτής είναι :

- Η επαφή του τένοντα με τα τοιχώματα του σωλήνα προέντασης μέσα στον οποίο είναι τοποθετημένος.
- Η συσσώρευση (στρίμωγμα) των συρματόσχοινων από τα οποία αποτελείται ο τένοντας προς την πλευρά που ο τένοντας έρχεται σε επαφή με τον σωλήνα προέντασης.
- Η πιθανή οξειδωση του σωλήνα προέντασης ή και του τένοντα διότι με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η επιφανειακή τραχύτητα και άρα και η αναπτυσσόμενη δράση τριβής.
- Η χρήση γαλακτώματος προστασίας μέσα στο σωλήνα προέντασης είναι δυνατό να αυξάνει την τριβή.

Είναι προφανές ότι από τις παραπάνω παραμέτρους εξαρτάται και ο συντελεστής τριβής μεταξύ του τένοντα και του σωλήνα προέντασης.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις αναμένεται οι τριβές να έχουν τις μεγαλύτερες τιμές τους στις θέσεις όπου ο τένοντας καμπυλώνεται λόγω αλλαγής διεύθυνσης (περιοχές εκτροπής του τένοντα) διότι έτσι έρχεται σε επαφή και σύρεται κατά την επιμήκυνση του επάνω στα τοιχώματα του σωλήνα προέντασης. Αντιθέτως αναμένεται να υπάρχει ελάχιστη τριβή ή και να μην υπάρχει καθόλου, στις περιοχές και τις τις οποίες ο τένοντας είναι ευθύγραμμος. Σε αυτές ο τένων έρχεται σε επαφή με τον σωλήνα προέντασης χωρίς να αναπτύσσεται κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής και άρα αναμένεται να υπάρχει ελάχιστη ή και καθόλου δράση τριβής. Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις αυτές οι απώλειες λόγω τριβών διακρίνονται σε :

- Απώλειες τριβών στις περιοχές εκτροπής του τένοντα.
- Απώλειες τριβών σε ευθυγραμμία.

Κατά τους ελέγχους των προεντεταμένων στοιχείων στις οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας και αστοχίας είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η δύναμη προέντασης σε κάθε θέση κατά μήκος της τροχιάς του τένοντα. Είναι άρα απαραίτητος ο υπολογισμός των απωλειών προέντασης λόγω των τριβών κατά μήκος του τένοντα. Στις επόμενες παραγράφους αναπτύσσεται η αναγκαία μεθοδολογία για τον υπολογισμό των απωλειών προέντασης λόγω τριβών στις θέσεις εκτροπής του τένοντα καθώς και σε ευθυγραμμία.

ο *Απώλειες τριβών λόγω εκτροπής του τένοντα*

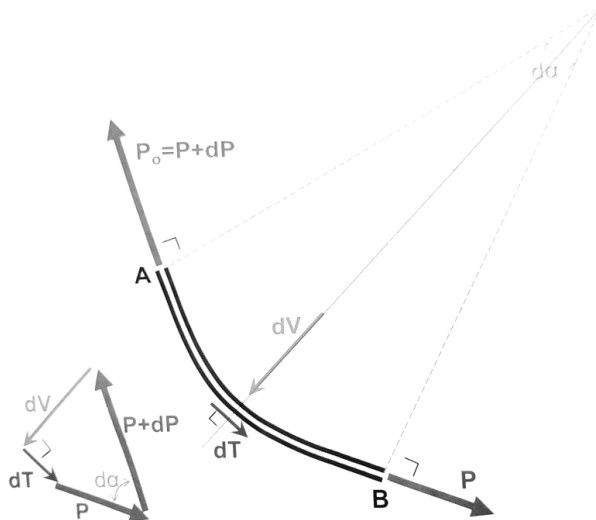
Για τον υπολογισμό των τριβών σε θέση μεταβολής της διεύθυνσεως του τένοντα θεωρείται ένα στοιχειώδες τμήμα του τένοντα κατά μήκος του οποίου ο τένων υφίσταται μία στοιχειώδη εκτροπή ίση με da όπως φαίνεται στο σχ.1

Στην αρχή της εκτροπής του τένοντα (θέση Α στο σχ.1) έστω ότι η δύναμη προέντασης είναι P_0 και ότι στο τέλος της στοιχειώδους εκτροπής da του τένοντα (θέση Β) η δύναμη προέντασης είναι P . Η P_0 είναι μεγαλύτερη από ότι είναι η P λόγω των απωλειών μέσα στο στοιχειώδες τμήμα. Έστω ότι dP η απώλεια προέντασης, οπότε $P_0 = P + dP$.

Δεδομένου ότι στα δύο άκρα του στοιχειώδους τμήματος ο τένων υφίσταται ισχυρό εφελκυσμό έχει την τάση να καταστεί ευθύγραμμος. Για να διατηρείται η εκτροπή και να παραμένει ο τένων καμπύλος υφίσταται ισχυρή δύναμη εκτροπής dV από την τοιχοποιία. Η δύναμη εκτροπής είναι κάθετη στην επιφάνεια επαφής μεταξύ του τένοντα και του σωλήνα προέντασης και αποτελεί με αυτόν το τρόπο τη δύναμη που είναι απαραίτητη ώστε να αναπτυχθεί η δράση τριβής dT που αντιτίθεται στην μετακίνηση του τένοντα.

Η δράση τριβής dT είναι αντίθετη στην δύναμη προέντασης και προκαλεί μείωση της αρχικής τιμής της P_0 σε P . Άρα για τη στοιχειώδη εκτροπή da ισχύει ότι

$$dT = -dP. \quad (1)$$



Εικόνα 2.4 Εκτροπή του τένοντα σε στοιχειώδες τμήμα του τένοντα και δυναμοτρίγωνο ισορροπίας.

Δεδομένου ότι η δύναμη εκτροπής dV δρα κάθετα στην επιφάνεια της τριβής (σχ.1) από την εξίσωση της τριβής προκύπτει η σχέση

$$dT = \mu dV \quad (2)$$

όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής μεταξύ του τένοντα και του σωλήνα προέκτασης.

Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει ότι:

$$dP = -\mu dV \quad (3)$$

Από την ισορροπία των δυνάμεων P_0 , P , dV , dT σχηματίζεται το δυναμοπολύγωνο που φαίνεται στο σχ.1 και το οποίο είναι κατά προσέγγιση ορθογώνιο τρίγωνο. Από το δυναμοτρίγωνο αυτό προκύπτει η εξίσωση :

$$dV \approx P da \quad (4)$$

Αντικαθίσταται η τιμή dV από τη σχέση (4) στη σχέση (3) και προκύπτει ότι

$$dP = -\mu P da \rightarrow \int \frac{dP}{P} = -\int \mu da \rightarrow \ln P = -\mu a + k \quad (5)$$

Η σχέση (5) γράφεται υπό τη μορφή $P = ce^{-\mu a}$ και θεωρούντες ως αρχικές συνθήκες ότι στην αρχή του τένοντα για εκτροπή $a=0$ πρέπει να έχουμε ως αποτέλεσμα ότι $P=P_0$ προκύπτει η σχέση

$$P = P_0 e^{-\mu a} \quad (6)$$

Οι τιμές μa είναι πολύ μικρές ($\mu a < 0.1$) και υπενθυμίζεται ότι στη γνωστή μαθηματική παράσταση $e^{-x} = 1 - \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \dots$ (7)

Για μικρές τιμές του x μπορεί να ληφθούν υπόψη μόνο οι δύο πρώτοι όροι, δηλαδή

$e^{-x} = 1 - x$, οπότε με ικανοποιητική προσέγγιση η σχέση (6) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$P = P_0(1 - \mu\alpha) \quad (8)$$

Όπου μ ο συντελεστής τριβής και

α η εκτροπή σε rad

Τονίζεται ότι οι σχέσεις (6) και (8) είναι οι βασικές σχέσεις υπολογισμού των απωλειών λόγω τριβής σε θέσεις εκτροπής του τένοντα.

ο *Απώλειες τριβών σε ευθυγραμμία του τένοντα*

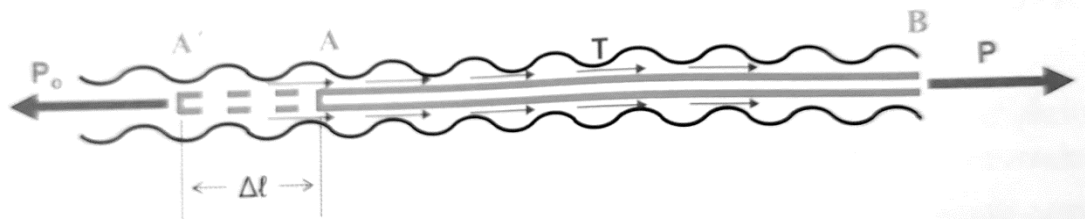
Στις περιοχές του προεντεταμένου στοιχείου κατά τις οποίες η τροχιά του τένοντα είναι ευθύγραμμη ο τένων έρχεται σε επαφή με τον σωλήνα προέντασης χωρίς να αναπτύσσεται κάθετη δύναμη στο επίπεδο επαφής και άρα αναμένεται να υπάρχει ελάχιστη ή και καθόλου τριβή. Εξάλλου είναι γνωστό ότι οι δράσεις τριβής είναι ανάλογες της δύναμης που δρα κάθετα στο επίπεδο τριβής.

Παρ' όλα αυτά όμως, παρατηρούνται απώλειες της δύναμης προέντασης και κατά μήκος ευθύγραμμων τενόντων. Παρατηρείται δηλαδή ανάπτυξη απωλειών οι οποίες οφείλονται σε δράσεις τριβής μεταξύ του τένοντα και του σωλήνα που τον περιβάλλει χωρίς όμως να αναπτύσσονται δυνάμεις κάθετες στο επίπεδο τριβής. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί σε πρώτη προσέγγιση ένα παράδοξο πρόβλημα. Παρακάτω παρουσιάζεται μια προσέγγιση του προβλήματος αυτού η οποία δίδει απαντήσεις και καταλήγει σε σχέσεις που περιγράφουν το φαινόμενο με ικανοποιητική ακρίβεια για τις ανάγκες του σχεδιασμού των προεντεταμένων στοιχείων.

Έστω ευθύγραμμος τένων ο οποίος τανύεται από τη μία άκρη του (θέση Α στο σχ.2.5). Το άκρο Α κατά την τάνυση κινείται προς την τελική θέση Α' και μετακινείται κατά το μήκος Δl της επιμήκυνσης του τένοντα. Δεδομένου ότι ο σωλήνας προέντασης δεν είναι απολύτως λείος αλλά φέρει εξοχές κατά την μετακίνηση ο τένων συναντά αντίσταση από τις εξοχές που συναντά. Η αντίσταση αυτή αντιτίθεται στη μετακίνηση και μπορεί να θεωρηθεί ως τριβή. Προφανώς το μέγεθος της αντίστασης που αναπτύσσεται εξαρτάται από το πόσες εξοχές συναντά ο τένων κατά την μετακίνηση του και δεδομένου ότι οι εξοχές στο σωλήνα προέντασης είναι ομοιόμορφες τελικά η αντίσταση εξαρτάται από το πόση θα είναι η επιμήκυνση του τένοντα. Άρα μπορεί να γίνει αποδεκτό ότι η αναπτυσσόμενη αντίσταση είναι ανάλογη με το μέγεθος Δl της επιμήκυνσης του τένοντα και έτσι να θεωρηθεί ότι η τριβή T που προκαλεί τις απώλειες περιγράφεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$T = \lambda \Delta l \quad (9)$$

όπου λ μία σταθερά που εκφράζει την αναλογία της τριβής σε ευθυγραμμία προς το μήκος Δl της επιμήκυνσης του τένοντα η οποία εξαρτάται από την φύση των υλικών.



Εικόνα 2.5 Επιμήκυνση τένοντα κατά την τάση σε ευθύγραμμο τένοντα και απώλειες λόγω τριβών με τον σωλήνα

Από την ισορροπία των δυνάμεων που δρουν στο τένοντα (σχ.2) προκύπτει ότι $P_0 = P + T$ (10)

Από τη σχέση $\epsilon_p = \frac{\Delta l}{l} \rightarrow \Delta l = \epsilon_p l$ και δεδομένου ότι $\sigma_p = \epsilon_p E_p$

προκύπτει ότι $\Delta l = \epsilon_p l = \frac{\sigma_p}{E_p} l$ (11)

Η τάση κατά μήκος του τένοντα μπορεί να δοθεί κατά μέσον όρο από τη σχέση

$$\sigma_p = \frac{P_{mean}}{A_p} = \frac{P_0 + P}{2A_p} \quad (12)$$

και αντικαθιστώντας την τιμή του σ_p από τη σχέση (12) στη σχέση (11) προκύπτει ότι

$$\Delta l = \frac{\sigma_p}{E_p} l = \frac{P_0 + P}{2} \frac{1}{E_p A_p} l \quad (13)$$

από αντικατάσταση της τιμής του Δl από τη σχέση (13) στη σχέση (9) της τριβής προκύπτει ότι

$$T = \lambda \Delta l = \frac{\lambda}{E_p A_p} \frac{P_0 + P}{2} l \rightarrow T = k_1 \frac{P_0 + P}{2} l \quad (14)$$

όπου $k_1 = \frac{\lambda}{E_p A_p}$ ένας συντελεστής που εξαρτάται απολύτως από τα υλικά εφαρμογής της προέντασης.

Η τιμή της τριβής T από τη σχέση (14) αντικαθίσταται στην εξίσωση της ισορροπίας στη σχέση (10) και προκύπτει

$$P_0 = P + T = P + k_1 \frac{P_0 + P}{2} l = P + \frac{k_1 l}{2} (P_0 + P) \rightarrow P_0 - P_0 \frac{k_1 l}{2} = P + P \frac{k_1 l}{2} \rightarrow$$

$$P_0 \left(1 - \frac{k_1 l}{2}\right) = P \left(1 + \frac{k_1 l}{2}\right) \rightarrow P = P_0 \frac{1 - \frac{k_1 l}{2}}{1 + \frac{k_1 l}{2}} \quad (15)$$

Υπενθυμίζεται ότι για μικρές τιμές του x ισχύει η γνωστή μαθηματική παράσταση

$\frac{1-\frac{x}{2}}{1+\frac{x}{2}} \approx 1-x$, οπότε η σχέση (15) απλοποιείται στην παρακάτω μορφή

$$P = P_o(1 - k_1l) \quad (16)$$

Η σταθερά k_1 είναι δυνατόν να γραφεί ως γινόμενο μιας νέας σταθεράς k επί τον συντελεστή τριβής μ όπως αυτός ορίζεται στη σχέση (8), δηλαδή

$$k_1 = \mu k \quad (17)$$

Στη σχέση (17) ο συντελεστής k εκφράζει την ισοδυναμία των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται σε ευθυγραμμία με τις δυνάμεις τριβής που θα ανεπτυχθούν στον τένοντα εάν αυτός υφίστατο συγκεκριμένη εκτροπή. Μπορεί δηλαδή να θεωρηθεί ότι δίδει την ισοδύναμη εκτροπή τένοντα ανά μονάδα μήκους ευθύγραμμου τένοντα ώστε στον ευθύγραμμο τένοντα και στον υποθετικό τένοντα με την ισοδύναμη εκτροπή να αναπτύσσονται ίσες δυνάμεις τριβής. Ο συντελεστής k ονομάζεται «αθέλητη γωνία τριβών σε ευθυγραμμία» και αποτελεί σταθερά που εξαρτάται από το σύστημα υλοποίησης της προέντασης. Άρα η σχέση (16) μπορεί να γραφεί με τη μορφή

$$P = P_o(1 - k_1l) \rightarrow P = P_o(1 - \mu kl) \quad (18)$$

Κατ' αναλογία όσων αναφέρθηκαν στις σχέσεις (6) και (8) και με βάση τη μαθηματική παράσταση (7) η σχέση (18) μπορεί να γραφεί και με τη μορφή

$$P = P_o e^{-\mu kl} \quad (19)$$

ο *Γενικές σχέσεις για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω τριβών*

Για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω τριβών κατά μήκος ενός τένοντα χρησιμοποιούνται οι βασικές εξισώσεις (6) ή (8) για τένοντα που υφίσταται εκτροπή και οι σχέσεις (18) ή (19) όταν ο τένων είναι ευθύγραμμος.

Εφόσον απαιτείται να υπολογισθούν οι απώλειες κατά μήκος τένοντα που έχει ευθύγραμμα τμήματα και σημεία ή περιοχές εκτροπής γίνεται πρόσθεση των αντίστοιχων απωλειών. Με χρήση των απλοποιημένων σχέσεων (8) και (18) προκύπτει ότι το σύνολο των απωλειών είναι το άθροισμα των απωλειών λόγω εκτροπής συν τις απώλειες σε ευθυγραμμία. Άρα το σύνολο των απωλειών είναι

- ✓ Απώλειες λόγω εκτροπής α : $(\Delta P)_\alpha = P_o \mu \alpha$
- ✓ Απώλειες σε ευθυγραμμία μήκους l : $(\Delta P)_l = P_o \mu kl$

Άρα η τιμή της δύναμης προέντασης στο τέλος ενός τμήματος l και μετά από εκτροπή ίση με α δίδεται από την σχέση

$$P = P_o - (\Delta P)l - (\Delta P)\alpha \rightarrow P = P_o(1 - \mu \alpha - \mu kl) \quad \text{και άρα}$$

$$P = P_o[1 - \mu(\alpha + kl)] \quad (20)$$

Με χρήση της σχέσης (6) που θεωρείται περισσότερο ακριβής, προκύπτει η σχέση για το σύνολο των απωλειών λόγω εκτροπής του τένοντα και λόγω ισοδύναμης εκτροπής σε ευθύγραμμία. Προς το σκοπό αυτό προσδιορίζεται η συνολική εκτροπή δηλαδή το άθροισμα της πραγματικής εκτροπής α και της ισοδύναμης εκτροπής του ευθύγραμμου τμήματος του τένοντα η οποία είναι ίση με kl . Κατόπιν με τη θεώρηση ότι η συνολική εκτροπή είναι $\alpha+kl$ και την αντικατάσταση της ως εκτροπή α στη σχέση (6) προκύπτει η παρακάτω σχέση που δίδει την τιμή της δύναμης προέντασης στο τέλος ενός τμήματος που περιλαμβάνει ευθύγραμμία l και εκτροπή ίση με α :

$$P = P_0 e^{-\mu(\alpha+kl)} \quad (21)$$

Οι σχέσεις (20) και (21) θεωρούνται οι γενικές σχέσεις για τον υπολογισμό των στιγμιαίων απωλειών λόγω τριβών κατά μήκος τένοντα με οποιαδήποτε τροχιά.

- ο *Σχέσεις για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω τριβών σε παραβολικό τένοντα*

Συχνά η τροχιά ή μέρος της τροχιάς ενός τένοντα ακολουθεί το σχήμα της παραβολής. Σε μια παραβολή έστω ένα σημείο A_0 και σε απόσταση $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$ τα σημεία $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots$ αντίστοιχα. Από τις ιδιότητες της παραβολικής τροχιάς κατά προσέγγιση ισχύει ότι

$$\frac{\alpha_1}{x_1} = \frac{\alpha_2}{x_2} = \dots = \frac{\alpha_i}{x_i} \quad (22)$$

Έστω ότι ζητείται να υπολογισθούν οι απώλειες μέχρι τα σημεία $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots$ με αρχή υπολογισμού το σημείο A_0 . Για να είναι δυνατή η χρήση της γενικής σχέσης (21) πρέπει να υπολογισθεί για κάθε σημείο i η παράσταση $\mu(\alpha_i+kx_i)$.

Η παράσταση $\mu(\alpha_i+kx_i)$ μπορεί να γραφεί με τη μορφή $x_i \mu \left(\frac{\alpha_i}{x_i} + k \right)$ για την οποία όμως με βάση τη παρατήρηση της προηγούμενης παραγράφου και τη σχέση (22) ισχύει ότι το τμήμα $\mu \left(\frac{\alpha_i}{x_i} + k \right)$ διατηρείται σταθερό για όλα τα σημεία $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots$

Είναι άρα δυνατό να ορισθεί μια σταθερά kx ως εξής :

$$kx = \mu \left(\frac{\alpha_i}{x_i} + k \right) \quad (23)$$

Οπότε με χρήση της σταθεράς kx η γενική σχέση (21) των απωλειών μπορεί να γραφεί ως εξής

$$P_x = P_0 e^{-\mu(\alpha+kl)} = P_0 e^{-\mu x \left(\frac{\alpha}{x} + kl \right)} \rightarrow P_x = P_0 e^{-kx} \quad (24)$$

Και αντίστοιχα η γενική σχέση (20) των απωλειών μπορεί να γραφεί ως εξής

$$P = P_o [1 - \mu(\alpha + kx)] = P_o \left[1 - x\mu \left(\frac{\alpha}{x} + k \right) \right] \rightarrow P_x = P_o [1 - xk_x] \quad (25)$$

Οι σχέσεις (24) αι (25) θεωρούνται οι γενικές σχέσεις για τον υπολογισμό των στιγμιαίων απωλειών λόγω τριβών κατά μήκος παραβολικού τένοντα.

Όσον αφορά τις τιμές μ και k , σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 ισχύουν τα παρακάτω:

	Εσωτερικοί τένοντες (1)	Εξωτερικοί αδέσμευτοι τένοντες			
		Χαλύβδινος αγωγός/ χωρίς λίπανση	HDPE αγωγός/ χωρίς λίπανση	Χαλύβδινος αγωγός/ με λίπανση	HDPE αγωγός/ με λίπανση
Ψυχρής έλασης σύρμα	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Καλώδια	0,19	0,24	0,12	0,16	0,1
Ράβδο με νευρώσεις	0,65	-	-	-	-
Λείες ράβδοι	0,33	-	-	-	-

(1) Για τους τένοντες που καλύπτουν περίπου το ήμισυ του αγωγού

Εικόνα 2.6 Τιμές συντελεστή τριβής μ (EC2)

Επίσης σε ελλείψει στοιχείων σε ευρωπαϊκή τεχνική έγκριση, οι τιμές για ακούσιες κανονικές μετατοπίσεις για εσωτερικούς τένοντες θα είναι γενικά στην περιοχή $0,005 < k < 0,01$ ανά μέτρο.

Απώλειες λόγω ολίσθησης της αγκύρωσης

- ο *Αγκύρωση τένοντα με χρήση σφήνας*

Μετά την τάνυση του ο τένων σταθεροποιείται με τη χρήση αγκύρωσης. Η αγκύρωση του τένοντα στα περισσότερα συστήματα προέντασης επιτυγχάνεται με την ενσφήνωση του τένοντα με σύστημα σφήνας. Τοποθετείται δηλαδή γύρω από το τένοντα σφήνα και η αγκύρωση και σταθεροποίηση του επιτυγχάνεται με μικρή ολίσθηση του τένοντα και της σφήνας μέσα σε ειδικό περίβλημα με ισχυρό μεταλλικό στόμιο που είναι ενσωματωμένο στη τοιχοποιία του δομικού στοιχείου. Η επιφάνεια της σφήνας που είναι σε επαφή με τον τένοντα φέρει οδοντώσεις ώστε να είναι αυξημένη η τριβή σφήνας-τένοντα και να επιτυγχάνεται σταθεροποίηση και ασφαλής αγκύρωση με μικρή ολίσθηση προς το εσωτερικό του περιβλήματος.

Το σύστημα αυτό εφαρμόζεται ευρύτατα για την αγκύρωση τενόντων που φέρουν μεγάλες δυνάμεις προέντασης. Από τη φύση όμως της λειτουργίας της αγκύρωσης μέχρι την σταθεροποίηση της σφήνας και του τένοντα προκαλείται μικρή ολίσθηση η οποία έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παραμόρφωσης (επιμήκυνσης) που έχει επιβληθεί στον τένοντα και άρα τη μείωση της δύναμης προέντασης.

- ο *Μήκος επιρροής ολίσθησης σε τένοντα με παραβολική ή ευθύγραμμη τροχιά*

Κατά την αγκύρωση με χρήση σφήνας η αγκύρωση και σταθεροποίηση του τένοντα επιτυγχάνεται με μικρή ολίσθηση του τένοντα και της σφήνας μέσα σε ειδικό περίβλημα που είναι ενσωματωμένο στη τοιχοποιία. Η μικρή αυτή ολίσθηση προς το εσωτερικό του στοιχείου έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται

λίγο η επιμήκυνση που είχε επιβληθεί στον τένοντα και άρα να παρατηρείται μείωση της δύναμης προέντασης.

Κατά την ολίσθηση ο τένοντας μετακινείται προς το εσωτερικό του στοιχείου. Στην μετακίνηση αυτή αντιτίθεται η τριβή μεταξύ του τένοντα και του σωλήνα προέντασης . Επειδή η ολίσθηση μιας αγκύρωσης είναι συνήθως μικρή οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις τριβής είναι δυνατόν μετά από κάποιο διάστημα να εκμηδενίσουν την κίνηση προς το εσωτερικό του στοιχείου. Έτσι η διατάραξη που προκαλείται στον τένοντα λόγω της ολίσθησης προς το εσωτερικό του στοιχείου συνήθως περιορίζεται σε κάποιο διάστημα που αρχίζει από την αγκύρωση και εκτείνεται για κάποιο συγκεκριμένο τμήμα καθ' ύψος της τοιχοποιίας. Το διάστημα αυτό ονομάζεται μήκος επιρροής της ολίσθησης της αγκύρωσης ή μήκος διατάραξης λόγω της ολίσθησης της αγκύρωσης. Ο υπολογισμός του μήκους επιρροής της ολίσθησης είναι ένα σημαντικό πρόβλημα διότι η ολίσθηση επηρεάζει τη τιμή της προέντασης κατά μήκος αυτού του τμήματος.

Για την κατανόηση του προβλήματος, παρακάτω παρουσιάζεται μια προεντεταμένη δοκός, με παραβολικό τένοντα. Κάτω από την δοκό παρατίθεται το διάγραμμα κατανομής της δύναμης προέντασης κατά μήκος της δοκού. Αν δεν ληφθεί υπόψη η ολίσθηση της αγκύρωσης το διάγραμμα είναι σχεδόν γραμμικό και περιγράφεται από τη σχέση (24) ή (25) που ισχύουν για τους παραβολικούς τένοντες. Η τάνυση του τένοντα γίνεται από το άκρο Α όπως φαίνεται και στο σχήμα. Μετά την τάνυση γίνεται αγκύρωση του τένοντα με σύστημα σφήνας στο άκρο Α. Κατά την αγκύρωση παρατηρείται μικρή ολίσθηση του τένοντα προς το εσωτερικό της δοκού. Η ολίσθηση αυτή προκαλεί την μείωση της τάνυσης του τένοντα που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της προέντασης κατά μήκος του διαστήματος διατάραξης x_0 . Σε κάθε θέση i κατά μήκος του διαστήματος x_0 η στοιχειώδης παραμόρφωση $\Delta \epsilon_{P,i}$ προκαλεί στη θέση i αντίστοιχη μεταβολή της δύναμης προεντάσεως ΔP_i . Η συνολική μετακίνηση, δηλαδή η ολίσθηση δ , του τένοντα μέσα στον σωλήνα προεντάσεως είναι το άθροισμα των στοιχειωδών παραμορφώσεων $\Delta \epsilon_{P,i}$ που υφίσταται ο τένων. Άρα ισχύει ότι

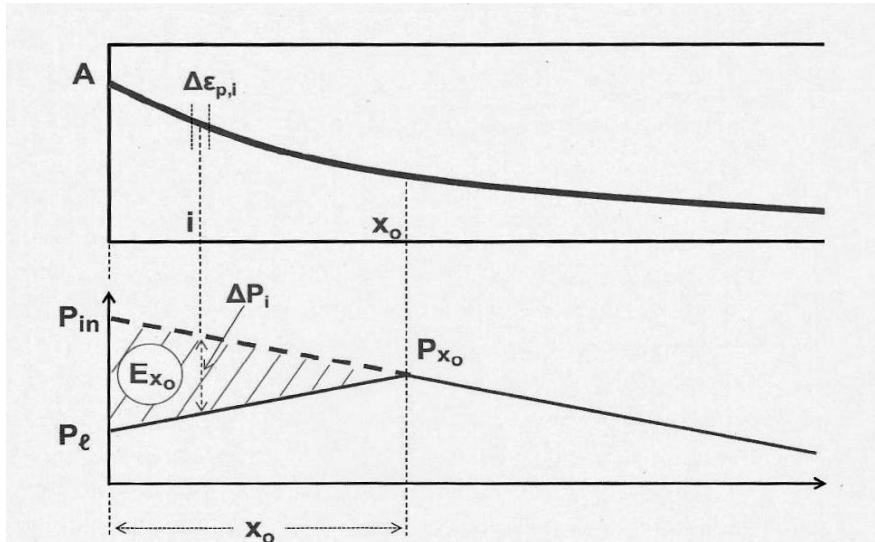
$$\delta = \int_0^{x_0} \Delta \epsilon_P dx \quad (26)$$

$$\text{Και λαμβάνοντας υπόψη ότι } \Delta \epsilon_P = \Delta \sigma_P / E_P = \Delta P / (E_P A_P) \quad (27)$$

και ότι για το εμβαδόν E_{x_0} του γραμμοσκιασμένου τριγώνου στο σχήμα ισχύει ότι $E_{x_0} = \int_0^{x_0} \Delta P dx$ (28)

η σχέση (26) γίνεται

$$\delta = \int_0^{x_0} \Delta \epsilon_P dx = \frac{1}{E_P A_P} \int_0^{x_0} \Delta P dx \rightarrow \delta = \frac{E_{x_0}}{E_P A_P} \quad (29)$$



Εικόνα 2.7 Μήκος επιρροής ολίσθησης της αγκύρωσης x_o και αντίστοιχη μείωση της δύναμης προέντασης μέσα σε αυτό το διάστημα

Δεδομένου ότι οι δυνάμεις τριβής αντιτίθενται στην μετακίνηση του τένοντα λόγω ολίσθησης και τελικά αυτές οι δυνάμεις περιορίζουν και σταματούν την μετακίνηση του τένοντα είναι προφανές η διαφορά της δύναμης προέντασης από το σημείο x_o έως την αρχή A μετά την ολίσθηση είναι ίση με τη δύναμη της τριβής. Άρα η δύναμη προέντασης στο άκρο της δοκού P_l μετά την μείωση λόγω ολίσθησης μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη δύναμη P_{x_o} στο σημείο x_o χρησιμοποιώντας τη σχέση (25) ως εξής

$$P_l = P_{x_o}[1 - x_o k_x] \quad (30)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή της P_{x_o} από τη σχέση (25) στη σχέση (30) προκύπτει ότι

$$P_l = P_i[1 - x_o k_x]^2 = P_i[1 - 2x_o k_x + (x_o k_x)^2] \quad (31)$$

Και επειδή $(x_o k_x)^2$ είναι μια πολύ μικρή ποσότητα η σχέση (31) γίνεται

$$P_l = P_i[1 - 2x_o k_x]$$

$$\text{Και άρα } P_l - P_i = 2x_o k_x P_i \quad (32)$$

Το εμβαδόν του γραμμοσκιασμένου τριγώνου δίδεται από τη σχέση

$$E_{x_o} = \frac{1}{2}(P_l - P_i)x_o$$

Και με τη βοήθεια της σχέσης (32) το εμβαδόν γράφεται με τη μορφή

$$E_{x_o} = \frac{1}{2}(P_l - P_i)x_o = \frac{1}{2}2x_o k_x P_i x_o \rightarrow E_{x_o} = k_x P_i x_o^2 \quad (33)$$

Με την αντικατάσταση της τιμής του εμβαδού E_{x_o} από τη σχέση (33) στη σχέση (29) προκύπτει η σχέση για τον υπολογισμό του μήκους επιρροής της ολίσθησης :

$$\delta = \frac{E_{x_0}}{E_p A_p} = \frac{k_x P_i x_0^2}{E_p A_p} \rightarrow x_0 = \sqrt{\frac{\delta E_p A_p}{k_x P_i}} \quad (34)$$

$$\text{και δεδομένου ότι } \varepsilon_{pi} = \frac{P_i}{E_p A_p} \quad (35)$$

η σχέση (34) γίνεται

$$x_0 = \sqrt{\frac{\delta}{k_x \varepsilon_{pi}}} \quad (36)$$

Η σχέση (36) για τον υπολογισμό του μήκους επιρροή της ολίσθησης προέκυψε με βάση τη σχέση (25) για τον υπολογισμό των απωλειών. Είναι όμως δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και η σχέση (24) η οποία θεωρείται πλέον ακριβής. Σε αυτή τη περίπτωση προκύπτει ότι η δύναμη προέντασης P_{x_0} στο σημείο x_0 δίδεται ως εξής

$$P_{x_0} = P_i e^{-x_0 k_x} \quad (37)$$

Και η δύναμη προέντασης στο άκρο της δοκού P_i μετά την μείωση λόγω της ολίσθησης μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη δύναμη P_{x_0} στο σημείο x_0 χρησιμοποιώντας τη σχέση (24) ως εξής

$$P_i = P_{x_0} e^{x_0 k_x} \quad (38)$$

Με βάση τις σχέσεις (37) και (38) προκύπτει κατ' αντιστοιχία με τη σχέση (36) η παρακάτω σχέση η οποία πλέον ακριβής.

$$x_0 = -\frac{1}{k_x} \ln\left(1 - \sqrt{\frac{k_x \delta}{\varepsilon_{pi}}}\right) \quad (39)$$

Η χρήση και των δύο σχέσεων, (36) και (39), είναι ικανοποιητική. Εξάλλου δίνουν κατά προσέγγιση παρόμοια αποτελέσματα καθώς είναι ταυτόσημες σχέσεις. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό δεδομένου ότι ισχύει η μαθηματική σχέση $\ln(1-x) \approx -x$ και άρα

$$x_0 = -\frac{1}{k_x} \ln\left(1 - \sqrt{\frac{k_x \delta}{\varepsilon_{pi}}}\right) \approx -\frac{1}{k_x} \left(-\sqrt{\frac{k_x \delta}{\varepsilon_{pi}}}\right) = \sqrt{\frac{\delta}{k_x \varepsilon_{pi}}}$$

Οι παραπάνω σχέσεις (36) και (39) είναι δυνατόν να εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό του μήκους επιρροής x_0 για τις περιπτώσεις

- ✓ Ευθύγραμμου τένοντα.
- ✓ Τένοντα που αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα αλλά το x_0 δεν ξεπερνά το 1^ο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Τένοντα που αποτελείται από τμήματα εκ των οποίων το πρώτο είναι παραβολικό, αλλά το x_0 δεν ξεπερνά το 1^ο παραβολικό τμήμα.

- *Μήκος επιρροής ολίσθησης σε πολυγωνικό τένοντα*

Στην περίπτωση που ο τένων αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα (πολυγωνικός τένων) γίνεται κατ' αρχήν έλεγχος εάν το μήκος επιρροής x_0 ξεπερνάει ή όχι το πρώτο ευθύγραμμο τμήμα. Προς το σκοπό αυτό εφαρμόζεται η σχέση (36) ή η σχέση (39) και συγκρίνεται η τιμή του x_0 που εξάγεται από τις σχέσεις αυτές με το μήκος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος (l_1). Αν το μήκος επιρροής x_0 είναι μικρότερο ή ίσο με το μήκος l_1 του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος τότε, όπως ήδη αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο, το μήκος αυτό είναι το ζητούμενο. Σε περίπτωση όμως που προκύψει ότι το μήκος επιρροής που έχει υπολογισθεί είναι μεγαλύτερο από το μήκος l_1 τότε δεν ισχύει η βασική προϋπόθεση των σχέσεων (36) και (39) ότι ο τένων είναι παραβολικός ή ευθύγραμμος και άρα η τιμή του x_0 που έχει υπολογισθεί δεν ισχύει.

Στην περίπτωση πολυγωνικού τένοντα όπου το μήκος επιρροής x_0 έχει αποδειχθεί ότι ξεπερνά το μήκος l_1 του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος τότε για τον υπολογισμό της τιμής του μήκους επιρροής x_0 είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί με καλή προσέγγιση η παρακάτω εξίσωση 2^{ου} βαθμού:

$$x_0^2 + Ax_0 + B = 0 \quad (40)$$

οι συντελεστές A και B δίδονται από τις σχέσεις :

$$A = -2(1 + \mu k l_1) \mu \alpha l_1 \quad (41)$$

$$B = (1 + \mu k l_1) \frac{\alpha l_1}{k} + \frac{\Delta P_{ol} l_1}{P_o \mu k} - \frac{\delta E_p A_p}{\mu k P_o} \quad (42)$$

όπου

μ ο συντελεστής τριβής

k ο συντελεστής αθέλητης γωνίας τριβών ανά μέτρο ευθύγραμμου μήκους

l_1 το μήκος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος του πολυγωνικού τένοντα

α η εκτροπή στο τέλος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος

ΔP_{ol} η μείωση της δύναμης προέντασης στο τέλος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος λόγω της εκτροπής κατά τη γωνία εκτροπή α .

Ο όρος B της εξίσωσης (42) είναι δυνατόν να απλοποιηθεί χωρίς σημαντική μείωση της ακρίβειας αν ληφθούν υπόψη τα παρακάτω.

- ✓ Η μείωση της δύναμης προέντασης στο τέλος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος λόγω της εκτροπής κατά τη γωνία εκτροπής α δίδεται από τη σχέση (20) για μηδενικό μήκος $l=0$ ως εξής:

$$\Delta P_{ol} = P_{1,\alpha\rho} \mu \alpha$$

όπου

$P_{1,\alpha\rho}$ είναι η δύναμη προέντασης λίγο πριν από την αλλαγή διεύθυνσης του τένοντα στο τέλος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος.

- ✓ Με καλή προσέγγιση για την δύναμη προέντασης λίγο πριν από την αλλαγή διεύθυνσης του τένοντα στο τέλος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος μπορεί να ληφθεί ότι

$$P_{1,\alpha\rho} \approx P_o$$

και άρα η σχέση (43) μπορεί να γραφεί

$$\Delta P_{ol} = P_{1,\alpha\rho}\mu\alpha \approx P_o\mu\alpha \rightarrow \frac{\Delta P_{ol}}{P_o} \approx \mu\alpha \quad (44)$$

- ✓ Ακόμη ισχύει ότι $\frac{P_o}{E_p A_p} = \frac{\sigma_{p_o}}{E_p} = \varepsilon_p \quad (45)$

Εισάγοντας τις σχέσεις (44) και (45) στη σχέση (42) λαμβάνεται η παρακάτω τιμή του όρου B η οποία είναι πιο εύκολη στην εφαρμογή από την (42)

$$B = (2 + \mu k l_1) \frac{a l_1}{k} - \frac{\delta}{\mu k \varepsilon_p}$$

- ο *Αγκύρωση τένοντα χωρίς την χρήση σφήνας*

Σε τένοντες της μορφής ραβδωτών ή λείων ράβδων (deformed or smooth round bars) η αγκύρωση τους στην τοιχοποιία γίνεται χωρίς την χρήση σφήνας. Στα άκρα τους οι ράβδοι αυτοί φέρουν σπειρώμα, στο οποίο εφαρμόζεται η πλάκα αγκύρωσης και μετέπειτα ειδικό παξιμάδι ή μούφα. Αυτά κατασκευάζονται από ειδικές εταιρίες και πρέπει για την επιτυχή εφαρμογή τους να είναι συμβατά μεταξύ τους.

Στις περιπτώσεις αυτές δεν υπάρχει στιγμιαία απώλεια προέντασης λόγω ολίσθησης. Καθώς αυτή η μορφή απώλειας, ήταν αποτέλεσμα της χρήσης σφήνας. Συνεπώς, το διάγραμμα κατανομής της δύναμης προέντασης θα είναι γραμμικό, και δεν θα απαιτείται η διαδικασία εύρεσης του μήκους επιρροής ολίσθησης.

Αυτό αποτελεί μια σημαντική διαφορά του ενός τρόπου αγκύρωσης με σφήνα και του άλλου χωρίς σφήνα, διότι αυτή καθορίζει και την τιμή της προέντασης που θα επιβληθεί στο άκρο του στοιχείου.

2.2.3 Χρόνιες απώλειες προέντασης

Όπως έχει ειπωθεί και στις προηγούμενες παραγράφους, η δύναμη προέντασης θα ήταν επιθυμητό μετά την τάνυση και την αγκύρωση του τένοντα να παραμείνει αμετάβλητη τόσο στη θέση αγκύρωσης όσο και σε όλες τις θέσεις από τις οποίες ο τένων διέρχεται κατά μήκος του στοιχείου. Αμέσως όμως μετά την τάνυση και την αγκύρωση του τένοντα λόγω των στιγμιαίων απωλειών παρατηρείται πτώση δύναμης προέντασης η τιμή της οποίας δεν

είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται από θέση σε θέση κατά μήκος της τροχιάς του. Εκτός από την μείωση της αρχικά επιβαλλόμενης δύναμης προέντασης και την διαφοροποίηση της τιμής της κατά μήκος του στοιχείου που συμβαίνει αμέσως μετά την τάνυση και αγκύρωση του τένοντα παρατηρείται επί πλέον μείωση με τη πάροδο του χρόνου κατά τη διάρκεια της ζωής του έργου. Οι μειώσεις αυτές της δύναμης προέντασης που παρατηρούνται μετά τις στιγμιαίες απώλειες με τη πάροδο του χρόνου ονομάζονται χρόνιες απώλειες.

Οι χρόνιες απώλειες της δύναμης προέντασης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- ο Απώλειες λόγω συστολής ξηράνσεως της τοιχοποιίας
- ο Απώλειες λόγω ερπυσμού της τοιχοποιίας
- ο Απώλειες λόγω χαλαρώσεως του τένοντα προέντασης

Ακόμη τονίζεται ότι θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό των απωλειών η αλληλεξάρτηση των τριών φαινομένων.

2.2.3.1 Συστολή ξήρανσης

Με τον όρο συστολή ξηράνσεως ορίζεται η συστολή (συρρίκνωση) που υφίσταται με τη πάροδο του χρόνου η τοιχοποιία χωρίς να βρίσκεται υπό θλίψη (ή άλλη ένταση). Με άλλη διατύπωση θα μπορούσε να ορισθεί η συστολή ξηράνσεως ως η παραμόρφωση που υφίσταται με το χρόνο η μη φορτισμένη τοιχοποιία. Η συστολή ξηράνσεως οφείλεται στη μετακίνηση και βαθμιαία εξάτμιση με τη πάροδο του χρόνου του μη χημικά συνδεδεμένου ύδατος του κονιάματος. Η μετακίνηση και εξάτμιση του μη χημικά συνδεδεμένου νερού και άρα και το φαινόμενο της συστολής ξηράνσεως εξαρτάται από :

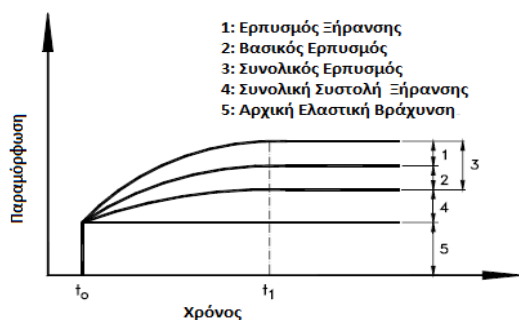
- ο Τις συνθήκες υγρασίας του περιβάλλοντος.
- ο Τις διαστάσεις της τοιχοποιίας
- ο Το τμήμα της τοιχοποιίας που έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον.
- ο Και την σύνθεση του κονιάματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ιστορικά κτίρια η επιρροή του φαινομένου της συστολής ξήρανσης του κονιάματος είναι αμελητέα, και για αυτό το λόγω δεν θα γίνει περαιτέρω εμβάθυνση στο φαινόμενο αυτό.

2.2.3.2 Ερπυσμός

Ο ερπυσμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται συνεχής αύξηση των παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου υπό την επίδραση σταθερής

τάσεως, υπό σταθερή θερμοκρασία. Στην τοιχοποιία εμφανίζεται σε τρεις κύριους κλάδους, στο πρωτογενή, το δευτερογενή και τον τριτογενή ερπυσμό. Ο *πρωτογενής* ερπυσμός έχει αναστρέψιμη ιζωδοελαστική συμπεριφορά, η οποία αποτελείται από την ελαστική παραμόρφωση που προκύπτει από την εφαρμογή του αξονικού φορτίου σε χρόνο t_0 , καθώς και από την συστολή ξήρανης του κονιάματος και την παραμόρφωση του ερπυσμού. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

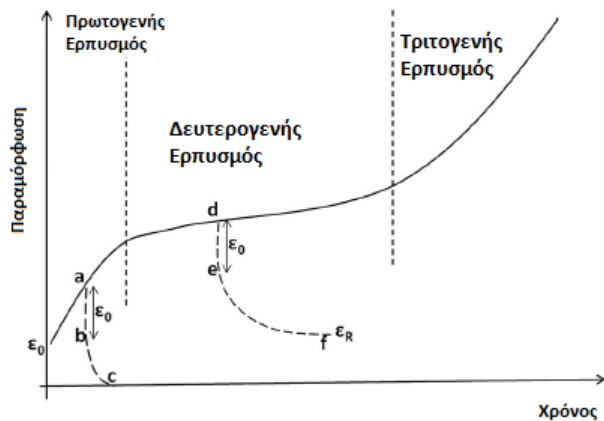


Εικόνα 2.8 Διάγραμμα παραμόρφωσης χρόνου σε τοιχοποιία

Στην συνέχεια, η τοιχοποιία μπορεί να σταθεροποιηθεί μετά από ένα δεδομένο χρονικό διάστημα είτε να συνεχίσει να έρπει. Τότε εμφανίζεται ο λεγόμενος *δευτερογενής* ερπυσμός, ο οποίος χαρακτηρίζεται για την ιζωδοπλαστική συμπεριφορά του. Όσον αφορά για τη ταχύτητα παραμορφώσεως είναι μικρή και περίπου σταθερή, για αυτό το λόγο και προηγουμένως αναφέρθηκε ότι μπορεί να παραμείνει σταθερή δηλαδή αν γίνει ευθύγραμμη. Τέλος το στάδιο του *τριτογενούς* ερπυσμού μπορεί να υπάρχει ή να μην υπάρχει, ανάλογα με το επίπεδο της τάσεως που έχει επιβληθεί. Με τάση μεγαλύτερη από 60-80% της βραχυπρόθεσμης θλιπτικής αντοχής, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ερπυστηκού φαινομένου και να οδηγήσει την τοιχοποιία στην ανάπτυξη μικρορωγμών στην περιοχή του κονιάματος. Δηλαδή, σε μία γενικότερη διατύπωση εάν η τάση ερπυσμού ή η θερμοκρασία είναι αρκετά μεγάλες, τότε αναπτύσσεται ο τριτογενής ερπυσμός στον οποίο παρατηρείται απότομη αύξηση της ταχύτητας των παραμορφώσεων που οδηγεί σε σχετικά σύντομη αστοχία του υλικού.

Παρατηρώντας το παρακάτω διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου, αν υποθέσουμε ένα αρχικό φορτίο σε ένα πέτρινο στοιχείο αυτό παράγει στιγμιαία μια ελαστική παραμόρφωση ϵ_0 . Αν κατά τον αρχικό ερπυσμό εκφορτιστεί, τότε η παραμόρφωση θα ακολουθήσει την διαδρομή "a b c". Το τμήμα "a b" συμπίπτει με την αρχική παραμόρφωση ϵ_0 , ενώ το τμήμα "b c" όπως φαίνεται θα συνεχίσει να μειώνεται ασυμπτωτικά μέχρι τον πλήρη μηδενισμό των παραμορφώσεων. Στον δευτερεύοντα ερπυσμό η αποφόρτιση ακολουθεί τη διαδρομή "d e f", που όπως βλέπουμε από το διάγραμμα στο τέλος μένει μία πλαστική μόνιμη παραμόρφωση ϵ_R . Τέλος, στην περίπτωση του τριτογενή ερπυσμού, η τοιχοποιία οδηγείται γρήγορα στην κατάρρευση, καθώς οι μικρορηγματώσεις συνδέονται και μεταδίδονται με ασταθή τρόπο

μέσα σε ολόκληρο το υλικό (τοιχοποιία) το οποίο και υφίσταται μεγάλες καταπονήσεις πριν από την αποσύνθεσή του.

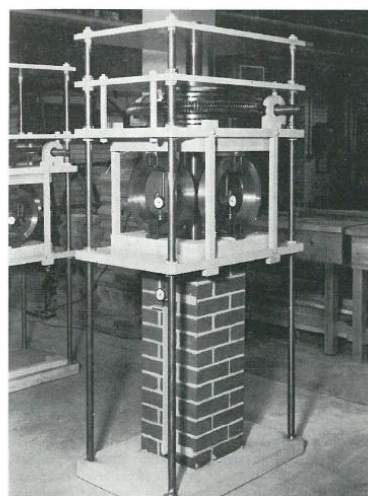


Εικόνα 2.9 Διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου σε τοιχοποιία

Πειραματικά αποτελέσματα έχουν αποδείξει ότι οι αρμοί αν και αποτελούν το 20% περίπου της τοιχοποιίας ευθύνονται για το 60 έως 80% του ερπυσμού.

Μηχανές Ερπυσμού

Πολλές ερευνητικές ομάδες προσπάθησαν και προσπαθούν να μελετήσουν το φαινόμενο του ερπυσμού. Ο D. Lenczner ήταν ένας από αυτούς που ασχολήθηκε με το φαινόμενο του ερπυσμού σε μία τοιχοποιία από οπτόπλινθους. Η μηχανή ερπυσμού που χρησιμοποίησε μπορούσε να επιβάλει μέγιστο φορτίο 60 τόνων, σε δοκίμιο μέγιστου ύψους 3ft. Η μηχανή αποτελείτο από 4 βαθμονομημένους δακτύλιους με ικανότητα 15 τόνων ο κάθε ένας. Επιπλέον η παραμόρφωση μετρήθηκε από ευαίσθητα περιμετρικά όργανα.



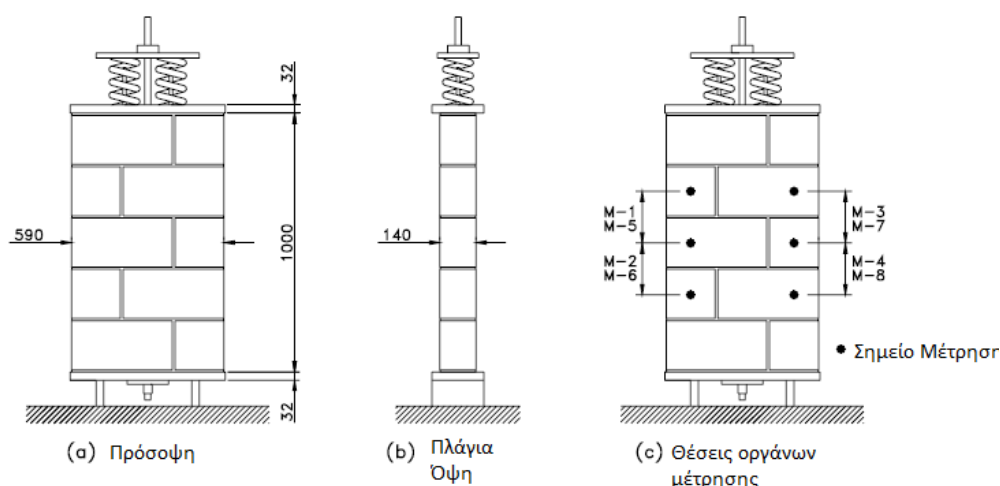
Εικόνα 10 Μηχανή ερπυσμού

Μία ακόμη ερευνητική ομάδα με τους José Pina-Henriques, Paulo B. Lourenço που ασχολήθηκε χρησιμοποίησε δοκίμια διαστάσεων $0,2*0,2*0,3m^3$ στα οποία ασκήθηκαν διαδοχικά στάδια φόρτισης $0,35MPa$ όπου και διατηρούνταν σταθερά για 3 μήνες . Η επιβολή του φορτίου έγινε από την κάτω μεριά αυτής της κατασκευής με γρύλους, όπου και κρατούσαν σταθερό το φορτίο για να επιτευχθεί το πείραμα του ερπυσμού.



Εικόνα 2.11 Δοκίμια και μηχανές ερπυσμού

Τέλος, οι μηχανικοί G.D. Wight και J.M. Ingham τοποθέτησαν σε σειρά με το δοκίμιο ($0,14*0,59*1,00m^3$) μεταξύ των αγκυρώσεων του τένοντα βαριά ελατήρια, προκειμένου να διατηρηθεί η δύναμη προέντασης περίπου σταθερή με την πάροδο του χρόνου, όπως και απαιτεί το φαινόμενο του ερπυσμού και



Εικόνα 2.12 Διαστάσεις δοκίμιου και θέσεις των σημείων μέτρησης

στην συνέχεια η παραμόρφωση μετρήθηκε από ευαίσθητα όργανα στις θέσεις που δείχνει το παρακάτω σχήμα.

Υπολογισμός ερπυσμού τοιχοποιίας

Πρόσφατα δημοσιεύθηκε ένα άρθρο (*An overview of masonry creep*), που σκοπό είχε τη μελέτη του ερπυσμού στην τοιχοποιία. Εξέταξε μόνο το πρωτογενή και δευτερογενή ερπυσμό και την συμπεριφορά του υλικού που

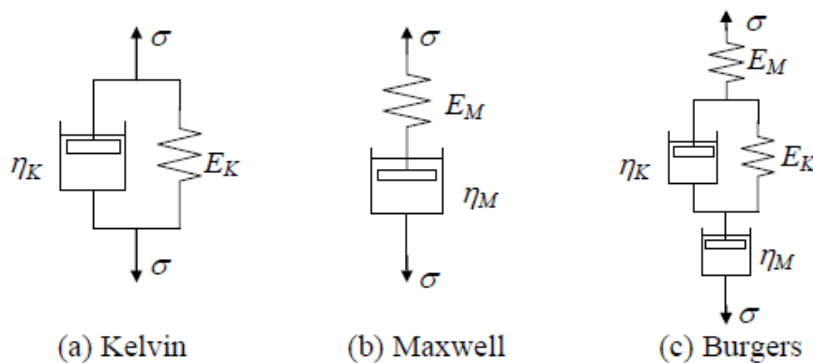
μπορεί να θεωρηθεί ιξωδοελαστική, καθώς οι μόνιμες παραμορφώσεις συνήθως αμελούνται σε αυτές τις φάσεις.

Για το γραμμικό ιξωδοελαστικό υλικό, η παραμόρφωση ερπυσμού ανά πάσα στιγμή t λόγω της εφαρμογής μιας σταθερής τάσης σ στο χρόνο t_0 μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\varepsilon(t, t_0) = \sigma J(t, t_0),$$

όπου J είναι ο τελεστής ερπυσμού. Για τα ρεολογικά υλικά, το J απλώς εξαρτάται από τον χρόνο, $t - t_0$, που έχει περάσει από την εφαρμογή της τάσης. Επίσης θεωρούμε για απλότητα $t_0 = 0$, $J = J(t)$ και σε καινούργια τοιχοποιία ο ερπυσμός και η συστολή ξήρανσης αναπτύσσονται ταυτόχρονα.

Μία ακόμη έρευνα πραγματοποίησαν οι Choi et al που παρουσίασαν τα υπάρχοντα ρεολογικά μοντέλα για την ερπυσμό της τοιχοποιίας. Τα πιο γνωστά είναι το μοντέλο Kelvin (Εικόνα 3α) και το μοντέλο Maxwell (Εικόνα 3β). Το πρώτο παραμελεί τις στιγμιαίες (ελαστικές) παραμορφώσεις και είναι σε θέση μόνο να περιγράψει μια μείωση του ερπυσμού με το χρόνο, η οποία συμβαίνει σε μετρίως χαμηλές τάσεις.



Εικόνα 2.13 Ρεολογικά μοντέλα

Ενώ το δεύτερο προβλέπει μια γραμμική σχέση παραμόρφωσης-χρόνου του ερπυσμού, η οποία παρατηρείται πειραματικά σε υψηλότερες τάσεις μετά την παρέλευση της αρχικής φάσης ερπυσμού. Το τρίτο σε σειρά το οποίο αποκαλείται μοντέλο Burgers (Εικ. 3c) αποτελείται από μια μονάδα Kelvin και μια μονάδα Maxwell σε σειρά, και αντιπροσωπεύει τόσο τον πρωτογενή όσο και το δευτερογενή ερπυσμό. Αναφερόμενοι στην Εικόνα 3c, ο τελεστής ερπυσμού για ένα μοντέλο Burgers διαβάζεται :

$$J = \frac{1}{E_M} \left(1 + \frac{t}{\tau_M} \right) + \frac{1}{E_K} (1 - \exp(-t / \tau_K)),$$

όπου οι «χρόνοι χαλάρωσης ή καθυστέρησης» τ_K, τ_M σχετίζονται με το ιξώδες των αποσβεστήρων με $\tau_i = \eta_i / E_i$ ($i = K, M$). Το E_M είναι το στιγμιαίο μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Εκτός από τους Choi et al ασχολήθηκαν και οι Shrive et al, οι οποίοι εφάρμοσαν αυτά τα μοντέλα για να περιγράψουν τη συμπεριφορά ερπυσμού των δειγμάτων τοιχοποιίας. Διαπίστωσαν ότι το μοντέλο Burgers μπορεί εύλογα να ταιριάζει στις πειραματικές καμπύλες ερπυσμού υπό την προϋπόθεση ότι ο τελεστής ερπυσμού, δηλαδή η προηγούμενη σχέση, τροποποιείται εμπειρικά ως εξής:

$$J = \frac{1}{E} \left(1 + \frac{t^{0.3}}{\tau} \right) + \frac{1}{E} (1 - \exp(-t/\tau)).$$

καθώς οι ερευνητές υποθέτουν αυθαίρετα $E_K = E_M = E$ και $\tau_K = \tau_M = \tau$. Ο χρόνος χαλάρωσης τ μπορεί να σχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας (σε MPa) κατά

$$1/\tau = 0.112 - 3.35 \times 10^{-6} E.$$

Ένα ακόμη άρθρο για τον υπολογισμό του ερπυσμού από τους E. Verstryngge, L. Schueremans, D. Van Gemert, M.A.N. Hendriks παραθέτει σαν μοντέλο υπολογισμού του ερπυσμού αυτό του Burgers . Με μόνη διαφορά, στον υπολογισμό του χρόνου καθυστέρησης, στο μοντέλο του Maxwell, πολλαπλασιάζει το τ_M με $(1-D^V)$.

$$\varepsilon(\sigma, t) = \frac{\sigma}{E^M} + \frac{1}{E^K} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau^K}\right) \right) \sigma + \frac{t}{E^M \tau^M (1 - D^V)} \sigma.$$

Όπου D^V η ιξώδης βλάβη, η οποία εξελίσσεται με το χρόνο, με τιμές από 0 για καμία ζημιά έως την μονάδα για ολική βλάβη του υλικού. Η παράμετρος βλάβης έχει θετική, μη μειούμενη τιμή και η βλάβη αρχίζει όταν ξεπεραστεί κάποιο σχετικό επίπεδο τάσης.

$$\dot{D}^V = c \left(\frac{\sigma^*}{1 - D^V} \right)^n.$$

Το σ^* είναι το σχετικό επίπεδο τάσης, το οποίο υπολογίζεται διαιρώντας την απόλυτη τάση με τη μέση θλιπτική αντοχή υλικού. Το D^V είναι το πρώτο παράγωγο της βλάβης σε σχέση με το χρόνο και τα c, n, A και B είναι συντελεστές που έχουν βρεθεί πειραματικά.

$$D^V = A\sigma^* + B.$$

Ωστόσο εκτός από την άκρως λεπτομερή περιγραφή με την ανάλυση περι εξέλιξης του του φαινομένου του ερπυσμού, έχει διατυπωθεί και μακροχρόνια σχέση. Η πληροφορία αυτή εκφράζεται με τον συντελεστή ερπυσμού (ϕ_∞), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τάσης ερπυσμού προς το στιγμιαίο (ελαστικό). Ο Lenczner διαπίστωσε ότι για τους μονόφυλλους τοίχους τοιχοποιίας, ο συντελεστής ερπυσμού σχετίζεται με η θλιπτική αντοχή των μονάδων τούβλου (f_B , σε MPa) από την εξίσωση :

$$\phi_\infty = 4.46 - 0.33\sqrt{f_B}.$$

Κατά τον Ευρωκώδικα 6, ο παρακάτω πίνακας παραθέτει κάποια εύρη τιμών για τον συντελεστή ϕ_∞ ανάλογα των τύπο του τοιχοσώματος.

Τύπος Τοιχοσωμάτων	ϕ_∞ (1)
	Εύρος
Αργιλικά	0,5-1,0
Ασβεστοπυριτικά	1,0-2,0
Τσιμεντόλιθοι και βιομηχανικοί λαξευμένοι λίθοι	1,0-2,0
Ελαφροσκυρόδεμα	1,0-3,0
Αυτόκλειστοι κυψελωτοί τσιμεντόλιθοι	1,0-2,5
Φυσικοί λίθοι Μαγματικοί Ιζηματογενείς Μεταμορφοσιγενείς	(2)

Πίνακας 2.14 Τύπος τοιχοσωμάτων και συντελεστής ερπυσμού ϕ_∞ σύμφωνα με τον EC6

(1) Ο τελικός ερπυστικός συντελεστής $\phi_\infty = \frac{\varepsilon_\infty}{\varepsilon_{el}}$ όπου ε_∞ είναι η τελική ερπυστική παραμόρφωση και $\varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E}$.

(2) Οι τιμές είναι πρακτικά πολύ χαμηλές.

Οπότε καταλήγουμε ότι συνολική παραμόρφωση που προκαλείται στη τοιχοποιία μακροχρόνια είναι :

$$\varepsilon_{w\sigma}(\infty, t_o) = \varepsilon_{we} + \varepsilon_{wc}(\infty, t_o) = \frac{\sigma}{E_w} + \phi(\infty, t_o) \frac{\sigma}{E_w}$$

$$\varepsilon_{w\sigma}(\infty, t_o) = \frac{\sigma}{E_w} (1 + \phi(\infty, t_o))$$

Συντελεστής Ύλικίας χ

Στις κατασκευές υπάρχουν δεσμεύσεις- περιορισμοί οι οποίοι εμποδίζουν τις διαφορικές μετακινήσεις και αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι έχει ως αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού με την πάροδο του χρόνου να βρίσκουν αντίσταση από τις δεσμεύσεις αυτές. Οι ερπυστικές παραμορφώσεις ενώ στην αρχή είναι πολύ μικρές δεν προκαλούν κινήσεις και είναι δυνατόν να συμβαίνουν σχεδόν ανεμπόδιστα (χωρίς αντίσταση) όμως καθώς περνάει ο χρόνος οι συνεχείς αυξήσεις τους προκαλούν μικροκινήσεις οι οποίες βρίσκουν αντίσταση από τις δεσμεύσεις. Έτσι με τη πάροδο του χρόνου οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από τον ερπυσμό υφίστανται επιβράδυνση και μειώνεται ο ρυθμός αύξησής τους. Οι επιβραδύνσεις και οι μειώσεις των παραμορφώσεων καθώς περνάει ο χρόνος και αυξάνεται ο ερπυσμός έχουν σαν αποτέλεσμα η παρατηρούμενη τιμή του συντελεστή ερπυσμού να φαίνεται μειωμένη σε σχέση με αυτήν που αναμένεται με βάση τις πειραματικές παρατηρήσεις από στοιχεία τοιχοποιίας χωρίς δεσμεύσεις. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνεται υπόψη με ένα συντελεστή χ που ονομάζεται συντελεστής ηλικίας ή πιο κυριολεκτικά συντελεστής επιβράδυνσης του ερπυσμού. Ο συντελεστής αυτός αντιπροσωπεύει τη μείωση σε ερπυσμό και άρα την αύξηση της δυσκαμψίας που παρατηρείται λόγω περιορισμών έναντι των παραμορφώσεων που γίνονται σημαντικοί με τη πάροδο του χρόνου. Ο συντελεστής χ δεν έχει σταθερή τιμή και εξαρτάται από την ηλικία της τοιχοποιίας κατά το χρόνο t_0 της επιβολής της φόρτισης καθώς και από τον συντελεστή ερπυσμού. Για τις συνηθισμένες κατασκευές λαμβάνεται προσεγγιστικά η τιμή 0,8.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις και την εισαγωγή του συντελεστή χ για να ληφθεί υπόψη η επιβράδυνση και μείωση του ερπυσμού με την πάροδο του χρόνου, η σχέση γράφεται :

$$\varepsilon_{w\sigma}(\infty, t_0) = \frac{\sigma}{E_w} (1 + \chi\varphi(\infty, t_0))$$

Και δεδομένου δε ότι ο συντελεστής χ δε έχει σταθερή τιμή λαμβάνεται για τις συνηθείς κατασκευές περίπου $\chi \approx 0,8$. Οπότε :

$$\varepsilon_{w\sigma}(\infty, t_0) = \frac{\sigma}{E_w} (1 + 0,8\varphi(\infty, t_0))$$

Τέλος, εισάγοντας την έννοια του ενεργού μέτρου ελαστικότητας $E_{w,eff}$ η σχέση που δίδει την συνολική παραμόρφωση που τελικώς προκαλείται στην τοιχοποιία από μακροχρόνιες δράσεις μπορεί να γραφεί :

$$\varepsilon_{w\sigma}(\infty, t_0) = \frac{\sigma}{E_{w,eff}}$$

Όπου $E_{w,eff}$ το ενεργό μέτρο ελαστικότητας για τον υπολογισμό παραμορφώσεων από δράσεις που προκαλούν ερπυσμό λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή ηλικίας και το οποίο δίδεται από την σχέση :

$$E_{w,eff} = \frac{E_w}{1 + 0,8\varphi(\infty, t_o)}$$

Τονίζεται όμως ότι σε περιπτώσεις που δεν απαιτείται να λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής χ όπως στους ελέγχους παραμορφώσεων στην ΟΚΛ μπορεί να χρησιμοποιείται η απλοποιημένη σχέση .

$$E_{w,eff} = \frac{E_w}{1 + \varphi(\infty, t_o)}$$

2.2.3.3 Χαλάρωση χάλυβα προέντασης

Το φαινόμενο της χαλάρωσης στην τοιχοποιία θα το συναντήσουμε στην περίπτωση που ασκηθεί προένταση στην τοιχοποιία. Αποτελεί μία ακόμη αιτία που υπάρχουν χρόνιες απώλειες στις δύναμης προέντασης. Έχουμε ήδη αναφερθεί στον ερπυσμό, και τώρα μελετάμε το φαινόμενο της χαλάρωσης του τένοντα προέντασης. Αρχικά όμως, ας ορίσουμε τι είναι η χαλάρωση. Με τον όρο χαλάρωση του χάλυβα εννοείται η παρατηρούμενη με την πάροδο του χρόνου μείωση της τάσης του χάλυβα παρόλο ότι βρίσκεται σε συνεχή σταθερή εφελκυστική παραμόρφωση.

Για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω χαλάρωσης ορίζεται το μέγεθος ρ_{1000} το οποίο και αντιπροσωπεύει την χαλάρωση του τένοντα σε χρόνο 1000 ώρες μετά από τη στιγμή της τάνυσης. Πιο συγκεκριμένα, το μέγεθος ρ_{1000} δίδει τη χαλάρωση σε ποσοστό (%) της αρχικής τιμής της τάσης τάνυσης η οποία προκύπτει μετά από 1000 ώρες τάνυσης με μέση θερμοκρασία 20° C, για αρχική τάση του χάλυβα προέντασης ίση με $0,7f_p$ όπου f_p είναι η πραγματική εφελκυστική αντοχή του χάλυβα προέντασης. Το μέγεθος ρ_{1000} προσδιορίζεται με δοκιμές επί δοκιμίων χάλυβα προέντασης από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου τένοντα, υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες χαλάρωσης.

Η *κατηγορία 1* στην οποία ανήκουν οι τένοντες από σύρματα ή καλώδια με τη συνήθη χαλάρωση, τότε λαμβάνεται η τιμή $\rho_{1000}=8\%$.

Έπειτα στην *κατηγορία 2* ανήκουν οι τένοντες από σύρματα ή καλώδια με ειδική επεξεργασία ώστε να έχουν μικρή χαλάρωση, τότε λαμβάνεται η τιμή $\rho_{1000}=2,5\%$.

Και τέλος, στην *τρίτη και τελευταία κατηγορία*, ανήκουν οι τένοντες που αποτελούνται από θερμής έλασης και επεξεργασμένες ράβδους, και η τιμή που λαμβάνεται είναι $\rho_{1000}=4\%$.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό της χαλάρωσης του τένοντα προέντασης μετά από χρόνο t από την τάνυση, για σταθερή τάση κατά τον χρόνο αυτό και ανάλογα με την κατηγορία χαλάρωσης του χρησιμοποιούμενου τένοντα.

Κατηγορία	ρ_{1000} (%)	Χαλάρωση
1	8	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5.39\rho_{1000}e^{6.7\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)}10^{-5}$
2	2,5	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0.66\rho_{1000}e^{9.1\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)}10^{-5}$
3	4	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1.98\rho_{1000}e^{8\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)}10^{-5}$

Πίνακας 2.2 Σχέσεις υπολογισμού απώλειας τάσης λόγω χαλάρωσης ανάλογα με την κατηγορία του χάλυβα

Όπου $\Delta\sigma_{pr}$ είναι η απώλεια τάσης προέντασης λόγω της χαλάρωσης του τένοντα, σ_{pi} είναι η τιμή της τάσης προέντασης στην αρχή της χαλάρωσης, $\mu=\sigma_{pi}/f_{pk}$ με f_{pk} χαρακτηριστική τιμή αντοχής σε εφελκυσμό του χάλυβα προέντασης και t ο χρόνος από την τάνυση.

Είναι προφανές ότι η μείωση της δύναμης προέντασης και άρα η μείωση της δρώσας τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του φαινομένου της χαλάρωσης του χάλυβα σε σχέση με την χαλάρωση που θα παρατηρείτο αν δεν συνυπήρχαν η συστολή ξηράνσεως και ο ερπυσμός της τοιχοποιίας. Με σκοπό να ληφθεί υπόψη αυτή η μείωση της χαλάρωσης που τελικά παρατηρείται, εισάγεται κατά τον υπολογισμό του συνόλου των χρόνιων απωλειών ο μειωτικός συντελεστής 0,8 ο οποίος εφαρμόζεται στην τιμή της χαλάρωσης που υπολογίζεται με σταθερή τάση προέντασης.

Η μεταβολή (μείωση) της τάσης που ασκείται στην τοιχοποιία κατά $\Delta\sigma_w$ έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή (μείωση) της θλιπτικής παραμόρφωσης της τοιχοποιίας κατά $\Delta\epsilon_w$. Αυτό σημαίνει την αύξηση του μήκους του στοιχείου

αφού μειώνεται η θλιβούσα δύναμη προέντασης και άρα μειώνεται η αντίστοιχη θλιπτική παραμόρφωση που αρχικά υπέστη λόγω της αρχικής δύναμης προέντασης. Επιπλέον η αύξηση του μήκους του στοιχείου συμπαρασύρει και αυξάνει αντίστοιχα και το μήκος του τένοντα ο οποίος είναι αγκυρωμένος στη τοιχοποιία. Έτσι ο τένοντας υφίσταται επί πλέον εφελκυστική παραμόρφωση από αυτήν που ήδη είχε ίση με την παραμόρφωση $\Delta\varepsilon_w$ της τοιχοποιίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η προϋπολογιζόμενη απώλεια τάσης $\Delta\sigma_{pr}$ του τένοντα λόγω χαλάρωσης να μειώνεται επειδή προφανώς η επί πλέον εφελκυστική παραμόρφωση προκαλεί επί πλέον αύξηση της τάσης του χάλυβα και μειώνει την απώλεια $\Delta\sigma_{pr}$. Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο ότι η τελική τιμή της απώλειας λόγω χαλάρωσης είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίστηκε προηγουμένως. Παρακάτω παρουσιάζεται ο υπολογισμός της νέας απώλειας χαλάρωσης,

$$\Delta\sigma_{pr} - \Delta\sigma_{p,r} = \Delta\varepsilon_w E_p$$

$$\Delta\sigma_{pr} - \Delta\sigma_{p,r} = \frac{\Delta\sigma_w}{E_w} E_p \quad (1)$$

Έπειτα, η δυσμενέστερη τάση που ασκείται στη τοιχοποιία είναι :

$$\Delta\sigma_w = \frac{\Delta\sigma_p A_p}{A_w} \left(1 + \frac{A_w}{I_w} z_{wp}^2 \right) \quad (2)$$

Με βάση τις δύο παραπάνω σχέσεις (1) και (2), καταλήγουμε:

$$\Delta\sigma_{pr} - \Delta\sigma_{p,r} = \frac{E_p}{E_w} \frac{\Delta\sigma_{p,r} A_p}{A_w} \left(1 + \frac{A_w}{I_w} z_{wp}^2 \right)$$

$$\Delta\sigma_{pr} = \frac{E_p}{E_w} \frac{\Delta\sigma_{p,r} A_p}{A_w} \left(1 + \frac{A_w}{I_w} z_{wp}^2 \right) + \Delta\sigma_{p,r}$$

$$\Delta\sigma_{p,r} = \frac{\Delta\sigma_{pr}}{1 + \frac{E_p}{E_w} \frac{A_p}{A_w} \left(1 + \frac{A_w}{I_w} z_{wp}^2 \right)}$$

Και όπως αναφέρθηκε, για να συνυπολογίσουμε την μείωση που προκαλεί η συστολή ξήρανσης και ο ερπισμός στην χαλάρωση χρησιμοποιούμε τον μειωτικό συντελεστή 0,8. Άρα,

$$\Delta\sigma_{p,r} = \frac{0,8 \Delta\sigma_{pr}}{1 + \frac{E_p}{E_w} \frac{A_p}{A_w} \left(1 + \frac{A_w}{I_w} z_{wp}^2 \right)}$$

Υπολογισμός της χαλάρωσης για διαστήματα υπό διαφορετική τάση.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως κατά τη διάρκεια της ζωής ενός έργου η τιμή της προέντασης μεταβάλλεται σε ορισμένα χρονικά διαστήματα. Αυτό είναι δυνατό να προέρχεται από την ελαστική βράχυνση λόγω επιβολής της προέντασης τμηματικά είτε από αίτια που εξαρτώνται από τον σχεδιασμό της προέντασης. Για τον υπολογισμό της χαλάρωσης του τένοντα προέντασης μετά από χρόνο που περιλαμβάνει χρονικά διαστήματα στα οποία η τάση της προέντασης λαμβάνει διαφορετικές τιμές θα πρέπει να γίνεται με την χρήση **της μεθόδου του ισοδύναμου χρόνου**. Η διαδικασία υπολογισμού των απωλειών προέντασης σε κάποιο διάστημα i το οποίο αρχίζει σε χρόνο t_i και έχει διάρκεια Δt_i περιγράφεται παρακάτω. Αρχικά, η τάση του χάλυβα προέντασης είναι σ_i στην έναρξη του διαστήματος i . Σε αυτή την περίπτωση αν προσθέσουμε τις απώλειες της τάσης λόγω χαλάρωσης που συνέβησαν σε κάθε ένα από τα προηγούμενα $i-1$ διαστήματα, η συνολική απώλεια λόγω χαλάρωσης θα είναι $\sum_1^{i-1} \Delta \sigma_{pr,j}$.

Γίνεται η θεώρηση ότι μέχρι την αρχή του διαστήματος i υπάρχει ένα μονο διάστημα το οποίο όμως έχει σταθερή τάση ίση με την αρχική τάση προέντασης και χρονική διάρκεια ίση με χρόνο t_e που τον ονομάζουμε ισοδύναμο χρόνο. Η αρχική τάση προέντασης είναι ίση με την τάση του χάλυβα προέντασης $\sigma_{p,j}$ κατά την έναρξη του διαστήματος i συν το άθροισμα των απωλειών κατά τα προηγούμενα διαστήματα το είναι $\sum_1^{i-1} \Delta \sigma_{pr,j}$. Άρα η σταθερή τάση του υποθετικού διαστήματος διάρκειας ίσης με τον ισοδύναμο χρόνο t_e είναι $\sigma_{p,i} + \sum_1^{i-1} \Delta \sigma_{pr,j}$.

Με βάση την προηγούμενη θεώρηση μέχρι το διάστημα i υπάρχει μια χρονική περίοδος με σταθερή τάση προέντασης άρα μέχρι το τέλος του χρόνου t_e είναι δυνατή η εφαρμογή των συναρτήσεων χαλάρωσης-χρόνου. Ο χρόνος t_e θα είναι αυτός που επαληθεύει την συνάρτηση χαλάρωσης-χρόνου και άρα με επίλυση της συνάρτησης αυτής ως προς t_e προσδιορίζεται η τιμή.

Αφού υπολογισθεί ο ισοδύναμος χρόνος t_e χρησιμοποιείται εκ νέου η συνάρτηση χαλάρωσης-χρόνου για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω χαλάρωσης του τένοντα στο διάστημα i . Δεδομένου ότι ο ισοδύναμος χρόνος αντιπροσωπεύει τον χρόνο που έχει περάσει μέχρι την χρονική στιγμή που αρχίζει το χρονικό διάστημα i , για να υπολογισθούν οι συνολικές απώλειες λόγω χαλάρωσης μέχρι το τέλος του διαστήματος i ο συνολικός χρόνος που θα πρέπει να ληφθεί είναι ίσος με το άθροισμα του ισοδύναμου χρόνου t_e συν τη χρονική διάρκεια του διαστήματος i , δηλαδή συνολικά $t_e + \Delta t_i$.

Η ποσότητα των απωλειών που θα αντιστοιχούν σε χρόνο $t_e + \Delta t_e$ περιλαμβάνει τη συνολική ποσότητα των απωλειών λόγω χαλάρωσης μέχρι το τέλος του διαστήματος i . Δεδομένου όμως ότι ζητείται ο υπολογισμός μόνο των απωλειών λόγω χαλάρωσης που πραγματοποιήθηκαν μέσα στο διάστημα i θα

πρέπει από το σύνολο των απωλειών να αφαιρεθούν οι απώλειες που έγιναν πριν από την έναρξη του διαστήματος i οι οποίες είναι γνωστές και ίσες με $\sum_1^{i-1} \Delta\sigma_{pr,j}$. Άρα η ποσότητα $\sum_1^{i-1} \Delta\sigma_{pr,j}$ θα πρέπει να αφαιρεθεί από τη συνολική ποσότητα των απωλειών.

2.2.4 Τυπολόγιο

Στιγμαίες Απώλειες :

- ο **Απώλειες τριβών** σε ευθυγραμμία του τένοντα :

$$P_x = P_o e^{-xk_x}$$

$$k_x = \mu \left(\frac{\alpha}{\chi} + k \right)$$

όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής μεταξύ του τένοντα και του σωλήνα προέντασης, **k είναι η αθέλητη γωνία τριβών σε ευθυγραμμία**, ο λόγος α/χ αποτελείται από το α που για τις παραβολικές χαράξεις είναι η μεταβολή της εφαπτομένης και είναι γραμμική σχέση με το χ . Στην περίπτωση της γραμμικής χάραξης το $\alpha=0$. Άρα η σχέση απλοποιείται ως εξής,

$$k_x = \mu k \quad (k_x \text{ σε } \frac{\text{rad}}{\text{m}})$$

- ο Για ευθύγραμμο τένοντα **το μήκος επιρροής ολίσθησης** της αγκύρωσης x_o είναι,

$$\chi_o = -\frac{1}{k_x} \ln \left(1 - \sqrt{\frac{k_x \delta}{\varepsilon_{pi}}} \right), \quad \varepsilon_{pi} = \frac{P_i}{E_p A_p}$$

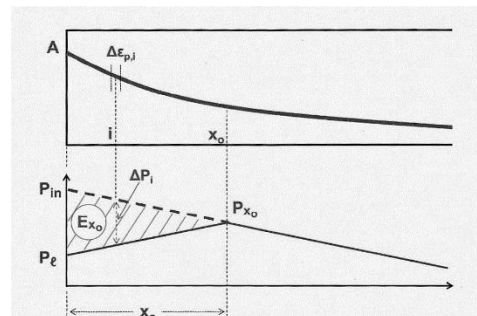
E_p το μέτρο ελαστικότητας του τένοντα.

A_p το εμβαδόν διατομής του τένοντα

δ η μέγιστη ολίσθηση του τένοντα, η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή

P_i η δύναμη προέντασης του τένοντα στην διατομή i που εξετάζουμε

ε_{pi} η παραμόρφωση του τένοντα



- ο Οπότε, μετά την εύρεση του μήκους επιρροής ολίσθησης, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των στιγμιαίων απωλειών στο σημείο τανύσεως.

$$P_l = P_{in}(2e^{-x_o k_x} - 1)$$

Χρόνιες Απώλειες :

ο **Ερπυσμός**

Οι απώλειες προέντασης λόγω ερπυσμού της τοιχοποιίας δίνονται από την παρακάτω σχέση,

$$\Delta\sigma_{p,c} = \frac{\left(\frac{E_p}{E_w}\right) \varphi_{\infty} \sigma_w}{1 + \left(\frac{E_p}{E_{w,eff}}\right) \frac{A_p}{A_w} \left(1 + \frac{A_w}{I_w} z_{wp}^2\right)}$$

E_p το μέτρο ελαστικότητας του τένοντα.

A_p το εμβαδόν διατομής του τένοντα

E_w το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας

A_w το εμβαδόν διατομής της τοιχοποιίας

$E_{w,eff}$ το ενεργό μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας

φ_{∞} ο μακροχρόνιος συντελεστής ερπυσμού

I_w η ροπή αδράνειας της τοιχοποιίας

z_{wp} η εκκεντρότητα του τένοντα

Όπου στην περίπτωση που δεν έχει κάποια εκκεντρότητα ο τένοντας $z=0$. Επίσης, $E_{w,eff}$ είναι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας για τον υπολογισμό παραμορφώσεων από δράσεις που προκαλούν ερπυσμό.

$$E_{w,eff} = \frac{E_w}{1 + \varphi_{\infty}}$$

Ακόμη, φ_{∞} είναι ο συντελεστής μακροχρόνιου ερπυσμού, τον οποίο βρίσκουμε από τον πίνακα του EC6 (Πίνακας 2.1)

Το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό προσδιορίζεται ως εξής :

$$E_w = \frac{1}{\frac{\delta}{E_b} + \frac{1-\delta}{E_m}}$$

Όπου $\delta=t_b/(t_b+t_m)$, t_b =ύψος λιθοσώματος, t_m =πάχος αρμών, E_b = μέτρο ελαστικότητας λιθοσώματος και E_m =μέτρο ελαστικότητας κονιάματος αρμών.

ο **Χαλάρωση**

Ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου τένοντα, υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες χαλάρωσης.

- ✓ Η *κατηγορία 1* στην οποία ανήκουν οι τένοντες από σύρματα ή καλώδια με τη συνήθη χαλάρωση, τότε λαμβάνεται η τιμή $\rho_{1000}=8\%$.
- ✓ Έπειτα στην *κατηγορία 2* ανήκουν οι τένοντες από σύρματα ή καλώδια με ειδική επεξεργασία ώστε να έχουν μικρή χαλάρωση, τότε λαμβάνεται η τιμή $\rho_{1000}=2,5\%$.
- ✓ Και τέλος, στην *τρίτη και τελευταία κατηγορία*, ανήκουν οι τένοντες που αποτελούνται από θερμής έλασης και επεξεργασμένες ράβδους, και η τιμή που λαμβάνεται είναι $\rho_{1000}=4\%$.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό της χαλάρωσης του τένοντα προέντασης μετά από χρόνο t από την τάνυση, για σταθερή τάση κατά τον χρόνο αυτό και ανάλογα με την κατηγορία χαλάρωσης του χρησιμοποιούμενου τένοντα.

Κατηγορία	ρ_{1000} (%)	Χαλάρωση
1	8	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5.39\rho_{1000}e^{6.7\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)}10^{-5}$
2	2,5	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0.66\rho_{1000}e^{9.1\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)}10^{-5}$
3	4	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1.98\rho_{1000}e^{8\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)}10^{-5}$

Πίνακας 2.2 Σχέσεις υπολογισμού απώλειας τάσης λόγω χαλάρωσης ανάλογα με την κατηγορία του χάλυβα

Όπου $\Delta\sigma_{pr}$ είναι η απώλεια τάσης προέντασης λόγω της χαλάρωσης του τένοντα, σ_{pi} είναι η τιμή της τάσης προέντασης στην αρχή της χαλάρωσης, $\mu=\sigma_{pi}/f_{pk}$ με f_{pk} χαρακτηριστική τιμή αντοχής σε εφελκυσμό του χάλυβα προέντασης και t ο χρόνος από την τάνυση.

Είναι προφανές ότι η μείωση της δύναμης προέντασης και άρα η μείωση της δρώσας τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του φαινομένου της χαλάρωσης του χάλυβα σε σχέση με την χαλάρωση που θα παρατηρείτο αν δεν συνυπήρχαν η συστολή ξηράνσεως και ο ερπυσμός της τοιχοποιίας. Με σκοπό να ληφθεί υπόψη αυτή η μείωση της χαλάρωσης που τελικά παρατηρείται,

εισάγεται κατά τον υπολογισμό του συνόλου των χρόνιων απωλειών ο μειωτικός συντελεστής 0,8 ο οποίος εφαρμόζεται στην τιμή της χαλάρωσης που υπολογίζεται με σταθερή τάση προέντασης.

$$\Delta\sigma_{p,r} = \frac{0,8\Delta\sigma_{pr}}{1 + \frac{E_p}{E_w} \frac{A_p}{A_w} \left(1 + \frac{A_w}{I_w} z_{wp}^2\right)}$$

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΟΠΛΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Κατά το σχεδιασμό ισχύει η βασική ανισότητα :

$$S_d \leq R_d$$

Όπου :

S_d είναι η δράση .

R_d είναι η αντίσταση ή δύναμη αντοχής.

Η δράση προκύπτει από τους συνδυασμούς φορτίσεων και με τους επιμέρους συντελεστές για κάθε δράση, όπως αυτοί ορίζονται από τους ισχύοντες κανονισμούς.

3.1 Αξονική δύναμη αντοχής τοίχου

Η αξονική δύναμη αντοχής ενός άοπλου τοίχου δίδεται από τη σχέση :

$$N_{RD} = \frac{\Phi_t l_w f_{wk} t}{\gamma_m}$$

όπου :

Φ_t μειωτικός συντελεστής που εισάγεται για να ληφθεί υπόψη η λυγηρότητα του τοίχου και η πιθανή εκκεντρότητα των φορτίων.

f_{wk} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.

γ_m ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας, στην περίπτωση αυτή είναι ίσος με την μονάδα.

t το πάχος του τοίχου.

l_w το μήκος του τοίχου.

Ο μειωτικός συντελεστής λόγω λυγηρότητας και εκκεντρότητας στην κορυφή ή την βάση του τοίχου υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Phi_t = 1 - 2 \frac{e_t}{t}$$

όπου:

t το πάχος της τοιχοποιίας

e_t η εκκεντρότητα στην κορυφή ή την βάση του τοίχου.

$$e_t = \frac{M_d}{N_d}$$

Όπου:

M_d είναι η ροπή στην κορυφή ή την βάση του τοίχου που είναι αποτέλεσμα της εκκεντρότητας των φορτίων των πλακών κάθετα στο επίπεδο του τοίχου.

N_d είναι η αξονική στην υπόψη διατομή.

Συγκεντρωμένα Φορτία

Κατά τον Ευρωκώδικα 6 η αξονική δύναμη αντοχής τοίχων από λιθοσώματα αυξάνεται όταν φορτίζεται ο τοίχος σημειακά, και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{RD} = \beta A_b f_{wd}$$

όπου :

β είναι ο αυξητικός συντελεστής για τα συγκεντρωμένα φορτία.

A_b είναι η ενεργός επιφάνεια που υπολογίζεται κατωτέρω.

f_{wd} η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού της τοιχοποιίας.

$$\beta = [(1 + 0,15x)(1,5 - 1,1 \frac{A_b}{A_{ef}})]$$

$$\text{Για } \frac{2\alpha_1}{H} = 0 \rightarrow 1 \leq \beta \leq 1,25$$

$$\text{Για } \frac{2\alpha_1}{H} \geq 1,0 \rightarrow 1 \leq \beta \leq 1,5$$

Για ενδιάμεσες τιμές του λόγου $\frac{2\alpha_1}{H}$ ισχύει η γραμμική παρεμβολή.

$$x = \frac{2\alpha_1}{H}$$

όπου :

A_{ef} η ενεργός επιφάνεια.

A_b η φορτιζόμενη επιφάνεια.

a_1 η απόσταση της φορτιζόμενης επιφάνειας από το πλησιέστερο άκρο του τοίχου.

H το ύψος του τοίχου μέχρι τη στάθμη επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου.

Θα πρέπει $A_b = bt_b \leq 0,45A_{ef}$

$$A_{ef} = L_{ef}t$$

$$L_{ef} = b + H \tan(30^\circ) > 2,2A_b/t$$

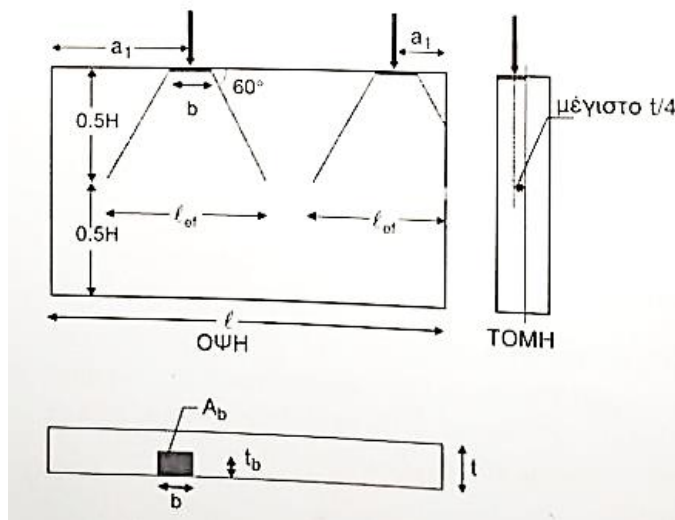
όπου :

L_{ef} το μήκος επιβολής του φορτίου στο μέσον του ύψους του τοίχου.

b το μήκος επιβολής του φορτίου

t_b το πλάτος επιβολής του φορτίου

t το πάχος του τοίχου



Εικόνα 3.1 Μεμονωμένο φορτίο σε τοίχο

3.2 Τέμνουσα δύναμη αντοχής τοίχου

Η τέμνουσα αντοχής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{RD} = \frac{f_{vwk} t l_c}{\gamma_m}$$

f_{vwk} είναι η χαρακτηριστική διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας και για τον υπολογισμό της λαμβάνεται μόνο το κατακόρυφο φορτίο που δρα στη θλιβόμενη ζώνη του τοίχου.

t το πραγματικό πάχος του τοίχου.

l_c είναι το τμήμα του μήκους του τοίχου που βρίσκεται υπο θλίψη και υπολογίζεται θεωρώντας τριγωνική κατανομή των ορθών τάσεων.

γ_m ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας, στην περίπτωση αυτή είναι ίσος με 1,35.

$$l_c = 3\left(\frac{l_w}{2} - e\right)$$

όπου:

l_w το μήκος του τοίχου.

e η εκκεντρότητα, στο επίπεδο του τοίχου, των κατακόρυφων φορτίων που συνοδεύουν την υπόψη τέμνουσα δύναμη.

Όταν ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται εκτός της διατομής, δηλαδή όταν $e < l/6$, τότε όλος ο τοίχος είναι υπό θλίψη και το l_c ισούται με το μήκος του τοίχου.

3.3 Καμπτική ροπή αντοχής τοίχου

- ο Ροπή εντός του επιπέδου του τοίχου.

$$M_{RD} = \frac{\sigma_d t l^2}{2} \left(1 - \frac{\sigma_d \gamma_m}{f_{wk}}\right)$$

- ο Ροπή εκτός του επιπέδου του τοίχου.

$$M_{RD} = \frac{\sigma_d t^2 l}{2} \left(1 - \frac{\sigma_d \gamma_m}{f_{wk}}\right)$$

όπου:

σ_d η ορθή τάση στον υπόψη τοίχο.

f_{wk} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.

γ_m ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας, στην περίπτωση αυτή είναι ίσος με την μονάδα.

t και l το πάχος και το μήκος του τοίχου αντίστοιχα.

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

(ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΥΨΟΣ ΑΝΩΦΛΙΟΥ ΚΑΙ ΠΛΑΤΟΣ ΠΕΣΣΟΥ)

4.1 Εισαγωγή

Θεωρήθηκε απαραίτητη η εύρεση της εξάρτησης της αξονικής δύναμης που καταλήγει στον πεσσο σε σχέση με το ύψος του ανωφλίου καθώς και το πλάτος του πεσσού. Σκοπός αυτής της διερεύνησης αφορά την προένταση, διότι με την προένταση επιβάλλεται μία συγκεντρωμένη αξονική δύναμη, που στόχο έχει την βελτίωση της συμπεριφοράς του πεσσού.

Στις επόμενες υποπαραγράφους παρουσιάζεται μία τοιχοποιία διαστάσεων $5.0 \times 4.0 \times 0.5 \text{m}^3$ ($b \times h \times t$), που στην βάση της έχουν τοποθετηθεί ελατήρια με $K_x = K_y = 8000 \text{KN/m}$ και $K_z = 12000 \text{KN/m}$. Περιέχει δύο ανοίγματα παραθύρων διαστάσεων $0.8 \times 1.40 \text{m}^2$ ($b \times h$).

Η τοιχοποιία έχει πυκνότητα $\rho_w = 1.8 \text{Mgr/m}^3$, μέτρο ελαστικότητας $E = 0.8 \text{GPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.25$. Η θλιπτική τάση αντοχής $f_{wc} = 2 \text{MPa}$ και η εφελκυστική τάση αντοχής είναι $f_{wt} = 0.1 \text{MPa}$.

4.2 Πεσσός πλάτους 1.4m

Αρχικά θα μελετηθεί ο πεσσός πλάτους 1.4m. Πρώτο βήμα πριν προχωρήσει η ανάλυση είναι η εύρεση της δύναμης που θα επιβληθεί (προένταση) στην τοιχοποιία.

Από την μεθοδολογία εύρεσης της συγκεντρωμένης δύναμης (Κεφάλαιο 3.1) υπολογίζουμε :

$$N_{RD} = \beta A_b f_{wd}$$

$$a_1 = \frac{1.4}{2} = 0.7 \text{m}, \quad x = \frac{2a_1}{H} = \frac{2 \cdot 0.7}{1.4} = 1,$$

$$b = 0.4 \text{m}, \quad t_b = 0.5 \text{m} \rightarrow A_b = 0.2 \text{m}^2 \leq 0.45 A_{ef} = 0.272$$

$$L_{ef} = b + H \tan(30^\circ) = 1.208 \text{m} > \frac{2.2 A_b}{t} = 0.88 \text{m}$$

Επίσης το L_{ef} βρίσκεται εντός του πλάτους του πεσσού.

$$\beta = [(1 + 0,15x)(1,5 - 1,1 \frac{A_b}{A_{ef}})] = 1.31 \text{ εντός των τιμών } 1.0 \text{ και } 1.50.$$

$$N_{RD} = \beta A_b f_{wd} = 348 \text{ KN}$$

Όσο μόνο το 60% της αντοχής θα πρέπει να επιβληθεί, για να μην δημιουργηθεί τριτογενής ερπυσμός.

$$\text{Οπότε } N = 0,6 * 348 \text{ KN} \approx 200 \text{ KN}$$

Ένας δεύτερος έλεγχος της δύναμης αυτής γίνεται με την μέθοδο της προεντάσεως.

Δύναμη Προεντάσεως

$$F \text{ (KN)} \quad 230$$

Τάση Προένταση στο Χάλυβα

$$f_{se} \text{ (Mpa)} \quad 385$$

$$f_{se}' \text{ (Mpa)} \text{ (από τις άμεσες απώλειες)} \quad 383,128$$

Τάση Προένταση στη Τοιχοποιία

$$f_c \text{ (Mpa)} \quad 0,32857$$

$$f_c' \text{ (Mpa)} \text{ (από τις άμεσες απώλειες)} \quad 0,32697$$

$$\text{Ποσοστό της Θλιπτικής Αντ. Της Τοιχ.} \quad 16\%$$

ο Άμεσες Απώλειες:

$$P \text{ (KN)} \quad 230$$

$$A_{\text{διατομή}} \text{ (m}^2\text{)} \quad 0,7$$

$$\text{Τάση Τανύσεως (Mpa)} \quad 385$$

$$\text{Απαιτούμενη Επιφάνεια (cm}^2\text{)} \quad 5,974025974$$

Τένοντας

$$y_m \text{ (m)} \quad 0,5$$

$$y_{\text{βαση}} \text{ (m)} \quad 0,5$$

$$f \text{ (m)} \quad 0$$

$$l_0 \text{ (m)} \quad 1,5$$

$$\tan \alpha = a \quad 0$$

$$\mu \text{ (rad}^{-1}\text{)} \quad 0,65$$

$$k \text{ (rad/m)} \quad 0,01$$

$$\text{Ολίσθηση Σφηνών } \delta \text{ (m)} \quad 0$$

$$k_x \text{ (rad/m)} \quad 0,0065$$

$$\epsilon_p \text{ (\%)} \quad 0,197435897$$

$$\text{Π.Ο (m)} \quad 0$$

$$P(o) \text{ (KN)} \quad 230$$

$$P(x) = P(o) * e^{(-xkx)}$$

$$P(m) \text{ (KN)} \quad 228,8814786 \quad P(L) \text{ (KN)} = 227,7629572$$

ο Χρόνιες Απώλειες:

Ερπυσμός		Χαλάρωση	
φ_{∞}	0,7	ρ_{1000} (%)	4
$E_{w,eff}$ (Gpa)	0,47059	$\mu=f_{se}/f_{pk}$	0,7
$\Delta\varepsilon_{el}$ (%)	0,41071	t	1000
$\Delta\varepsilon_{sc}$ (%)	0,2875	$\Delta\sigma_{pr}$ (Mpa)	8,20574
$\Delta\varepsilon_{tot}$ (‰)	0,69821	$\Delta\sigma_{p,r}$ (Mpa)	4,84958
Απώλειες σε μορφή τάσεων			
$\Delta\sigma_{p,c}$ (Mpa)	41,4161		

Συνολικές Απώλειες

$\Delta\sigma_{total}$ (Mpa)	46,2657
fse" (Mpa)	336,862
fc" (Mpa)	0,28749
F_{final} (KN)	201,242
Διαφορά (%)	-13%

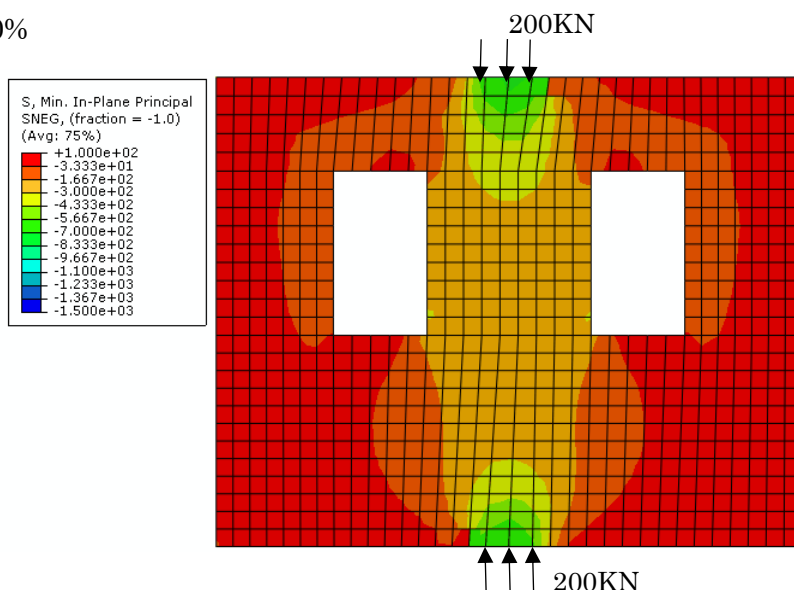
Σύμφωνα και με την μέθοδο της προεντάσεως και επηρεασμένοι από το προηγούμενο αποτέλεσμα για να έχουμε μια τιμή κοντά στα 200KN μετά από τις άμεσες και χρόνιες απώλειες πρέπει να επιβληθεί μία δύναμη στα 230KN. Ωστόσο στο πείραμα θα επιβληθεί η δύναμη που θα έχει σε άπειρο χρόνο, δηλαδή 200KN.

Η προσομοίωση της τοιχοποιίας έγινε στο abaqus, και η επιβολή της δύναμης έγινε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος ήταν σε ένα σημείο και ο δεύτερος σε τρία σημεία. Και τα δύο αποτελέσματα ήταν ίδια, με μόνη διαφορά στην πρώτη περίπτωση, στο σημείο έδρασης του φορτίου υπήρξε υπέρβαση των επιτρεπόμενων τάσεων. Για αυτό το λόγω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της δεύτερης περίπτωσης που το φορτίο είναι τοποθετημένο σε τρία σημεία.

ο *Ανώφλι 0,80m* :

Αξονική Δύναμη στο πεσσό : -179,84KN

Μείωση : 10%

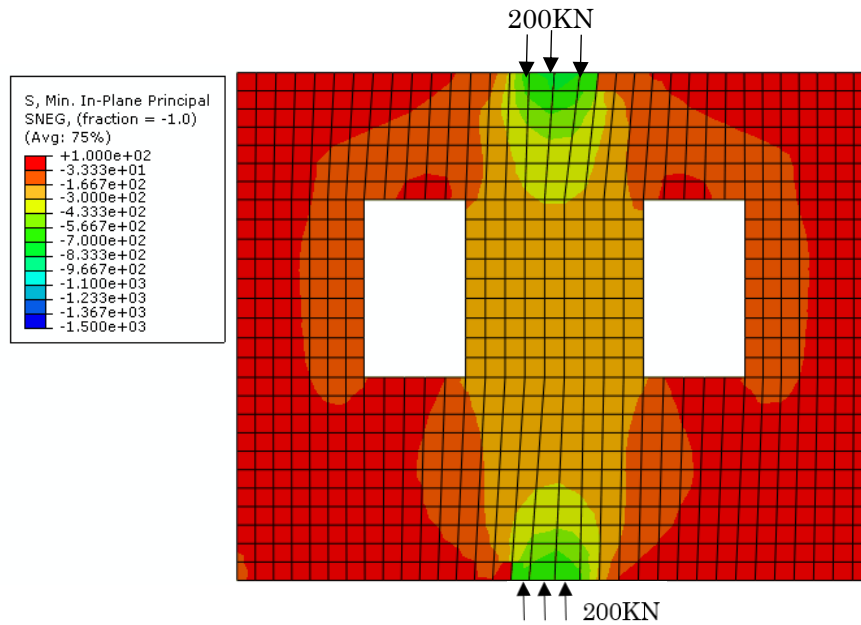


Εικόνα 4.1 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέντασης στην τοιχοποιία

ο *Ανώφλι 1,00m* :

Αξονική Δύναμη στο πεσοό : -174,1KN

Μείωση : 12,95%

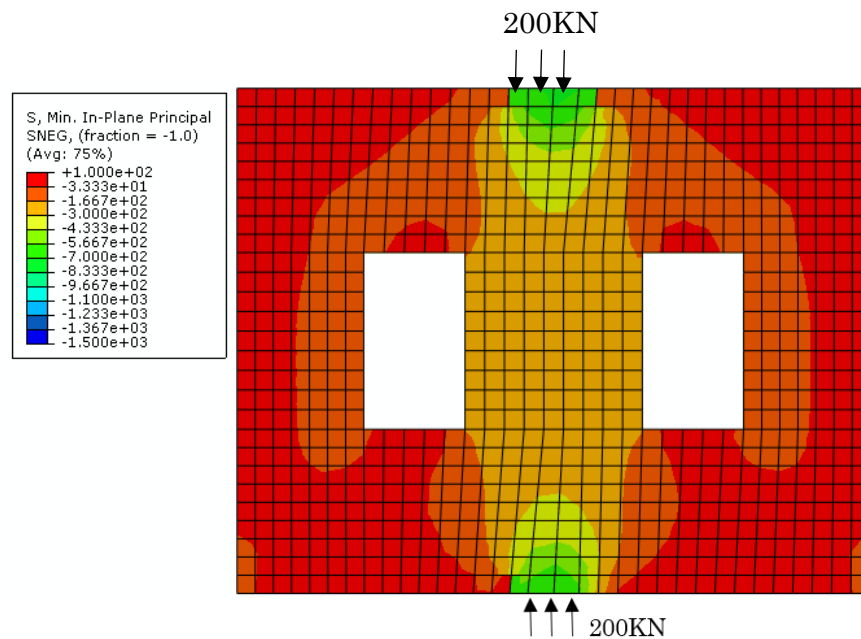


Εικόνα 4.2 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέντασης στην τοιχοποιία

ο *Ανώφλι 1,30m* :

Αξονική Δύναμη στο πεσοό : -167,73KN

Μείωση : 16,14%

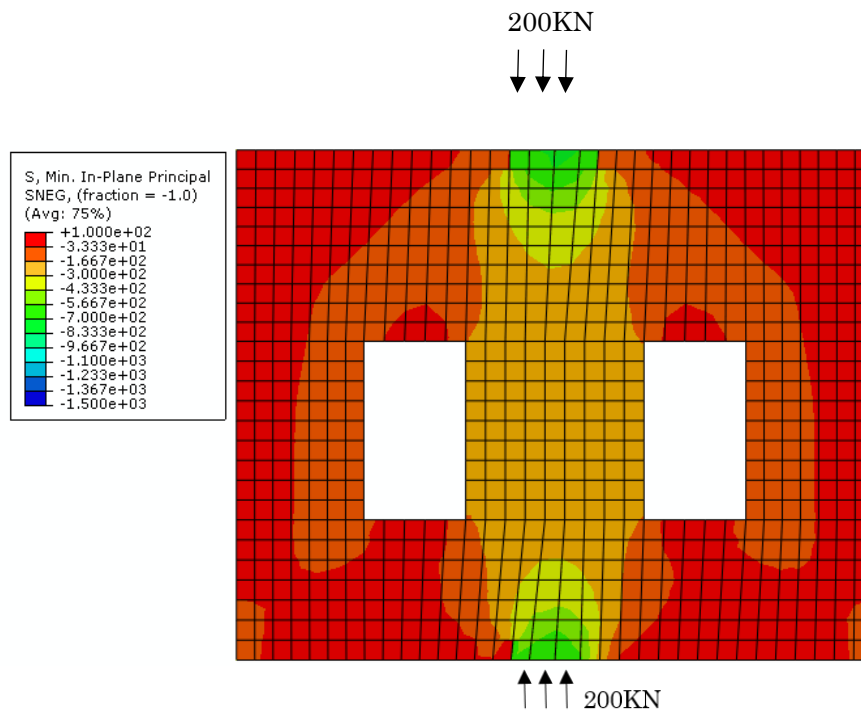


Εικόνα 4.3 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέντασης στην τοιχοποιία

ο **Ανώφλι 1,50m :**

Αξονική Δύναμη στο πεσοό : -165,09KN

Μείωση : 17,46%

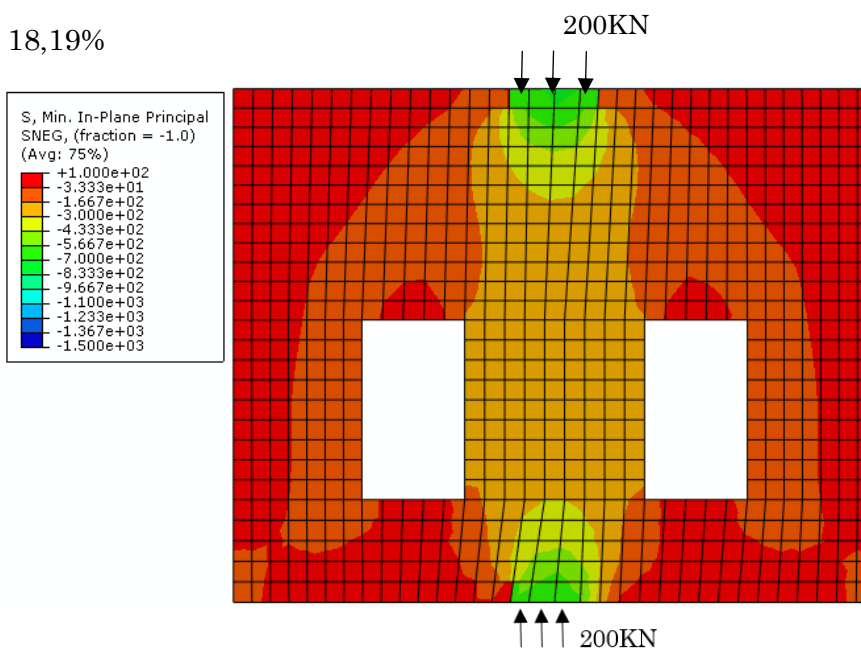


Εικόνα 4.4 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέντασης στην τοιχοποιία

ο **Ανώφλι 1,80m :**

Αξονική Δύναμη στο πεσοό : -163,63KN

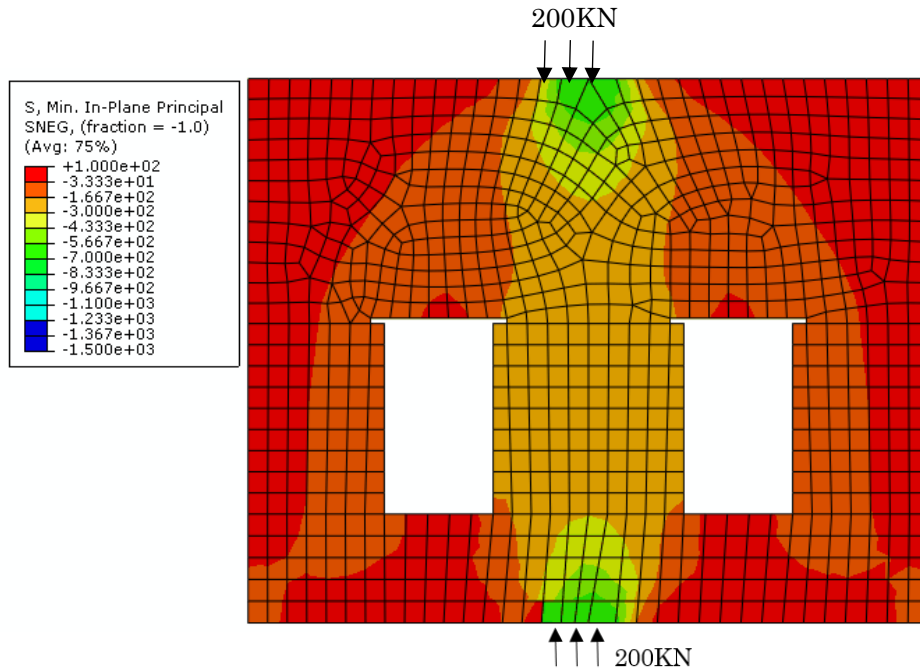
Μείωση : 18,19%



Εικόνα 4.5 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέντασης στην τοιχοποιία

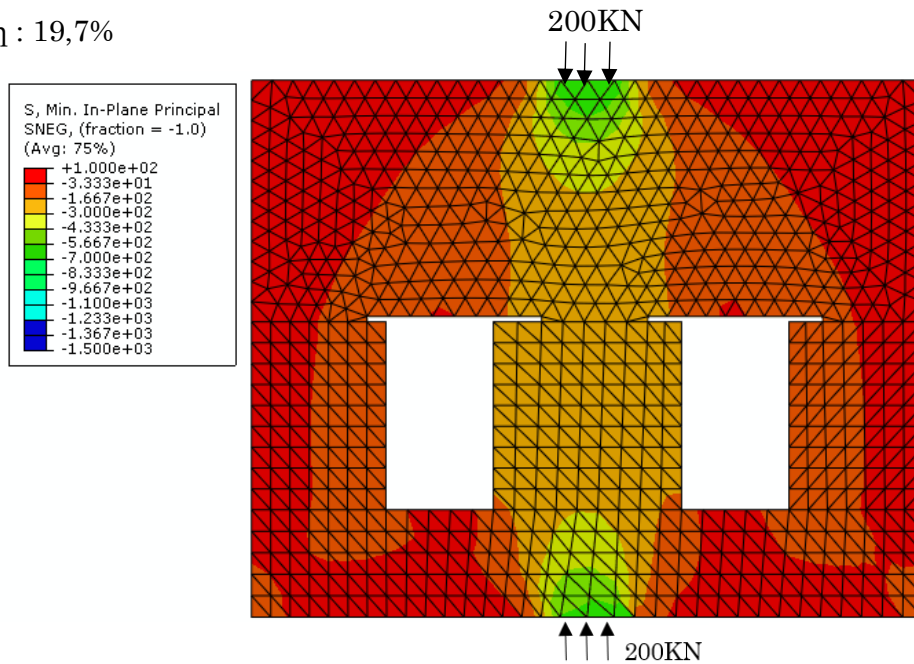
(με ξύλινο πρέκι) :

- 1) Μήκους 1,00m κεντρικά τοποθετημένο
Αξονική Δύναμη στο πεσσό : -160,91KN
Μείωση : 19,5%



Εικόνα 4.6 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέκτασης στην τοιχοποιία

- 2) Μήκους 1,30m έκκεντρα τοποθετημένο
Αξονική Δύναμη στο πεσσό : -160,53KN
Μείωση : 19,7%

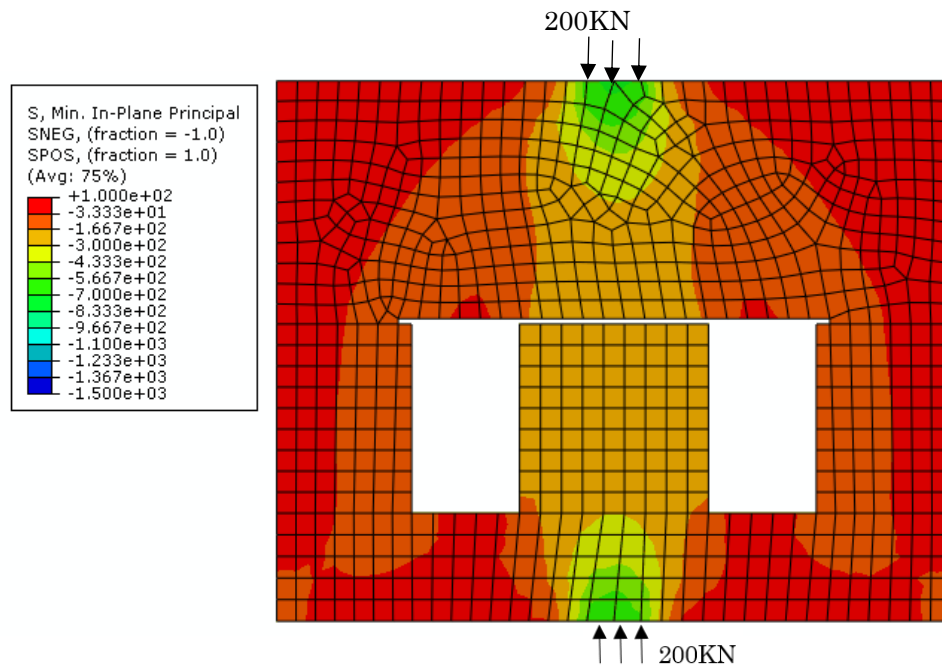


Εικόνα 4.7 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέκτασης στην τοιχοποιία

3) Που ενώνει τα δύο παράθυρα

Αξονική Δύναμη στο πεσοό : -160,88KN

Μείωση : 19,5%

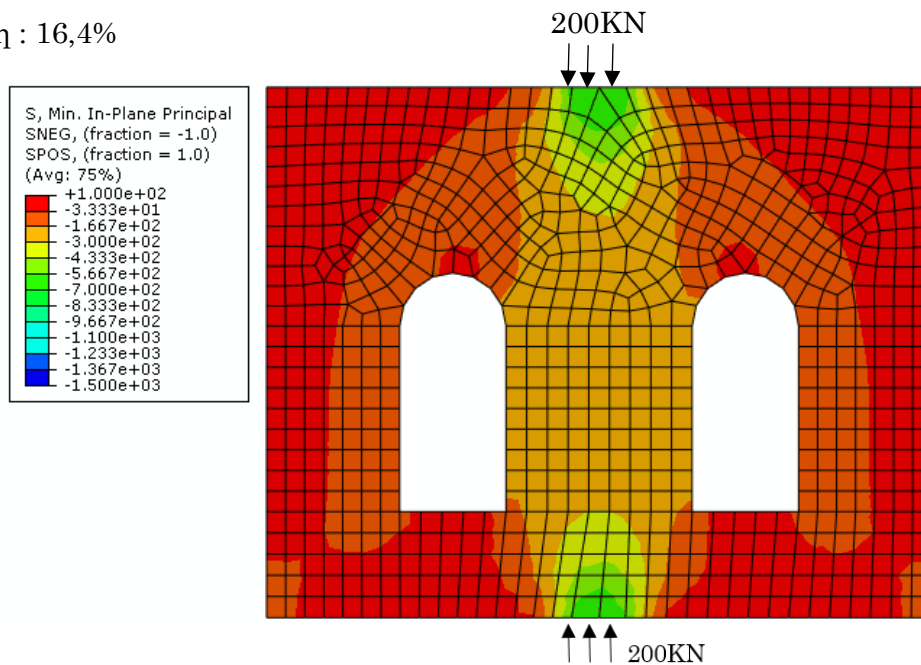


Εικόνα 4.8 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέντασης στην τοιχοποιία

(Με τοξωτά πρέκια)

Αξονική Δύναμη στο πεσοό : -167,20KN

Μείωση : 16,4%

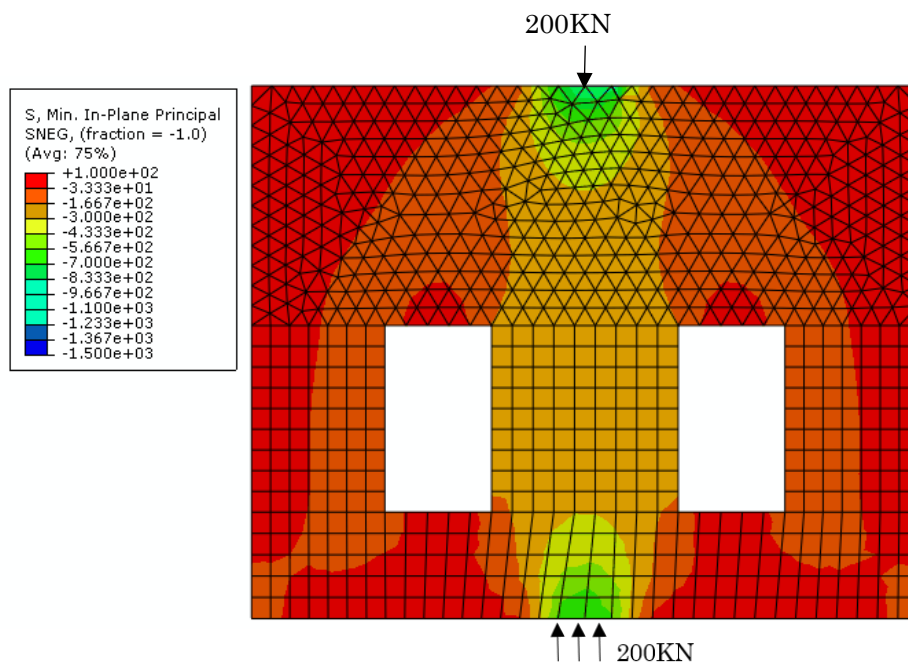


Εικόνα 4.9 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέντασης στην τοιχοποιία

(με χαλύβδινη πλάκα αγκύρωσης διαστάσεων $0,4 \times 0,5 \times 0,025 \text{m}^3$) :

Αξονική Δύναμη στο πεσσού : -160,99KN

Μείωση : 19,5%



Εικόνα 4.10 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέντασης στην τοιχοποιία

4.3 Πεσσού πλάτους 1.0m

Και στην περίπτωση του πεσσού με μήκος 1m εφαρμόστηκε προένταση 200KN.

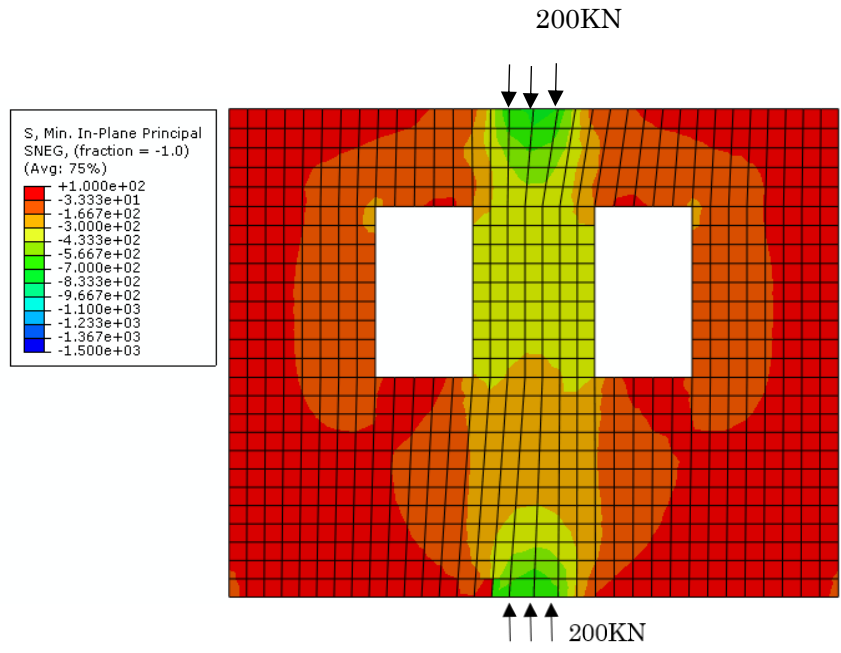
$$L_{ef} = b + H \tan(30^\circ) = 1.208 \text{m} > 1 \text{m}$$

Το L_{ef} **δεν** βρίσκεται εντός του πλάτους του πεσσού.

- **Ανώφλι 0,80m :**

Αξονική Δύναμη στο πεσσού : -163,44KN

Μείωση : 18,28%

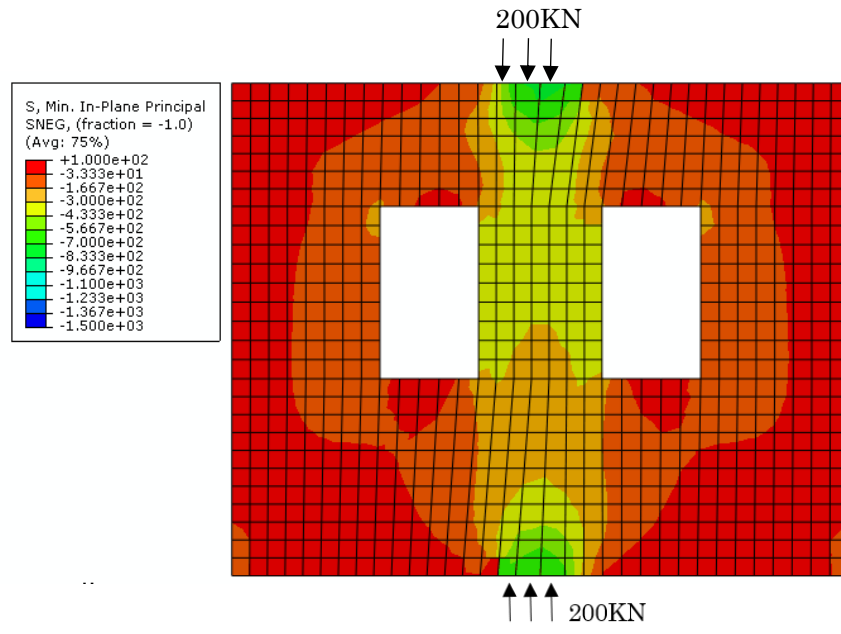


Εικόνα 4.11 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέκτασης στην τοιχοποιία

ο **Ανώφλι 1,00m :**

Αξονική Δύναμη στο πεσοό : -155,18KN

Μείωση : 22,4%

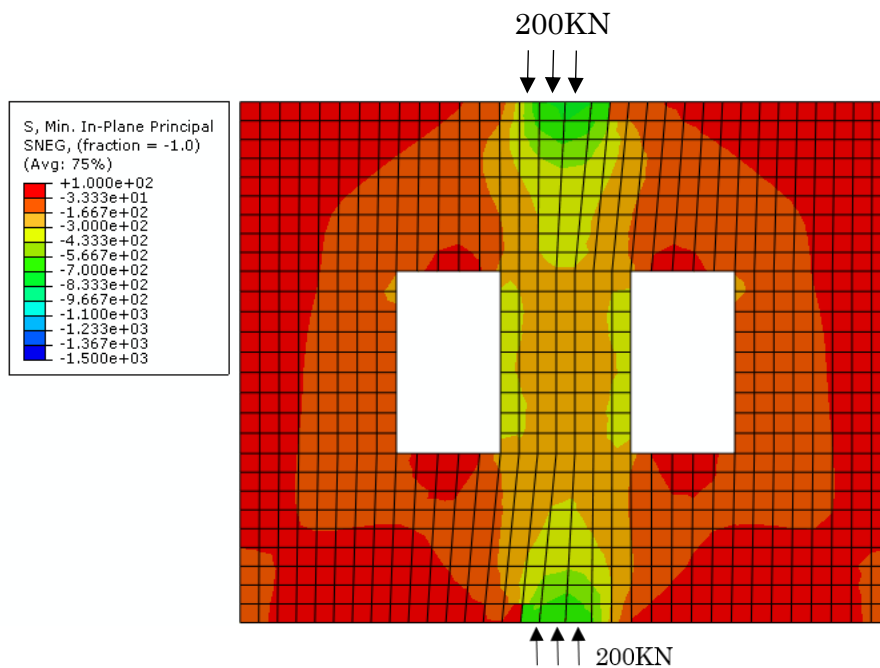


Εικόνα 4.12 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέκτασης στην τοιχοποιία

ο **Ανώφλι 1,30m :**

Αξονική Δύναμη στο πεσσό : -147,44KN

Μείωση : 26,28%

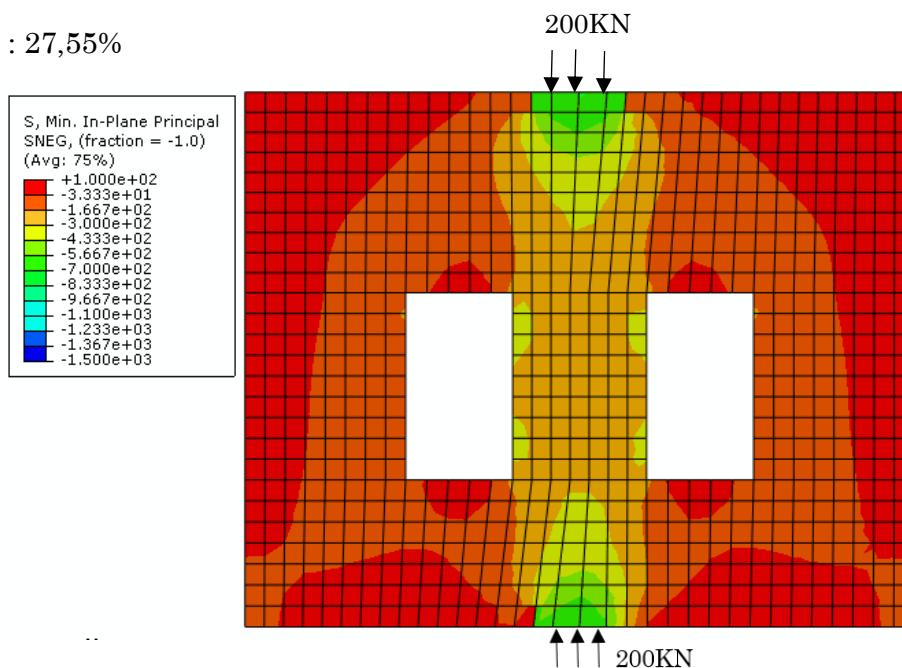


Εικόνα 4.13 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέκτασης στην τοιχοποιία

ο **Ανώφλι 1,50m :**

Αξονική Δύναμη στο πεσσό : -144,9KN

Μείωση : 27,55%

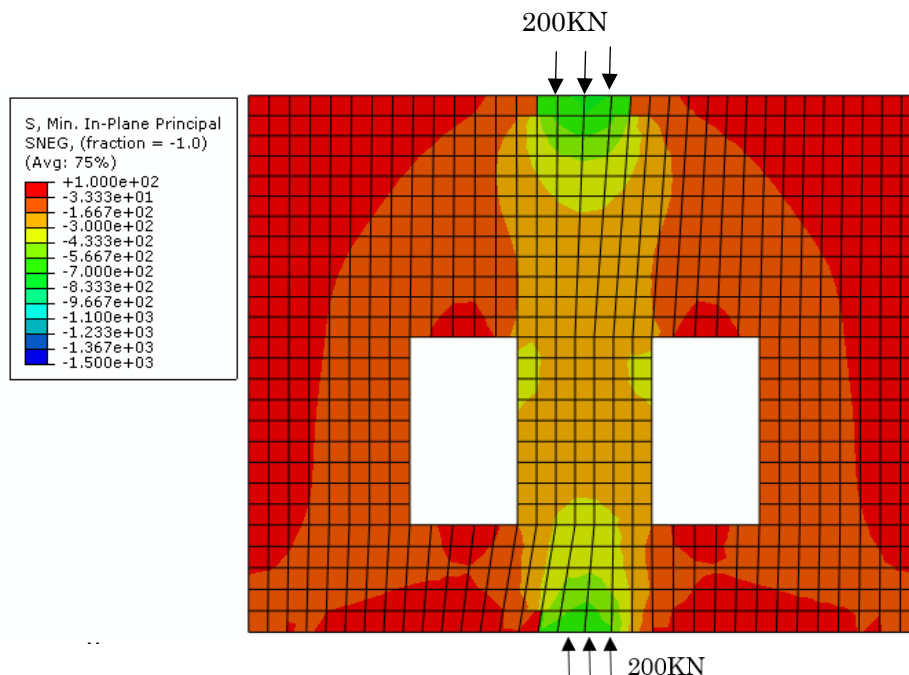


Εικόνα 4.14 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέκτασης στην τοιχοποιία

ο **Ανώφλι 1,80m :**

Αξονική Δύναμη στο πεσσό : -145,26KN

Μείωση : 27,37%



Εικόνα 4.15 Γράφημα κατανομής μέγιστων θλιπτικών τάσεων λόγω προέντασης στην τοιχοποιία

4.4 Συμπεράσματα και σύγκριση αποτελεσμάτων

Στην πρώτη περίπτωση του πεσσού με πλάτος 1.40m, το μήκος επιβολής του φορτίου L_{ef} βρίσκεται εντός του πλάτους του, και αυτό επιτυγχάνει την μέγιστη απορρόφηση της δύναμης που του επιβάλλεται. Ωστόσο, έγινε διερεύνηση της επιρροής του ύψους του ανωφλίου σε σχέση με την δύναμη που καταλήγει στον ίδιο πεσσό. Το αποτέλεσμα ήταν, όσο μεγαλώνει το ύψος του ανωφλίου με $\Delta h=20\text{cm}$ οι απώλειες της δύναμης προεντάσεως που διοχετεύονταν στις παράπλευρες επιφάνειες της τοιχοποιίας ήταν περίπου της τάξεως του 2.5-3% της αρχικής δύναμης. Ακόμη σε πολλά ιστορικά κτίρια, το πρέκι του παραθύρου είναι ξύλινο, που στόχο είχε την κατασκευαστική διευκόλυνση της γεφύρωσης της πάνω μεριάς του ανοίγματος. Για τον λόγω αυτό, παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις στην τοιχοποιία με ύψος ανωφλίου 1.80m, η μία με κεντρικά τοποθετημένα πρέκια, η δεύτερη με έκκεντρα και η τρίτη με ένα μεγάλο που ενώνει τα δύο παράθυρα. Και στα τρία παραδείγματα παρατηρείται ότι ανεξάρτητα το πως θα τοποθετηθούν τα ξύλινα πρέκια το ποσοστό μείωσης είναι ακριβώς το ίδιο. Επιπλέον μοντελοποιήθηκε και η περίπτωση με τοξωτά πρέκια στα παράθυρα. Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρήθηκε 2,2% αύξηση της

θλιπτικής δύναμης που καταλήγει στον πεσοό σε σχέση με τα οριζόντια πρέκια. Για τον πεσοό πλάτους 1.40m ελέγχθηκε και η περίπτωση της πλάκας αγκυρώσεως, επιβάλλοντας πάνω στην πλάκα το φορτίο της προέντασης αντί των τριών σημείων που πραγματοποιείται σε όλα τα ανωτέρα πειράματα. Η πλάκα αγκυρώσεως κατανέμει πιο ομαλά το φορτίο και αυτό φαίνεται στο γράφημα, με πολύ μικρή διαφορά της δύναμης που καταλήγει στον πεσοό με εκείνης των τριών σημείων.

Στην δεύτερη περίπτωση μελέτης του πεσοού πλάτους 1m, γίνεται αντιληπτό και στα γραφήματα αλλά και στον υπολογισμό του μήκους επιβολής του φορτίου, ότι η τιμή του είναι μεγαλύτερη από το πλάτος του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια δύναμης προέντασης στις παράπλευρες επιφάνειες γύρω από τον πεσοό. Στην περίπτωση με πλάτος πεσοού 1.40m και ύψος ανωφλίου 0.80m η αξονική δύναμη στον πεσοό ήταν 179.84KN ενώ στην δεύτερη περίπτωση με πλάτος πεσοού 1.00m είναι 163.44KN, δηλαδή μειώθηκε 9.12% η αξονική δύναμη λόγω της στένωσης του πεσοού κατά 40cm. Όσον αφορά με την επιρροή του ύψους του ανωφλίου, όσο μεγαλώνει κατά $\Delta h=20\text{cm}$ οι απώλειες της δύναμης προέντασης στις παράπλευρες επιφάνειες της τοιχοποιίας είναι περίπου της τάξεως του 1~4% της αρχικής δύναμης.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται μία προσεγγιστική συνάρτηση για τον υπολογισμό της αξονικής δύναμης που φτάνει στον πεσοό. Σαν μεταβλητές έχουν οριστεί το πλάτος του πεσοού και το ύψος του ανωφλίου, ενώ ο περιορισμός της είναι ότι επιβάλλονται 200KN στην πάνω και κάτω μεριά της τοιχοποιίας.

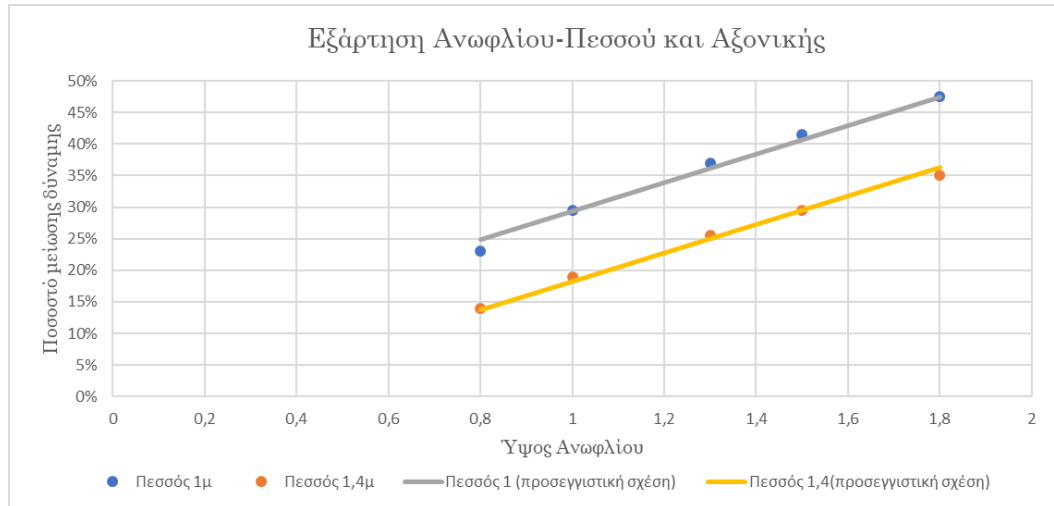
λ_3	λ_2	λ_1	b
-17,3969	47,0815	0	126,431
$y=\lambda_1 \cdot x_1 + \lambda_2 \cdot x_2 + \lambda_3 \cdot x_3 + b$			

Εικόνα 4.16 Συνάρτηση για τον υπολογισμό της αξονικής που καταλήγει στον πεσοό αν έχουμε επιβάλει 200KN.

Κατανεμημένη δύναμη σε τρία σημεία

<u>Δύναμη προεντάσεως (KN) (X1)</u>	<u>Πλάτος Πεσοού (m) (X2)</u>	<u>Ύψος Ανωφλίου (m) (X3)</u>	<u>Αξονική στον πεσοό (KN) (Y)</u>
200	1	0,8	163,44
200	1	1	155,184
200	1	1,3	147,44
200	1	1,5	144,9
200	1	1,8	145,26
200	1,4	0,8	179,839
200	1,4	1	174,1
200	1,4	1,3	167,73
200	1,4	1,5	165,09
200	1,4	1,8	163,628

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα από τα παραπάνω παραδείγματα



Εικόνα 4.17 Διάγραμμα που παρουσιάζει τα πραγματικά αποτελέσματα των παραδειγμάτων με αυτά της προσεγγιστικής σχέσης

5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΑΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

Το παρακάτω μοντέλο που θα παρουσιαστεί, είναι με κλίμακα μήκους $S_L = \frac{1}{2}$, και έχουν χρησιμοποιηθεί τα ίδια υλικά με την πραγματική κατασκευή. Επίσης η κλίμακα επιτάχυνσης και τάσης, είναι αντίστοιχα $S_a = 1$ και $S_\sigma = 1$, καθώς και τα δύο συστήματα υπόκεινται σε επιτάχυνση βαρύτητας με ίδια ίδιες ιδιότητες των υλικών στο μοντέλο και στην πραγματικότητα. Με βάση την θεωρία της μοντελοποίησης, η πλήρης δυναμική ομοιότητα οδηγεί στις ακόλουθες κλίμακες: κλίμακα δύναμης $S_F = 1/4$, κλίμακα ταχύτητας και χρόνου $S_v = S_t = 1/\sqrt{2}$, κλίμακα συχνότητας $S_f = \sqrt{2}$ και κλίμακα πυκνότητας $S_\rho = 2$. Εφόσον χρησιμοποιηθούν ίδια υλικά στο μοντέλο με αυτά της πραγματικής κατασκευής, και με επιπρόσθετες μάζες που θα τοποθετηθούν στο μοντέλο θα επιτευχθεί αυτή η επιθυμητή αναλογία.

Παράδειγμα :

Το παρακάτω παράδειγμα στόχο έχει την απόδειξη των ανωτέρω κλιμάκων.

Πεσσός Μοντέλου: $t=0.20\text{m}$, $l_w= 0.63\text{m}$, $h= 0.79\text{m}$

Πεσσός Πραγματικός: $t=0.40\text{m}$, $l_w= 1.26\text{m}$, $h= 1.58\text{m}$

$$S_{Lt} = \frac{0.20}{0.40} = 0.50, S_{Ll} = \frac{0.63}{1.26} = 0.50, S_{Lh} = \frac{0.79}{1.58} = 0.50 \quad (\text{Ικανοποιείται})$$

Συγκεντρωμένη δύναμη (προένταση):

Δύναμη Μοντέλου:

a1 (m)	0,32				
tb (m)	0,20				
b (m)	0,40				
Lef	0,856	>	0,848		
Ab (m2)	0,080	<=	0,077	Ab final	0,077
Aef(m2)	0,17				
X	0,80				
Y	1,5				
βmin	<=	β	<=	βmax	
1,00	<=	1,13	<=	1,45	
Nrd' (KN)		60%*Nrd'			
120,02		72,01			

Δύναμη Πραγματικού:

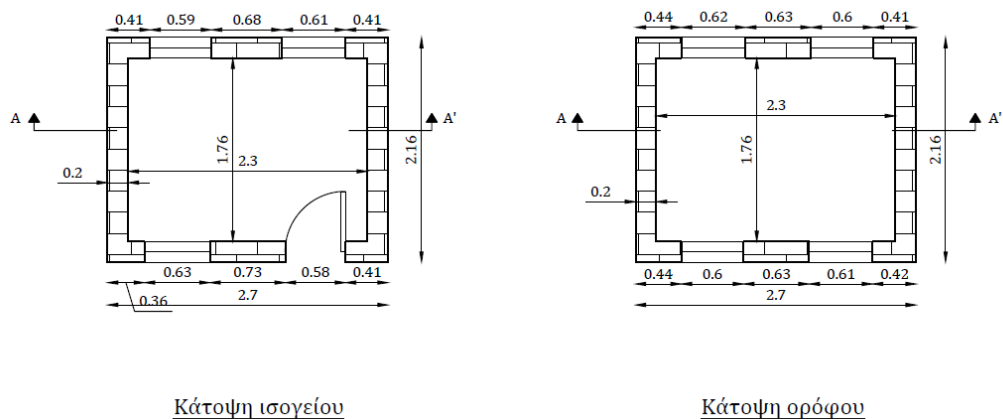
a1 (m)	0,63				
tb (m)	0,40				
b (m)	0,80				
Lef	1,712	>	1,695		
Ab (m2)	0,320	<=	0,308	Ab final	0,308
Aef(m2)	0,68				
X	0,80				
Y	1,5				
βmin	<=	β	<=	βmax	
1,00	<=	1,13	<=	1,45	
Nrd' (KN)		60%*Nrd'			
480,09		288,06			

$$S_{Nrd} = \frac{72.01}{288.06} = 0.25 = \frac{1}{4} \quad (\text{Ικανοποιείται})$$

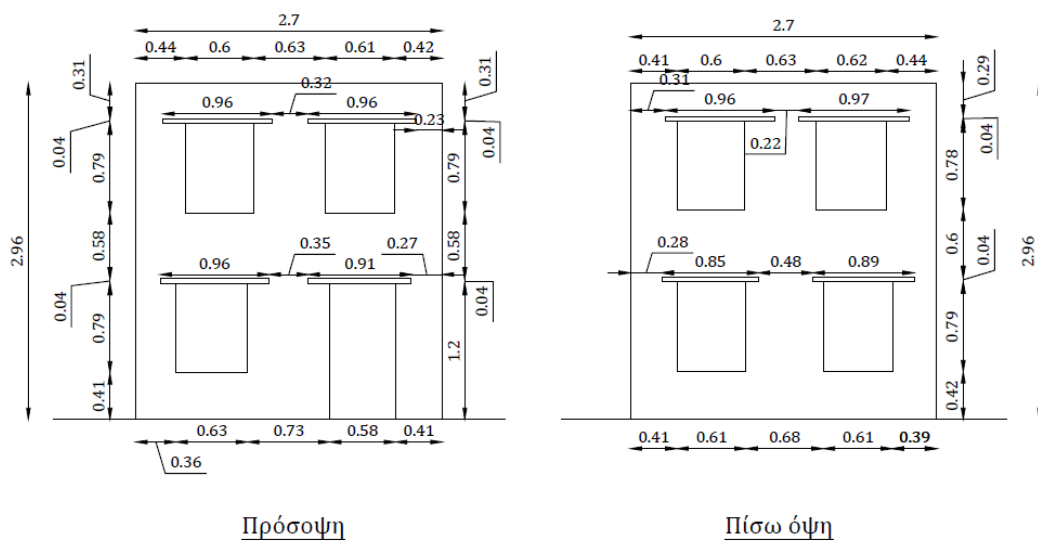
6. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ

6.1 Ο φορέας

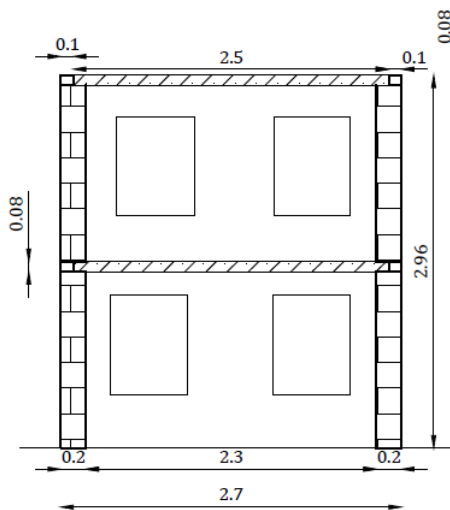
Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθεί με ελαστική ανάλυση, η σεισμική συμπεριφορά ενός κτιρίου από τοιχοποιία που βρίσκεται σε κλίμακα, πριν και μετά την ενίσχυση του με την μέθοδο της προεντάσεως. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχέδια (κατόψεις, όψεις, τομές) τα οποία προέκυψαν μετά την αποτύπωση του υφιστάμενου κτιρίου, αφού προϋπήρχε στο εργαστήριο αντισεισμικής τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.





Εικόνα 6.1 Σχέδια κατόψεων



Εικόνα 6.2 Σχέδια όψεων



Τομή Α-Α'

Υπόμνημα	
<u>Τοιχοποιία</u>	<u>Σκυρόδεμα</u>
	

Εικόνα 6.3 Σχέδιο τομής

Τα χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας όπως αυτά ορίστηκαν στο πρόγραμμα είναι τα εξής:

○ **Τοιχοποιία:**

Πυκνότητα = 1.74 Mgr/m^3

Μέτρο ελαστικότητας = 0.6 GPa

Λόγος Poisson = 0.25

○ **Εύλο:**

Πυκνότητα = 0.6 Mgr/m^3

Μέτρο ελαστικότητας = 8.6 GPa

Λόγος Poisson = 0.2

○ **Πλάκες:**

(μεσώροφου)

Πυκνότητα = 16.43 Mgr/m^3

Μέτρο ελαστικότητας = 30 GPa

Λόγος Poisson = 0.3

(ορόφου)

Πυκνότητα = 10.38 Mgr/m^3

Μέτρο ελαστικότητας = 30 GPa

Λόγος Poisson = 0.3

Στην πλάκα στου μεσώροφου και του ορόφου έχει αυξηθεί η μάζα τους, δηλαδή από 2.5 Mgr/m^3 που θα έπρεπε να είχαν λόγω πυκνότητας του σκυροδέματος, έχουν 16.43 και $10,38 \text{ Mgr/m}^3$ αντίστοιχα. Η αύξηση αυτή οφείλεται στη θεωρία της μοντελοποίησης-κλίμακας. Για να γίνει η αναγωγή το αποτελεσμάτων στην πραγματική κλίμακα ενός τέτοιου κτιρίου με $S_L=0.5$, η κλίμακα πυκνότητας είναι $S_p=2$. Ένας ακόμη λόγος που αυξήθηκε η μάζα στις πλάκες, είναι διότι αποτελούν ένα πολύ δύσκαμπτο μέρος στην τοιχοποιία, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η πολύ

μάζα συγκεντρώνεται σε αυτές τις περιοχές. Αυτό φυσικά δεν θα μπορούσε να εφαρμοστεί αν αντί για πλάκες σκυροδέματος, υπήρχαν ξύλινα πατώματα. Σε εκείνη την περίπτωση η αύξηση αυτή της μάζας θα οδηγούταν στα ανώφλια.

Για την εύρεση των παραπάνω πυκνοτήτων έγιναν οι παρακάτω υπολογισμοί:

Μεσώροφος

$$A_{tot} = A_{\text{πρόσοψης}} + A_{\text{πίσω_όψης}} + 2A_{\text{πλάγιας_όψης}} = 2.88 + 2.9 + 2 * 3.2 = 12.18m^2$$

$$V_{tot} = 12.18 * 0.2 = 2.576m^3$$

$$A_{\text{πλάκα}} = (2.16 - 0.2) * (2.7 - 0.2) = 4.90m^2$$

$$V_{\text{πλάκα}} = 4.90 * 0.08 = 0.392m^3$$

$$m_{tot} = 2 * (2.576 * 1.74 + 0.392 * 2.5) = 10.92Mgr$$

$$\rho_{\text{μεσώροφος}} = \frac{10.92 - 2.576 * 1.74}{0.392} = 16.43 \text{ } Mgr/m^3$$

Όροφος

$$A_{tot} = A_{\text{πρόσοψης}} + A_{\text{πίσω_όψης}} + 2A_{\text{πλάγιας_όψης}} = 1.45 + 1.42 + 2 * 1.6 = 6.07m^2$$

$$V_{tot} = 6.07 * 0.2 = 1.214m^3$$

$$A_{\text{πλάκα}} = (2.16 - 0.2) * (2.7 - 0.2) = 4.90m^2$$

$$V_{\text{πλάκα}} = 4.90 * 0.08 = 0.392m^3$$

$$m_{tot} = 2 * (1.214 * 1.74 + 0.392 * 2.5) = 6.18Mgr$$

$$\rho_{\text{όροφος}} = \frac{6.18 - 1.214 * 1.74}{0.392} = 10.38 \text{ } Mgr/m^3$$

Το πάχος της τοιχοποιίας είναι ομοιόμορφο και ίσο με 0.20m.

Η διακριτοποίηση του φορέα έγινε ενιαία και ίση με 0.15m.

Στον φορέα εισήχθησαν διαφράγματα-πατώματα στις στάθμες του μεσώροφου και της οροφής, καθώς ήταν από σκυρόδεμα, οπότε ήταν επαρκές να προσδώσουν διαφραγματική λειτουργία.

6.2 Εύρεση ιδιομορφών

Η συμμετοχή των ιδιομορφών στη συνολική απόκριση της κατασκευής δεν είναι εξίσου σημαντική για όλες τις κανονικές μορφές. Η συμμετοχή των ανωτέρων ιδιομορφών είναι μικρή και μπορεί να αμεληθεί. Γι' αυτό ο αντισεισμικός σχεδιασμός γίνεται λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες πρώτες μόνον ιδιομορφές. Το κριτήριο που καθορίζει το ελάχιστο πλήθος ιδιομορφών που πρέπει να ληφθούν υπόψη βασίζεται στο ποσοστό της συνολικής μάζας που ενεργοποιείται από την κίνηση της κατασκευής σε αυτές τις κανονικές

μορφές. Σύμφωνα με τον EC8, το άθροισμα των ενεργών ιδιομορφικών μαζών που λαμβάνονται υπόψη στον αντισεισμικό σχεδιασμό πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το 90% της συνολικής μάζας που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη διεύθυνση σεισμικής δράσης. Δηλαδή :

$$\sum_{i=1}^k m_i^* \geq 0.90m_{tot}$$

Στην προκειμένη περίπτωση το κτίριο αυτό έχει υποβληθεί σε τριαξονικό σεισμό 25 δευτερολέπτων. Επίσης, έχει δηλωθεί η επιθυμία των πρώτων 10 ιδιομορφών αυτής της κατασκευής.

$$m_{tot} = 18.21 \text{ Mgr}$$

$$0.9 * m_{tot} = 0.9 * 18.21 = 16.389 \text{ Mgr}$$

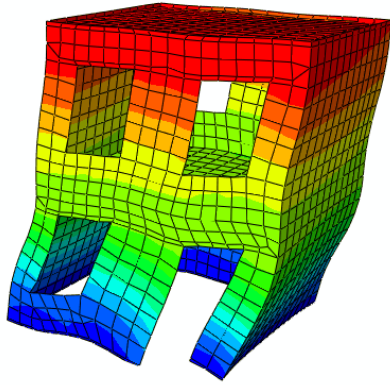
EFFECTIVE MASS

MODE NO	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT	X-ROTATION	Y-ROTATION	Z-ROTATION
1	16,078	1,05E-03	6,71E-05	9,16E-04	13,811	76,084
2	4,28E-06	6,16E-04	15,068	76,719	23,734	2,65E-03
3	1,03E-02	1,34E-03	3,02E-04	4,60E-04	20,028	0,2669
4	0,22152	12,108	1,57E-03	11,686	0,37401	11,401
5	0,87033	3,6745	2,82E-04	3,7702	1,4278	16,132
6	9,02E-04	2,43E-03	2,4356	0,87775	3,8573	5,41E-03
7	1,02E-04	7,99E-02	1,93E-06	8,48E-02	1,00E-05	0,13005
8	9,67E-03	1,03E-04	1,52E-04	1,05E-03	2,55E-02	4,6973
9	3,87E-04	5,84E-03	6,10E-03	0,70471	9,45E-03	1,36E-02
10	1,30E-05	5,32E-03	2,37E-04	2,68E-03	1,3397	1,35E-02
TOTAL	17,191	15,879	17,512	93,848	64,607	108,75

Πίνακας 6.1 Ενεργών μαζών

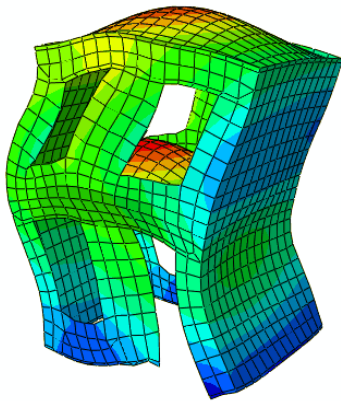
Κατά τους δύο οριζόντιους άξονες X , Z η σχέση ικανοποιείται, ωστόσο στον κατακόρυφο άξονα Y δεν ικανοποιείται, σε τέτοιες περιπτώσεις το ελάχιστο πλήθος ιδιομορφών $k = 10 \geq 3\sqrt{n} = 3\sqrt{2} = 4.24$ και $T_k = 0.057 \text{ sec} \leq 0.20 \text{ sec}$. Εφόσον ικανοποιούνται οι παραπάνω περιορισμοί τότε δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα.

Έπειτα γίνεται αντιληπτό ότι κατά την X διεύθυνση η δεσπόζουσα ιδιομορφή είναι η 1^η, με ιδιοπερίοδο T=0.171sec .



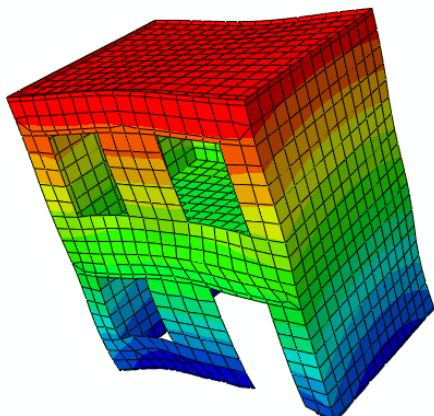
Εικόνα 6.4 Η Ιδιομορφή 1, $T=0.171 \text{ sec}$

Στην διεύθυνση Y η δεσπόζουσα ιδιομορφή είναι η 4^η, με ιδιοπερίοδο $T=0.057 \text{ sec}$.



Εικόνα 6.5 Η Ιδιομορφή 4, $T=0.057 \text{ sec}$

Στην διεύθυνση Z η δεσπόζουσα ιδιομορφή είναι η 2^η, με ιδιοπερίοδο $T=0.151 \text{ sec}$.



Εικόνα 6.6 Η Ιδιομορφή 2, $T=0.151 \text{ sec}$

Παρατηρώντας τις ιδιομορφές του φορέα είναι εμφανές ότι οι μετακινήσεις του είναι καθολικές για την κάθε μία κατεύθυνση ξεχωριστά, και αυτό

οφείλεται στην διαφραγματική λειτουργία που προσφέρουν οι πλάκες σκυροδέματος στους ορόφους.

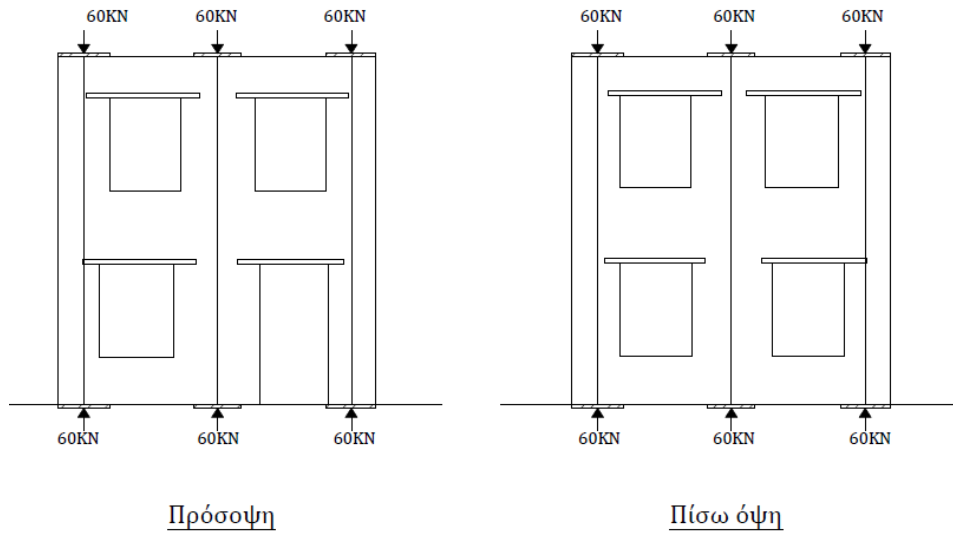
Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας με τιμές των ιδιοπεριόδων και των ιδιοσυχνοτήτων για κάθε μία ιδιομορφή.

MODE NO	ω^2	ω (rad/sec)	f (Hz)	T (sec)
1	1349	36,728	5,846	0,171
2	1730,7	41,602	6,621	0,151
3	6104,1	78,129	12,435	0,080
4	12130	110,14	17,529	0,057
5	12343	111,1	17,682	0,057
6	19392	139,26	22,163	0,045
7	23874	154,51	24,591	0,041
8	33637	183,4	29,190	0,034
9	50931	225,68	35,918	0,028
10	53440	231,17	36,792	0,027

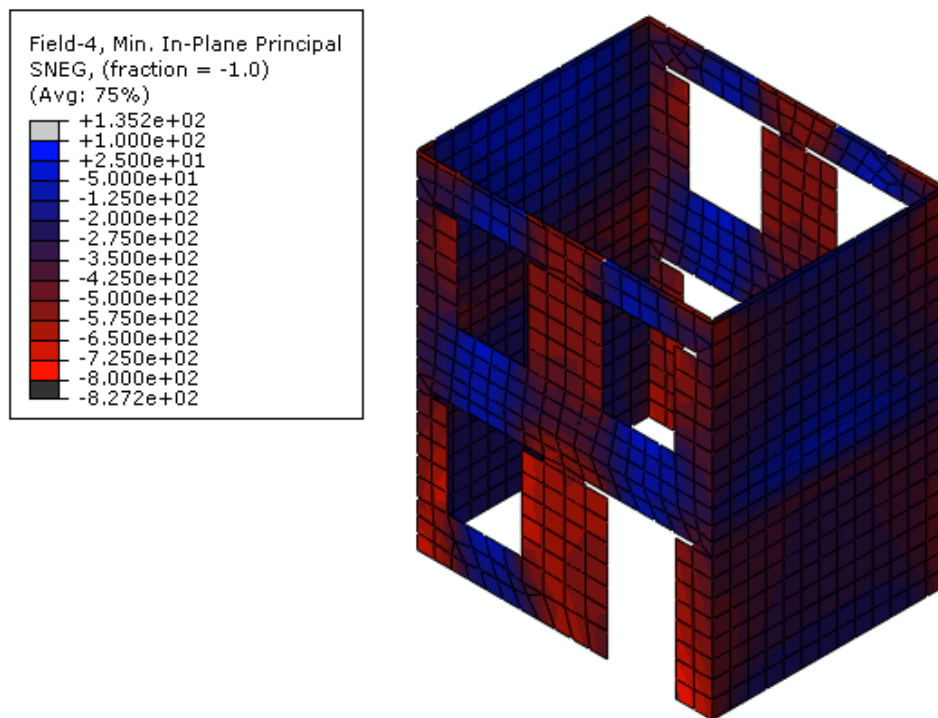
Πίνακας 6.2 Ιδιοπερίοδοι-Ιδιοσυχνότητες Ιδιομορφών

6.3 Επιβολή Προέντασης

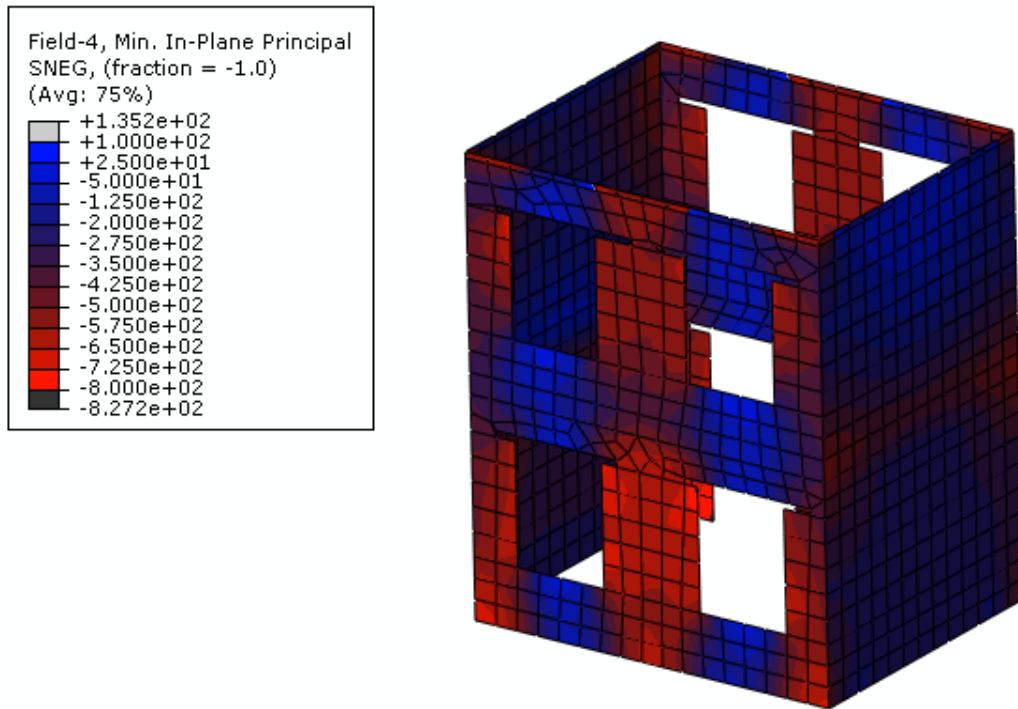
Στην συνέχεια, στην κατασκευή επιβάλλεται επιπρόσθετο θλιπτικό φορτίο με την μέθοδο της προεντάσεως, που στόχο έχει την βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς του κτιρίου. Μετά από διερεύνηση και υπολογισμό με την μέθοδο του συγκεντρωμένου φορτίου της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας, λαμβάνοντας υπόψη και την μείωση της δύναμης προέντασης μέχρι να φτάσει στον πεσσοό, καθώς η δύναμη προέντασης αγκυρώνεται στην πάνω μεριά του ανωφλίου και στην θεμελίωση. Η δύναμη προέντασης που εισάγεται σε όλους τους πεσσοούς μη λαμβανομένης της μείωσης της λόγω άμεσων και χρόνιων απωλειών είναι της τάξεως των 60KN.



Εικόνα 6.7 Κατακόρυφη προένταση στην κατασκευή

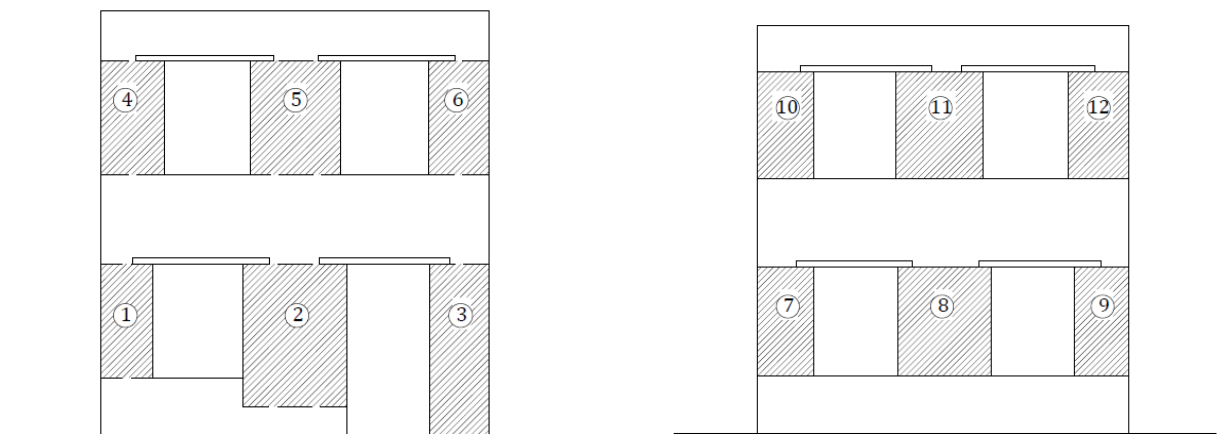


Εικόνα 6.8 Απεικόνιση τάσεων λόγω ίδιου βάρους και προέντασης (60kN)



Εικόνα 6.9 Απεικόνιση τάσεων λόγω ιδιου βάρους και προέντασης (60KN)

Η αριθμηση των πεσσών γίνεται σύμφωνα με τα παρακάτω σχέδια,



Εικόνα 6.10 Αριθμηση πεσσών

Έπειτα, στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ανά πεσσό οι άμεσες και χρόνιες απώλειες προέντασης. Οι άμεσες απώλειες οφείλονται σε δύο κύριους λόγους όπως έχει προαναφερθεί. Ο πρώτος είναι οι απώλειες λόγω τριβών που αναπτύσσονται κατά την τάνυση μεταξύ του τένοντα και του σωλήνα προέντασης. Ο δεύτερος είναι λόγω ολίσθησης του τένοντα κατά την στιγμή της αγκύρωσης (ισχύει για την περίπτωση αγκύρωση με σφήνα, αλλιώς είναι μηδέν).

Πεσσός	Po (KN)	σ_{Po} (Mpa)	σ'_{Po} (Mpa)	$\Delta\sigma_{p,c}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{p,r}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{total}$ (Mpa)	σ''_{Po} (Mpa)	Μείωση (%)	Po _{final} (KN)
1	60	385,00	383,13	67,72	3,10	70,82	312,31	19%	48,67
2	60	385,00	383,13	36,20	4,71	40,92	342,21	11%	53,33
3	60	385,00	383,13	61,46	3,42	64,88	318,25	17%	49,60
4	60	385,00	383,13	58,51	3,57	62,08	321,05	17%	50,03
5	60	385,00	383,13	39,96	4,52	44,48	338,64	12%	52,78
6	60	385,00	383,13	60,44	3,47	63,92	319,21	17%	49,75
7	60	385,00	383,13	61,46	3,42	64,88	318,25	17%	49,60
8	60	385,00	383,13	37,89	4,63	42,52	340,61	12%	53,08
9	60	385,00	383,13	63,60	3,31	66,91	316,22	18%	49,28
10	60	385,00	383,13	61,46	3,42	64,88	318,25	17%	49,60
11	60	385,00	383,13	39,96	4,52	44,48	338,64	12%	52,78
12	60	385,00	383,13	58,51	3,57	62,08	321,05	17%	50,03

Πίνακας 6.3 Απώλειες προέντασης ανά πεσσό σε άπειρο χρόνο μετά την τάνυση

Αξιζει να σημειωθεί ότι ο χάλυβας προέντασης που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς είναι SAS 500/550 και τον τανύουμε στο 70% της εφελκυστικής του αντοχής, για να γίνεται η καλύτερη εκμετάλλευση του υλικού.

Οπότε στις δύο πρώτες στήλες είναι η δύναμη προέντασης στην πρώτη και στην δεύτερη ανηγμένη σε τάση στο εμβαδόν διατομής του τένοντα. Η τρίτη στήλη είναι η απομένουσα θλιπτική τάση μετά την μείωση λόγω άμεσων απωλειών.

Στις επόμενες δύο στήλες παρουσιάζονται οι χρόνιες απώλειες σε όρους τάσεων, λόγω του ερπυστικού φαινομένου της τοιχοποιία ($\Delta\sigma_{p,c}$) και λόγω της χαλάρωσης του χάλυβα προέντασης ($\Delta\sigma_{p,r}$) μετά από 1000 ώρες από την ώρα της τάνυσης. Επίσης, σαν χρόνια απώλεια είναι και η συστολή ξήρανσης της τοιχοποιίας, ωστόσο σε ιστορικά κτίρια η επιρροή του φαινομένου της συστολής ξήρανσης του κονιάματος είναι αμελητέα, και για αυτό το λόγω δεν θα ληφθεί υπόψιν το φαινόμενο αυτό.

Το $\Delta\sigma_{tot}$ είναι το άθροισμα των απωλειών λόγω ερπυσμού και χαλάρωσης, το οποίο και αφαιρείται μετά από το σ'_{Po} , που προκύπτει το σ''_{Po} . Και τέλος βρίσκεται η ποσοστιαία μείωση λόγω των παραπάνω φαινομένων, και αυτή μεταφέρεται σε όρους δυνάμεων.

Όπως φαίνεται και στα ανωτέρω σχήματα ο τένοντας ξεκινάει από πάνω και καταλήγει μέχρι κάτω , συμπεριλαμβάνοντας με αυτόν τον τρόπο δύο πεσσούς στο πέρασμα του. Τα ζεύγη είναι τα εξής :

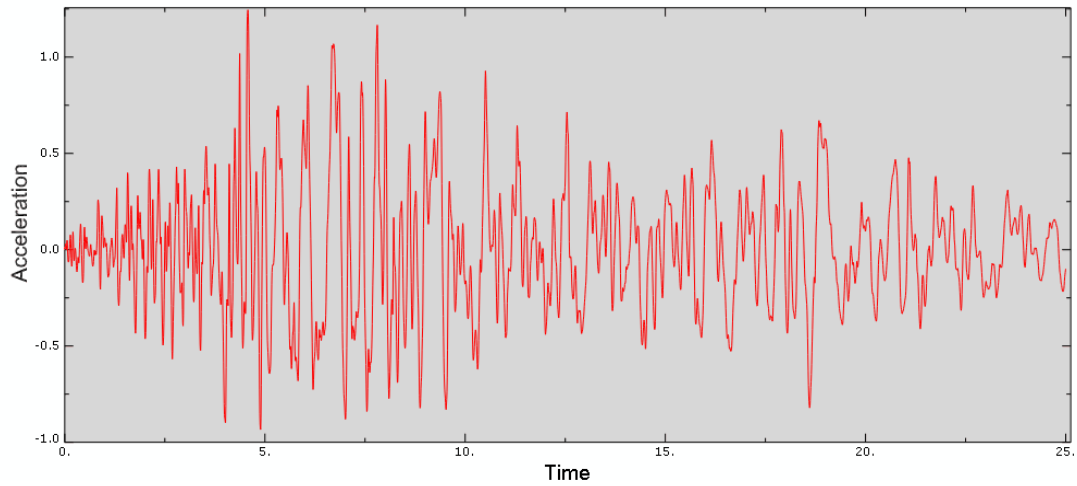
- ο Π1-Π4
- ο Π2-Π5
- ο Π3-Π6
- ο Π7-Π10
- ο Π8-Π11
- ο Π9-Π12

Αυτό σημαίνει ότι επηρεάζεται ο τένοντας από τις απώλειες της κάθε παρειάς, και επικρατεί αυτή με τις μεγαλύτερες απώλειες. Δηλαδή για την πρώτη περίπτωση του ζεύγους Π1-Π4 ο τένοντας καταλήγει να έχει τελική μείωση 19% στον Π1 και στον Π4 17%, η απώλεια που θα επικρατήσει καθ' ύψος σε όλη την προένταση είναι το 19%. Ομοίως και στους υπόλοιπους πεσσούς.

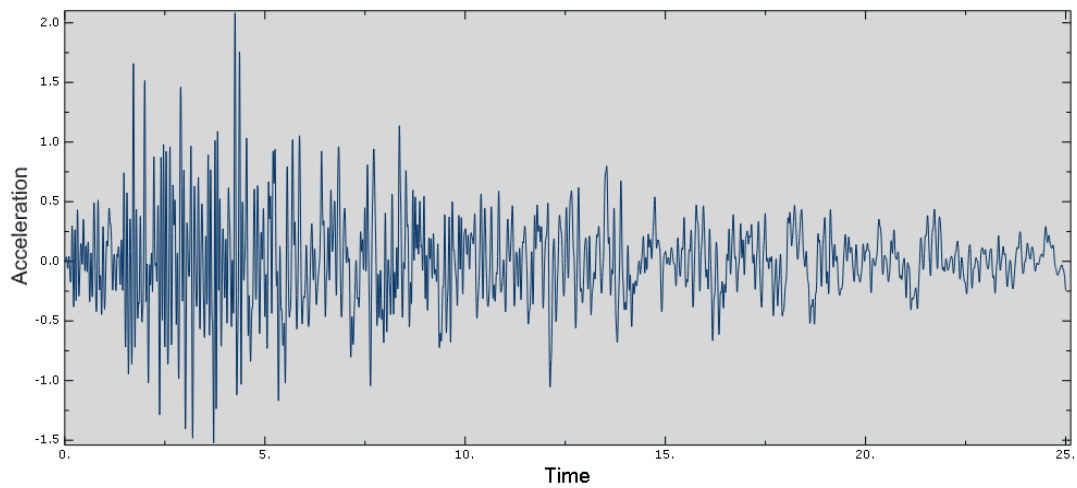
6.4 Ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Έγινε ελαστική ανάλυση στο πρόγραμμα, εφαρμόζοντας την δύναμη των 60KN καθώς εκείνη θα είναι η μεγαλύτερη μόνιμη δύναμη που θα έχει να αντιμετωπίσει η τοιχοποιία στην διάρκεια ζωής της. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί για κάθε ένα πεσό ξεχωριστά τα διαγράμματα αντοχής του σε κάμψη και τέμνουσα εντός του επιπέδου του, σε δυναμική φασματική ανάλυση με χρήση χρονοϊστορών. Οι λόγοι είναι έτσι ώστε ότι δείχνει μεγαλύτερο της μονάδας να είναι αστοχία.

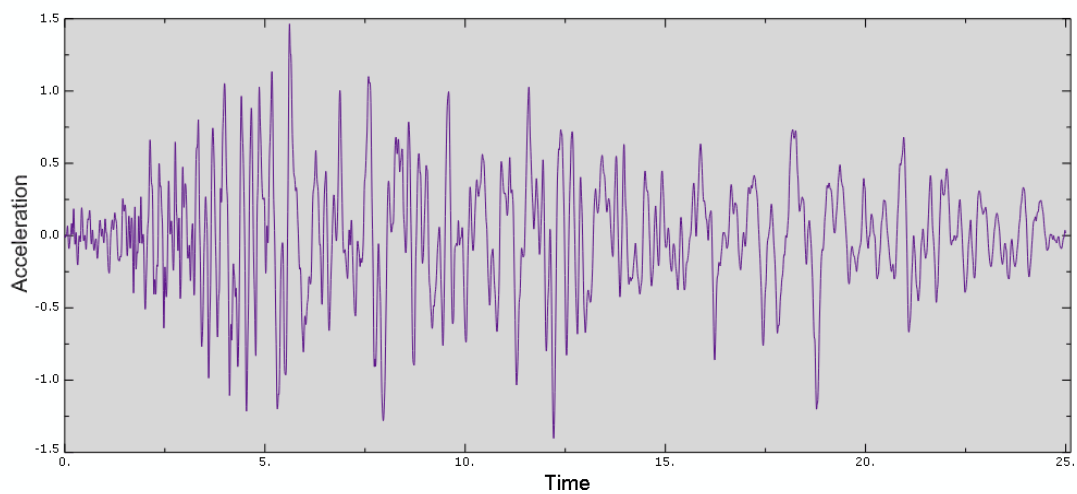
Τα διαγράμματα επιτάχυνσης-χρόνου του σεισμού κατά τους τρεις κύριους άξονες x,y,z φαίνονται στην συνέχεια. Ο σεισμός αυτός έγινε στην Ιρπίνια της Ιταλίας το 1980 και ήταν ιδιαίτερα καταστρεπτικός για ιστορικά κτίρια κατασκευασμένα από τοιχοποιία.



Εικόνα 6.11 Σεισμός κατά x (οριζόντιος άξονας)



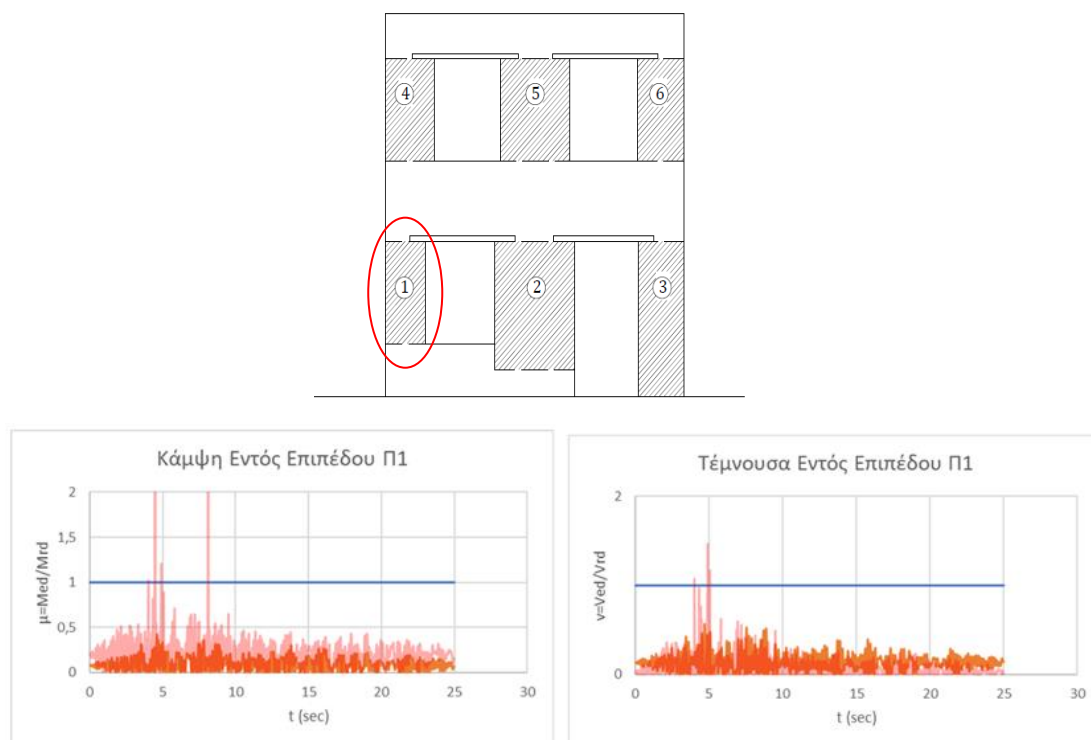
Εικόνα 6.12 Σεισμός κατά y (κατακόρυφος άξονας)



Εικόνα 6.13 Σεισμός κατά z (οριζόντιος άξονας)

Πεσός 1^{ος}

Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)

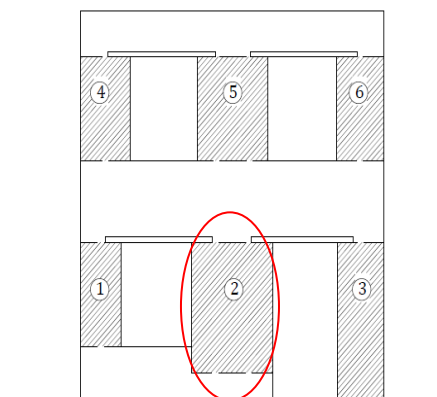


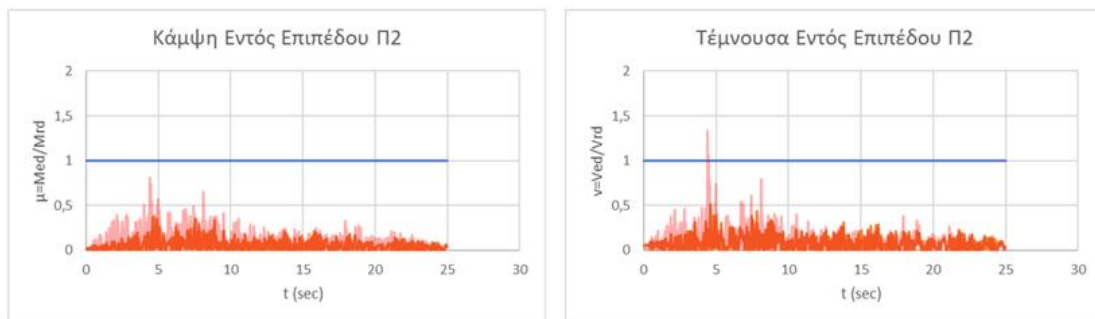
Εικόνα 6.14 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 1)

Στα παραπάνω διαγράμματα το πιο ανοιχτό χρώμα υποδηλώνει την αντοχή του πεσού πριν την ενίσχυση και το πιο σκούρο την αντοχή του μετά την ενίσχυση. Φαίνεται αρκετά έντονα η συνεισφορά της προέντασης, καθώς εκμηδενίζεται η πιθανότητα αστοχίας μετά από αυτή.

Πεσός 2^{ος}

Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)

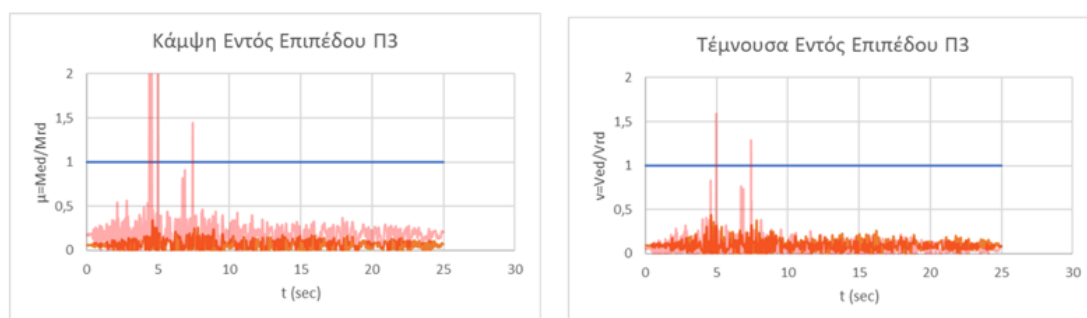
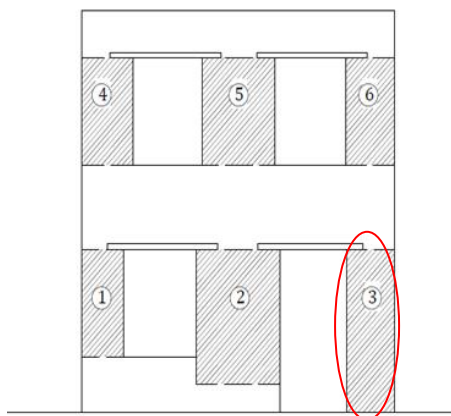




Εικόνα 6.15 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 2)

Πεσός 3^{ος}

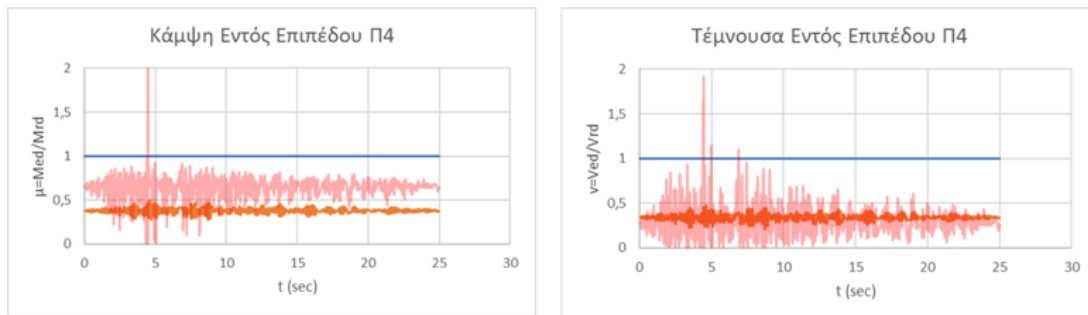
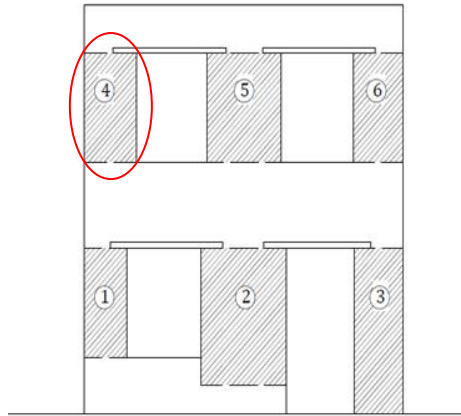
Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)



Εικόνα 6.16 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 3)

Πεσός 4^{ος}

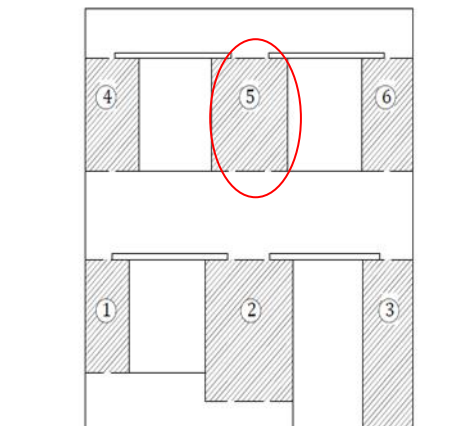
Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)

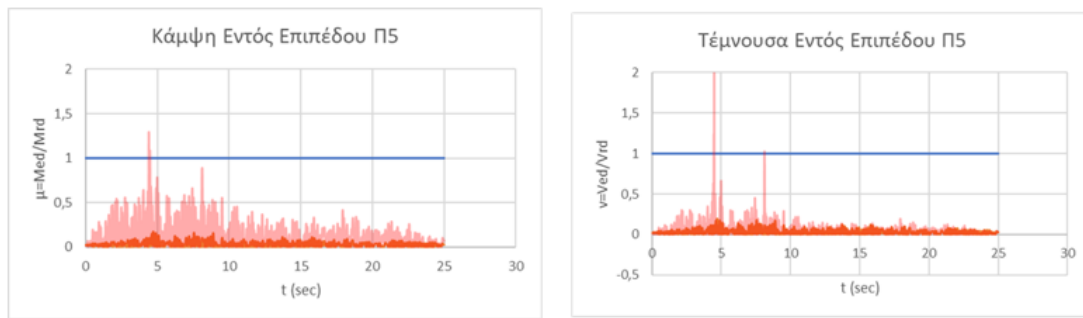


Εικόνα 6.17 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 4)

Πεσός 5^{ος}

Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)

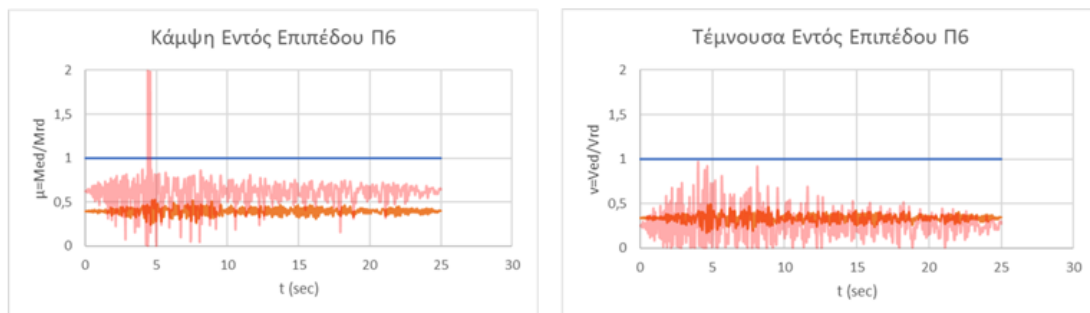
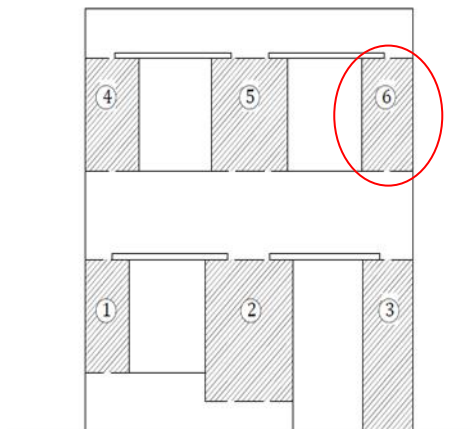




Εικόνα 6.18 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 5)

Πεσός 6ος

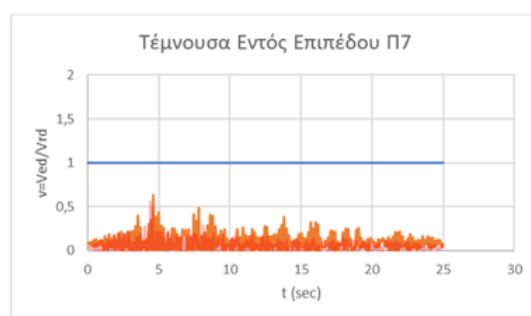
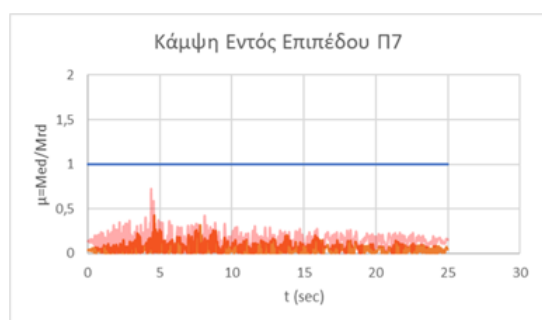
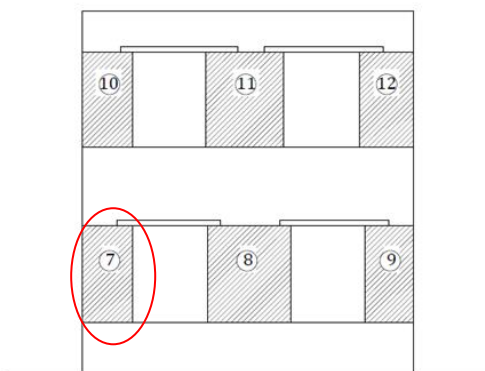
Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)



Εικόνα 6.19 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 6)

Πεσός 7ος

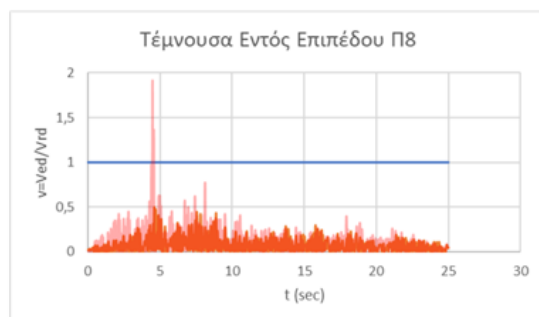
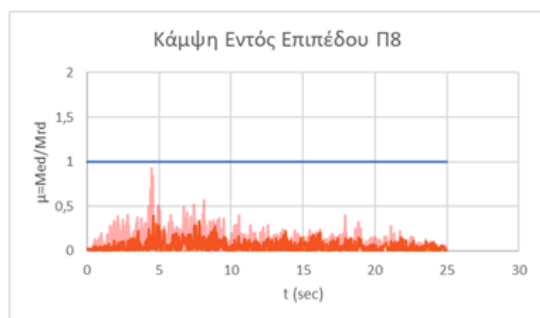
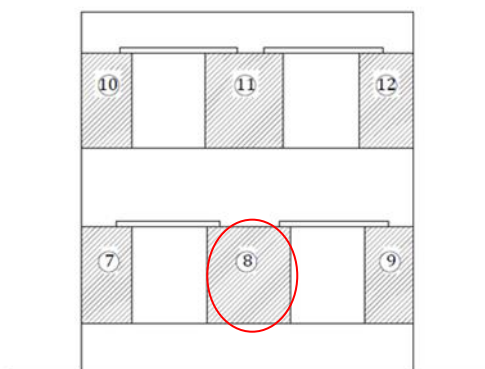
Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)



Εικόνα 6.20 Διαγράμματα ασοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 7)

Πεσός 8ος

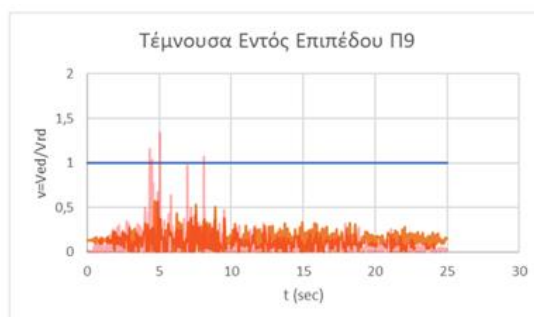
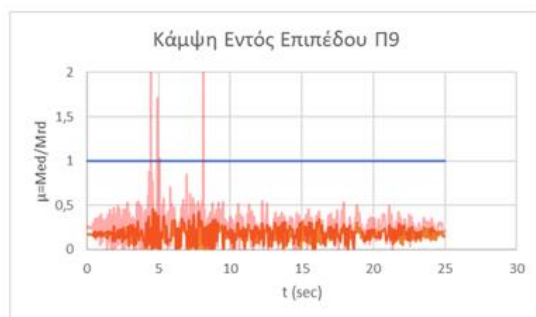
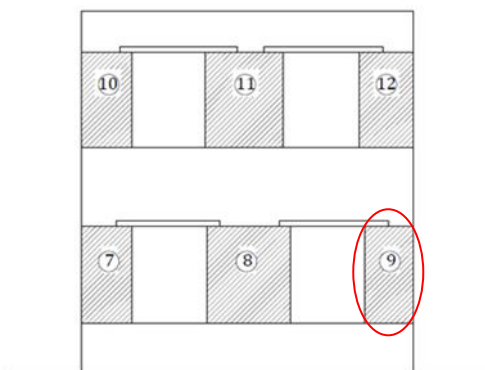
Ασοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)



Εικόνα 6.21 Διαγράμματα ασοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 8)

Πεσός 9^{ος}

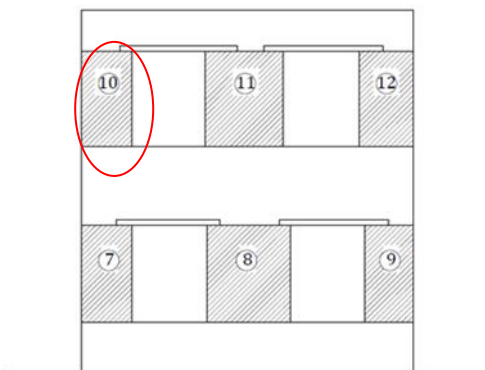
Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)

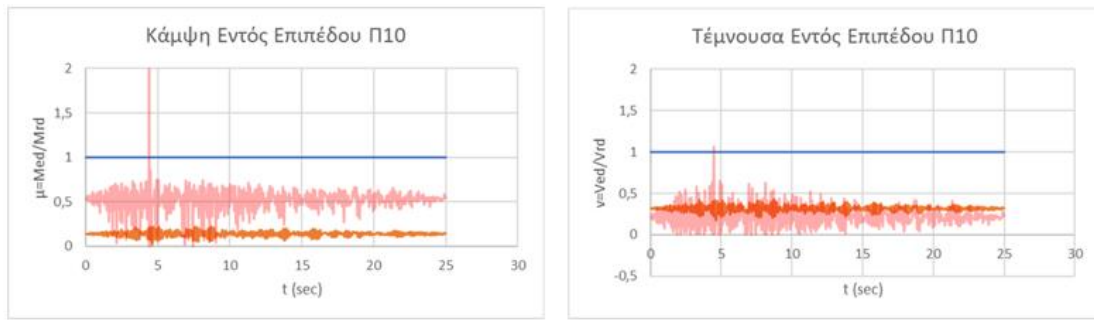


Εικόνα 6.22 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 9)

Πεσός 10^{ος}

Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)

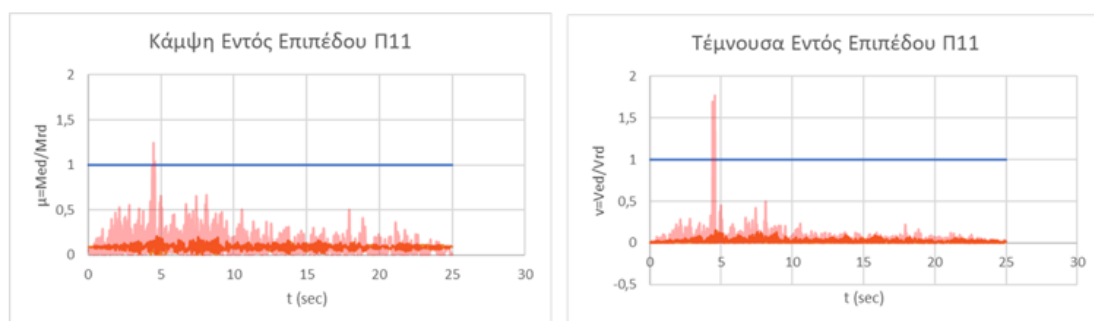
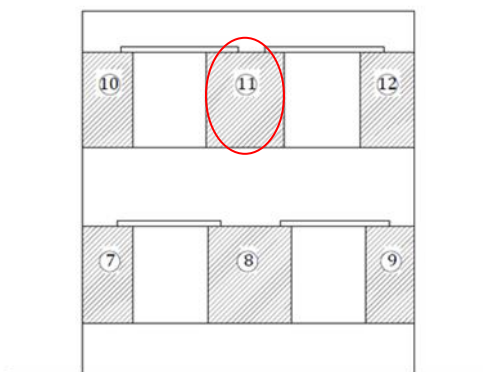




Εικόνα 6.23 Διαγράμματα ασοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 10)

Πεσός 11^{ος}

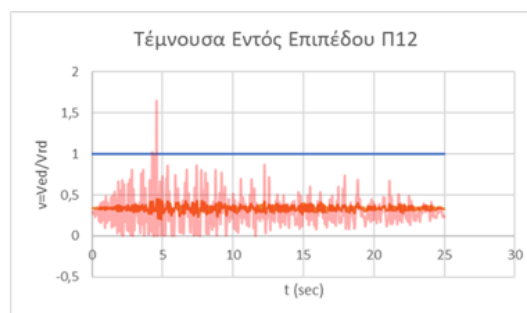
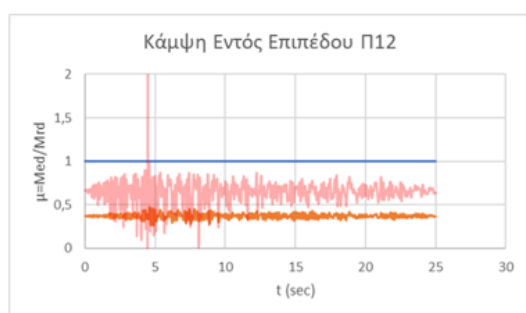
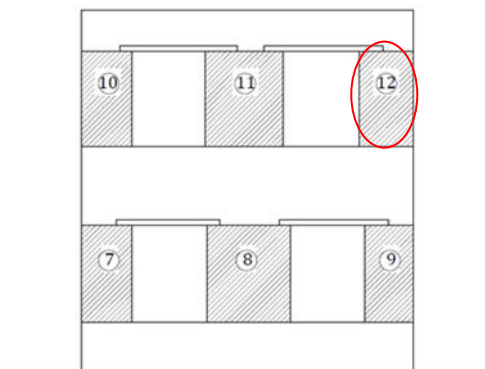
Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)



Εικόνα 6.24 Διαγράμματα ασοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 11)

Πεσός 12^{ος}

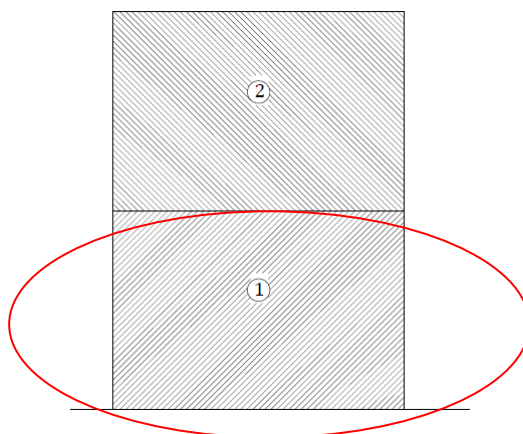
Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)

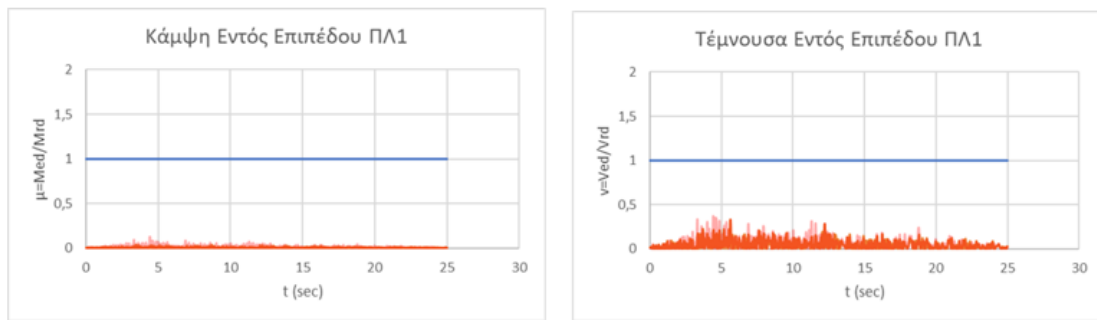


Εικόνα 6.25 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός 12)

Πεσός Πλ1^{ος}

Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)

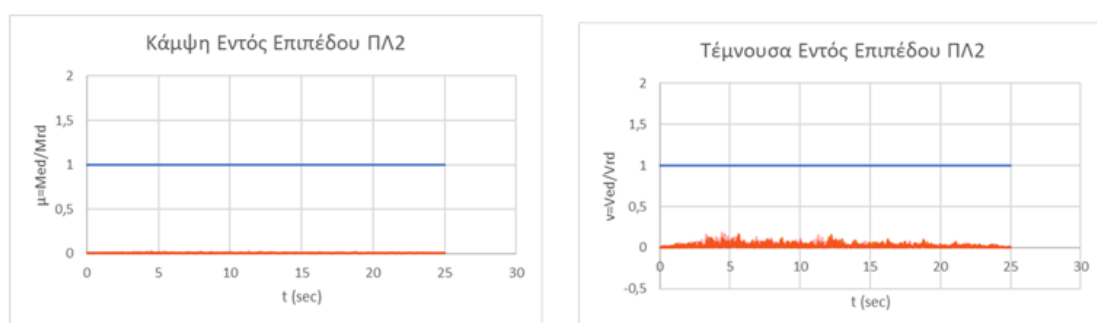
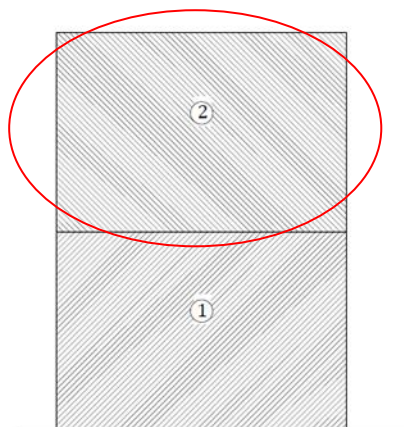




Εικόνα 6.26 Διαγράμματα ασοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός ΠΛ1)

Πεσός ΠΛ2^{ος}

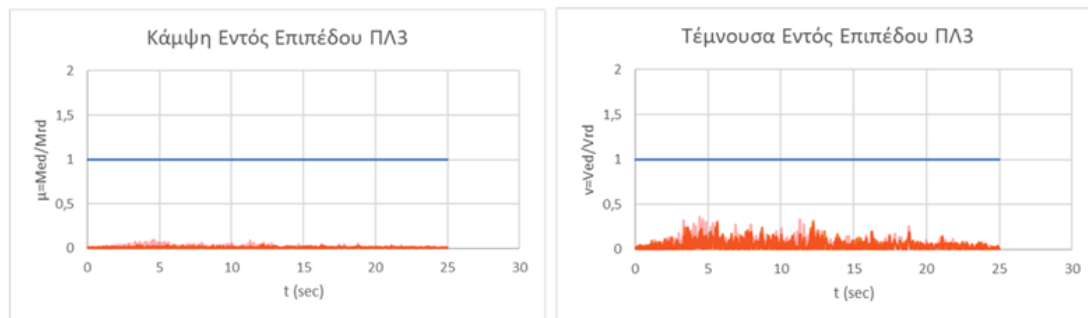
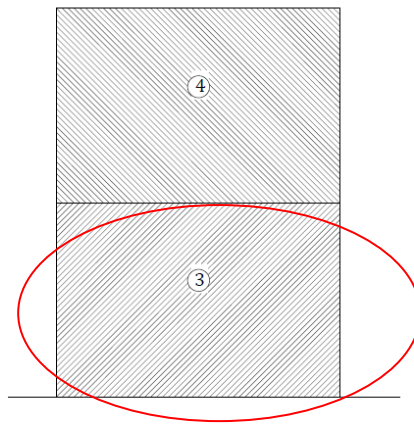
Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)



Εικόνα 6.27 Διαγράμματα ασοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός ΠΛ2)

Πεσός Πλ3^{ος}

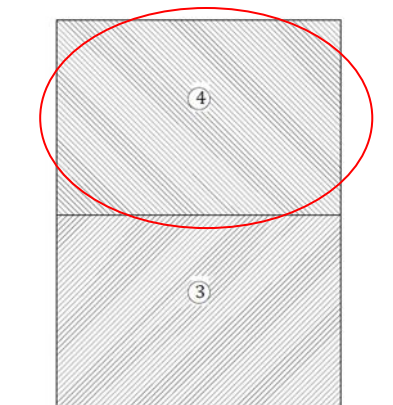
Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)

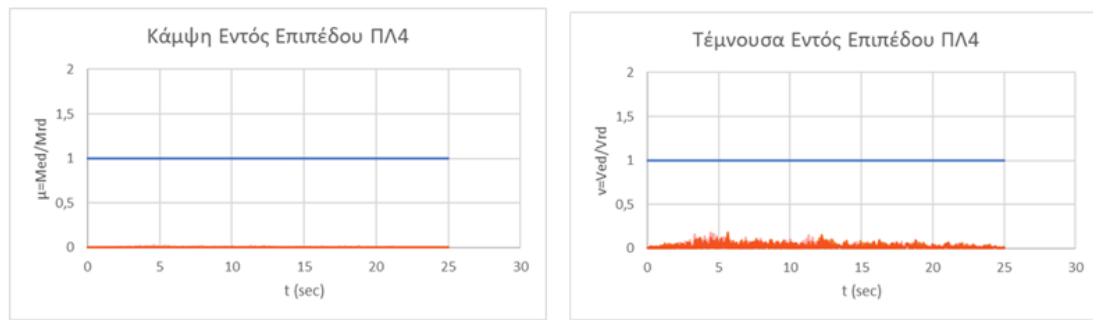


Εικόνα 6.28 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός Πλ3)

Πεσός Πλ4^{ος}

Αστοχία : Καμία (μετά την ενίσχυση)





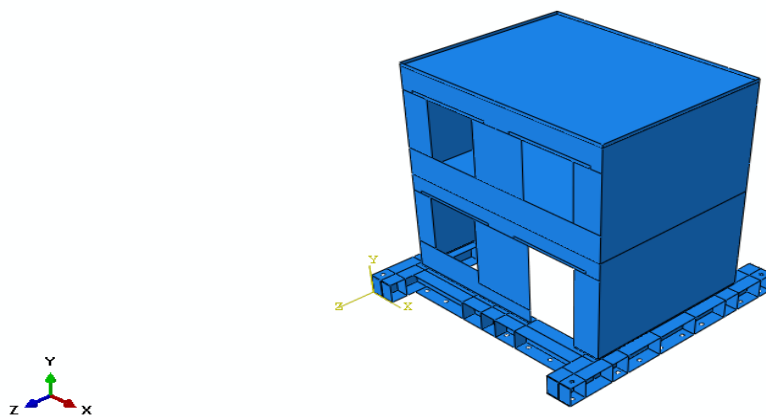
Εικόνα 6.29 Διαγράμματα αστοχιών εντός επιπέδου κάμψης και τέμνουσας (Πεσός ΠΛ4)

Σε όλους τους πεσούς είναι εμφανή η συνεισφορά της προέντασης, σε βαθμό τέτοιο ώστε να εξαλείφει τελείως την περίπτωση αστοχίας κατά την διάρκεια ολόκληρου του σεισμικού φαινομένου.

Οι πεσοί ΠΛ1, ΠΛ2, ΠΛ3 και ΠΛ4 είναι στις πλάγιες όψεις της κατασκευής, και σε αυτούς δεν έχουν τοποθετηθεί τένοντες προέντασης. Παρόλα αυτά παρατηρώντας τα διαγράμματα αντοχής ροπής και τέμνουσας βοηθάει και εκείνους η προένταση που εφαρμόζεται στις δύο κύριες όψεις του κτιρίου. Αυτό φυσικά προϋποθέτει και την σωστή κατασκευαστική σύνδεση των εγκάρσιων τοίχων στα σημεία τομής τους, καθώς αν δεν υπάρχει σωστό «κλείδωμα» των τοίχων αυτών θα οδηγήσει σε ρηγμάτωση και ασυνέχεια. Επιπλέον βελτιώνει την εκτός επιπέδου συμπεριφορά των πεσών αυτών, καθώς πριν την ενίσχυση της κατασκευής, υπήρχαν εκτός επιπέδου αστοχίες για τους δύο πάνω πεσούς.

Έπειτα παρουσιάζονται οι πίνακες με την πρώτη αστοχία που εμφανίζεται, καθώς και το διάγραμμα μέγιστων κύριων τάσεων στην πιο χαρακτηριστική χρονική στιγμή της κατασκευής. Η πρώτη περίπτωση έχει τις αστοχίες των πεσών χωρίς προένταση και με πακτωμένο το έδαφος, και οι άλλες δύο περιπτώσεις με προένταση και ελατήρια στο έδαφος.

Περίπτωση 1^η: Πακτωμένη βάση

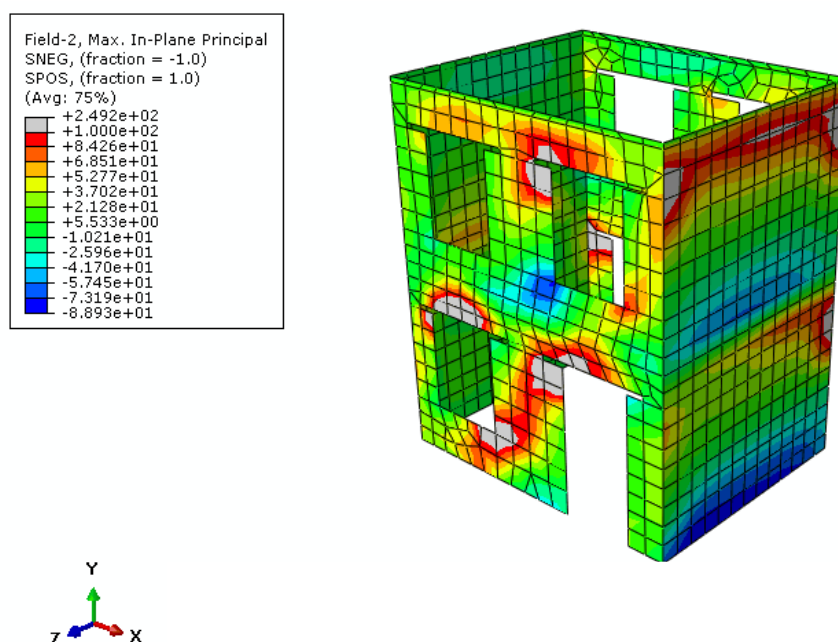


Εικόνα 6.30 Μοντέλο με πακτωμένη βάση (Ίδιο βάρος & Σεισιμός)

Στην περίπτωση αυτή, δεν έχουν τοποθετηθεί ακόμη οι τένοντες προέντασης στους πεσσούς των δύο κύριων. Έπειτα παρουσιάζεται ο πίνακας με τις πρώτες αστοχίες που θα αντιμετωπίσει ο κάθε ένας πεσός, σύμφωνα με το σεισμό που είχε γίνει στην Ιρπίνια της Ιταλίας το 1980.

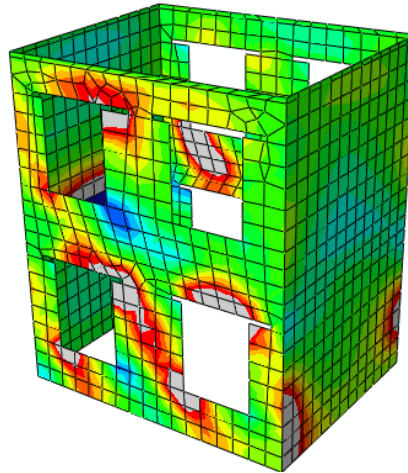
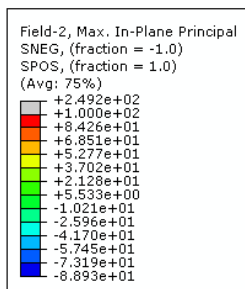
Πεσός	Αστοχία	Συντελεστής Ροπής	Συντελεστής Τέμνουσας	Χρόνος (sec)
1	Κάμψη κ' Τέμνουσα	0,052	(υπέρβαση εκκεντρότητας)	4,483
2	Τέμνουσα	1,37	0,956	4,476
3	Κάμψη κ' Τέμνουσα	0,513	(υπέρβαση εκκεντρότητας)	4,561
4	Τέμνουσα	1,01	0,616	4,412
5	Κάμψη κ' Τέμνουσα	0,76	(υπέρβαση εκκεντρότητας)	4,405
6	Εφελκυσμός	-	-	4,405
7	-	-	-	-
8	Τέμνουσα	1,19	0,654	4,476
9	Εφελκυσμός	-	-	4,476
10	Εφελκυσμός	-	-	4,405
11	Τέμνουσα	1,02	0,59	4,405
12	Κάμψη κ' Τέμνουσα	0,172	(υπέρβαση εκκεντρότητας)	4,483
πλ1	-	-	-	-
πλ2	(εκτός επιπέδου αστ.)	-	-	4,426
πλ3	-	-	-	-
πλ4	(εκτός επιπέδου αστ.)	-	-	4,426

Πίνακας 6.4 Αστοχία πεσών χωρίς προένταση



Εικόνα 6.31 Απεικόνιση μέγιστων κύριων τάσεων την χρονική στιγμή $t=4.476$ sec (χωρίς προένταση)

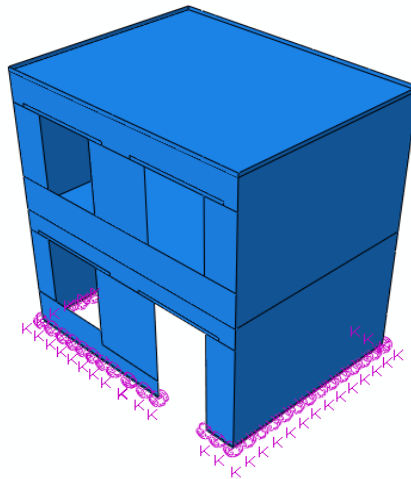
Αν θεωρηθεί ότι η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας είναι 100KPa, τότε όποιο σημείο της τοιχοποιίας ξεπερνάει την τάση αυτή, εμφανίζεται με γκρι χρώμα.



Εικόνα 6.32 Απεικόνιση μέγιστων κύριων τάσεων την χρονική στιγμή $t=4.476 \text{ sec}$ (χωρίς προένταση)

Περίπτωση 2^η : Βάση με ελατήρια και $P=60\text{KN}$

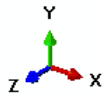
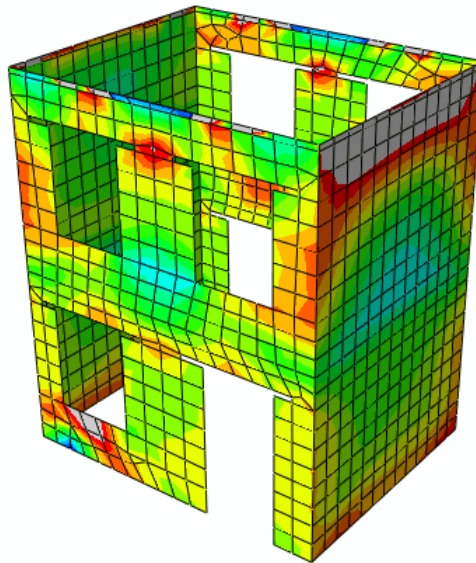
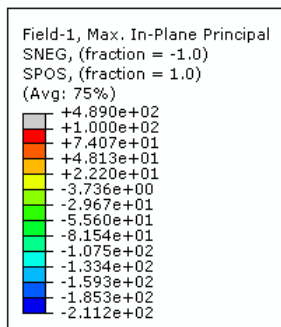
($K_x=K_z=8000\text{KN/m}$, $K_y=12000\text{KN/m}$)



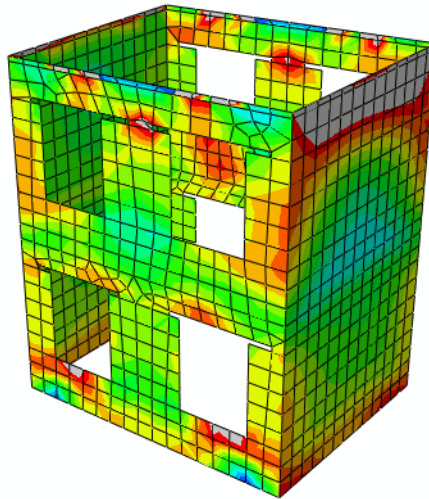
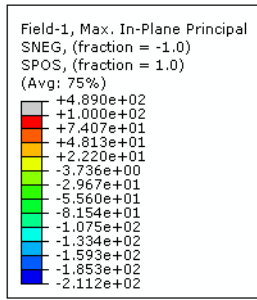
Εικόνα 6.33 Μοντέλο με ελατήρια στο έδαφος (Ίδιος βάρος, Προένταση κ' Σεισμός)

Πεσός	Αστοχία	Συντελεστής Ροπής	Συντελεστής Τέμνουσας	Χρόνος (sec)
1	Καμία	-	-	-
2	Καμία	-	-	-
3	Καμία	-	-	-
4	Καμία	-	-	-
5	Καμία	-	-	-
6	Καμία	-	-	-
7	Καμία	-	-	-
8	Καμία	-	-	-
9	Καμία	-	-	-
10	Καμία	-	-	-
11	Καμία	-	-	-
12	Καμία	-	-	-
πλ1	Καμία	-	-	-
πλ2	Καμία	-	-	-
πλ3	Καμία	-	-	-
πλ4	Καμία	-	-	-

Πίνακας 6.5 Αστοχία πεσών με προένταση (60KN) σε χρόνο $t=0$.



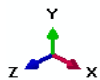
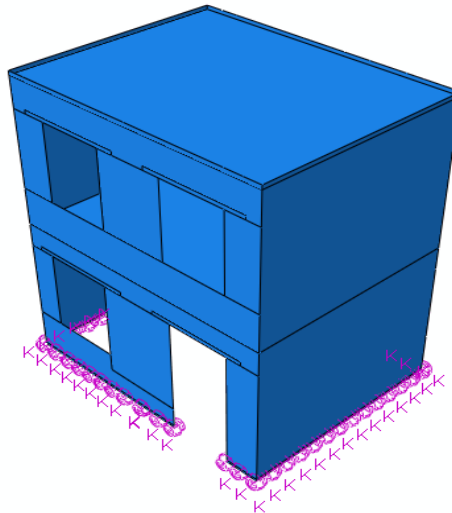
Εικόνα 6.34 Απεικόνιση μέγιστων κύριων τάσεων την χρονική στιγμή $t=4.476 \text{ sec}$ (με προένταση 60KN)



Εικόνα 6.35 Απεικόνιση μέγιστων κύριων τάσεων την χρονική στιγμή $t=4.476 \text{ sec}$ (με προένταση 60KN)¹⁵

Περίπτωση 3^η : Βάση με ελατήρια και $P=48.6\text{KN}$

($K_x=K_z=8000\text{KN/m}$, $K_y=12000\text{KN/m}$)

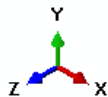
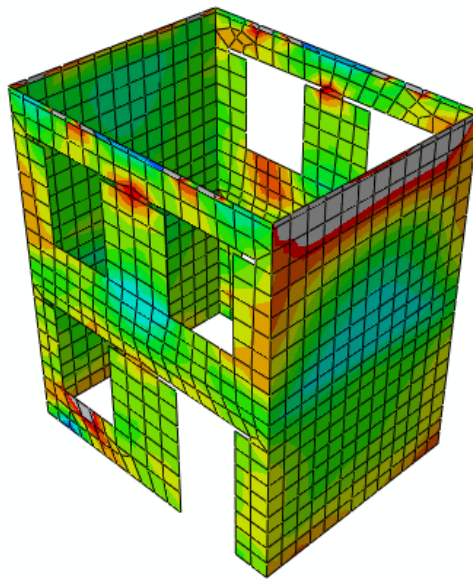
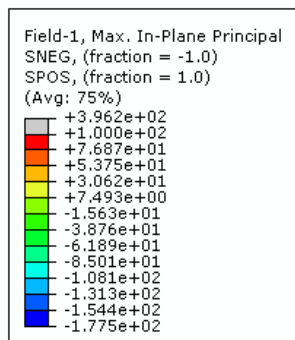


Εικόνα 6.36 Μοντέλο με ελατήρια στο έδαφος (Ίδιος βάρος , Προένταση κ' Σεισμός)

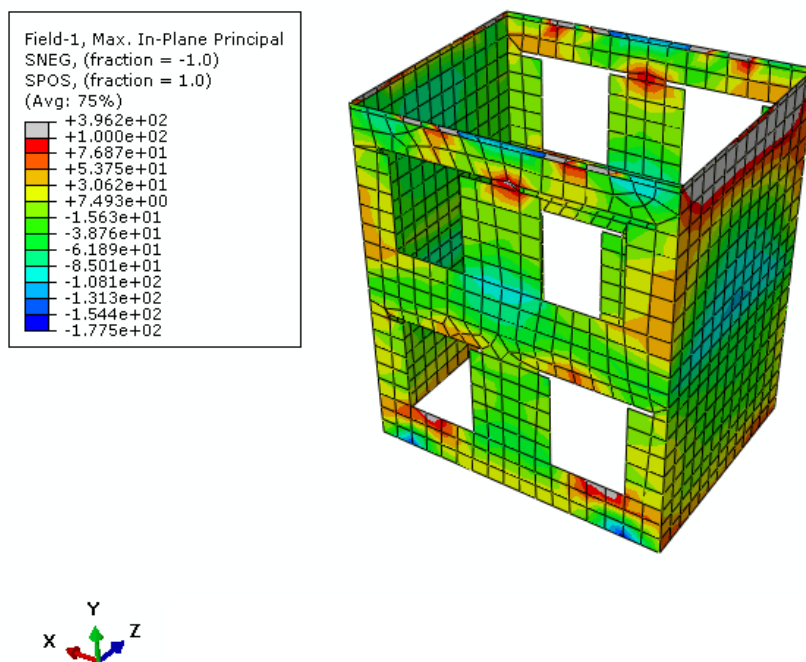
Σαν δυσμενέστερη παραδοχή, θεωρήθηκε ότι όλοι οι πεσοί θα έχουν απομείνει με δύναμη προέντασης 48.6KN δηλαδή ότι θα έχουν απώλειες της τάξεως του 19% η οποία ήταν η μέγιστη απώλεια που υπολογίστηκε σύμφωνα με τα ανωτέρω.

Πεσός	Αστοχία	Συντελεστής Ροπής	Συντελεστής Τέμνουσας	Χρόνος (sec)
1	Καμία	-	-	-
2	Καμία	-	-	-
3	Καμία	-	-	-
4	Καμία	-	-	-
5	Καμία	-	-	-
6	Καμία	-	-	-
7	Καμία	-	-	-
8	Καμία	-	-	-
9	Καμία	-	-	-
10	Καμία	-	-	-
11	Καμία	-	-	-
12	Καμία	-	-	-
πλ1	Καμία	-	-	-
πλ2	Καμία	-	-	-
πλ3	Καμία	-	-	-
πλ4	Καμία	-	-	-

Πίνακας 6.6 Αστοχία πεσών με προένταση (48.6KN) σε χρόνο $t=\infty$



Εικόνα 6.37 Απεικόνιση μέγιστων κύριων τάσεων την χρονική στιγμή $t=4.476\text{sec}$ (με προένταση 48,6KN)



Εικόνα 6.38 Απεικόνιση μέγιστων κύριων τάσεων την χρονική στιγμή $t=4.476\text{sec}$ (με προένταση 48,6KN)

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται αντιληπτή η 100% βελτίωση της τοιχοποιίας μετά την ενίσχυση της προέντασης των πεσσών. Ακόμη, παρά την μείωση της προέντασης κατά 19% λόγω των στιγμιαίων και χρόνιων απωλειών, η συμπεριφορά της κατασκευής δεν αλλάζει καθόλου με την συμπεριφορά που είχε πριν την μείωση.

Παρατηρώντας τα γραφήματα με τις μέγιστες κύριες τάσεις που αναπτύσσονται την χρονική στιγμή 4.476 sec επάνω στην κατασκευή, στις εξωτερικές επιφάνειες των πλάγιων πεσσών και συγκεκριμένα στους ΠΛ2 και ΠΛ4 (δηλαδή τους δύο επάνω), παρουσιάζει αστοχία. Ωστόσο η εσωτερική πλευρά των πεσσών αυτών δεν παρουσιάζει αστοχία. Και για το λόγο αυτό στα εντατικά μεγέθη δεν παρουσιάστηκε αστοχία, καθώς παίρνει τη μέση τιμή των τάσεων που αναπτύσσεται στην κάθε πλευρά του κάθε στοιχείου.

Επίσης να τονισθεί το γεγονός, ότι για τον προσδιορισμό της υπέρβασης των αντοχών στους πεσσούς, έγινε η χρήση των τύπων άοπλης τοιχοποιίας και της μεθοδολογίας η οποία έχει προαναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

Μετά την ανάλυση, και την αξιολόγηση των ανωτέρω, είναι πλέον αποδεδειγμένη η αύξηση της αντοχής μιας τοιχοποιίας ενισχυμένης με την μέθοδο της προεντάσεως. Βελτιώνει θέματα εκτός επιπέδου αστοχίας πεσσών, εξαλείφει προβλήματα υπέρβασης επιτρεπόμενης εκκεντρότητας-ανασήκωμα, περιπτώσεις εφελκυσμού πεσσών και αυξάνει την διατμητική

αντοχή της τοιχοποιίας. Όπως παρατηρήθηκε σε όλα τα γραφήματα με τις μέγιστες κύριες τάσεις στην πιο χαρακτηριστική στιγμή της σεισμικής διέγερσης , αλλά και στα διαγράμματα των αντοχών σε κάμψη και τένουσα σε όλη την χρονοϊστορία του σεισμού η ενίσχυση με κατακόρυφους τένοντες προέντασης ήταν αποτελεσματική. Συνεπώς, ο στόχος της εργασίας αυτής επιτεύχθηκε, διότι κατέληξε με επιτυχή αποτελέσματα και αποδεικνύοντας ότι με ένα τέτοιο οικονομικό και μη καταστρεπτικό τρόπο ενίσχυσης, ένα ιστορικό κτίριο από τοιχοποιία μπορεί να βελτιωθεί ως προς την συμπεριφορά του σε ποσοστό που αγγίζει το 100% σε όλους τους ορόφους, απέναντι σε ένα δυναμικό φαινόμενο όπως είναι ο σεισμός. Και συγκεκριμένα, σε ένα σεισμό ο οποίος είχε αποδειχθεί και ιδιαίτερα καταστρεπτικός για τέτοιου είδους κτίρια.

7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΕΙΑ

1. Χρήστος Γ.Καραγιάννης: “Σχεδιασμός κατασκευών από ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ”, Εκδ. σοφία, Θεσσαλονίκη, 2015.
2. Gavin D. Wight, Jason M. Ingham, Mervyn J. Kowalsky: “Shaketable Testing of Rectangular Post-Tensioned Concrete Masonry Walls”, ACI Structural Journal, 2006.
3. Ν.ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ, Ε.ΚΥΡΙΑΖΗ, Κ.ΛΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ: “ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ”, Εκδ. Συμμεών, Αθήνα, 1991.
4. Αθανάσιος Χ.Τριανταφύλλου: “Δομικά Υλικά”, Εκδ. 10η Έκδοση, Πάτρα, 2013.
5. A. Taliercio: “An overview of masonry creep”, Elsevier, Italy, 2009.
6. Jeffrey Brooks: ”Concrete and Masonry Movements”, , 2014
7. S. Sánchez-Beitia, D. Luengas-Carreño, M. Crespo de Antonio: “The presence of secondary creep in historic masonry constructions: A hidden problem”, Elsevier, Spain, 2017.
8. E. Verstrynghe a, L. Schueremans, D. Van Gemert, M.A.N. Hendriks: “Modelling and analysis of time-dependent behaviour of historical masonry under high stress levels”, Elsevier, Belgium-Netherland, 2011.
9. G.D. Wight, J.M. Ingham: “AN EXPERIMENTAL STUDY OF CREEP AND SHRINKAGE IN POST-TENSIONED CONCRETE MASONRY”, Auckland, New Zealand, 2005.
10. D. LENCZNER: “Creep in Brickwork”, University 01 Wales.
11. José Pina-Henriques, Paulo B. Lourenço: “Testing and modelling of masonry creep and damage in uniaxial compression”, University of Minho, Portugal, 2014.
12. Doria Foti, Pietro Monaco, Post tensioned masonry: State of the Art, 2000 John Wiley & Sons, Ltd., Prog. Struct. Engng Mater. 2000; 2:311-318.
13. Innovative seismic design of post-tensioned concrete masonry house" - Wight Gavin D., Ingham Jason M., Wilton Andrew R. - 11/01/2007 - Canadian Journal of Civil Engineering Nov,2007, Volume 34, Issue 11.
14. Daniel Lazzarini, Peter Laursen, Cole McDaniel, "Out-of-Plane Seismic Performance of Unreinforced Masonry Walls Retrofitted with Unbonded Post-Tensioning Tendons", 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering July 25-29th 2010
15. Erhard Gunkler, Harald Budelmann, Ulf Husemann, "Zum Erdbebenwiderstand vorgespannter Mauerwerkswände", Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Mauerwerk 10 (2006), Heft 1
16. VSL Post - tensioned masonry structures - VSL report series
17. P. T. Laursen, "Seismic Performance of Prestressed Concrete Masonry Walls Incorporating Energy Dissipators, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China
18. Harald Budelmann, Erhard Gunkler, Hans-Joachim Wichmann, Ulf Husemann, "Gebäudeaussteifung mittels vorgespannter Dünn- und „Normalbett“-Mauertafeln, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und

technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Mauerwerk 10 (2006),
Heft 1

19. Beavertown block company, Post-tensioned concrete masonry wall design,
2002 National Concrete Masonry Association
20. M. E. Phipps, Prestressed Masonry, 2000 John Wiley & Sons, Ltd., Prog.
Struct. Engng Mater. 2000; 2:304 - 310