

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΣΦΟΝΔΥΛΩΝ ΧΩΡΙΣ Ή ΜΕ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΥΝΔΕΣΜΟ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΤΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα φάση η ερευνητική προσπάθεια έχει σαν στόχο να μελετήσει σύνθετα φαινόμενα που εμφανίζονται στην διεπιφάνεια μεταξύ δύο σφονδυλωτών σωμάτων υπό την επίδραση οριζόντιας φόρτισης. Η αριθμητική αυτή διερεύνηση, μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, συμβαδίζει ως ένα ορισμένο βαθμό με την αντίστοιχη διερεύνηση στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσ/νίκης, όπου τέτοια σφονδυλωτά σώματα χωρίς ή με κεντρικούς συνδέσμους, υποβλήθηκαν σε μια ακολουθία οριζόντιων φορτίσεων, όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στην παρούσα φάση της πειραματικής προσομοίωσης δεν γίνεται προσπάθεια να γίνει η ποσοτική προσέγγιση γνωστών πειραματικών αποτελεσμάτων. Αντίθετα, με βάση συγκεκριμένες παραδοχές, ως προς τις ιδιότητες των σφονδύλων και των συνδέσμων, γενικευμένου χαρακτήρα, γίνεται εδώ η προσπάθεια της ποιοτικής προσέγγισης της συμπεριφοράς που παρατηρήθηκε πειραματικά. Δηλαδή, αφενός ως προς την ολίσθηση που εμφανίζεται στην διεπιφάνεια των σφονδύλων που δεν έχουν συνδέσμους, αφετέρου στα σύνθετα φαινόμενα που συνοδεύουν την προσθήκη συνδέσμων. Στην περίπτωση αυτή, όπως παρατηρήθηκε στην πειραματική ακολουθία που διεξήχθηκε, η ολίσθηση δεν συμβαίνει ανεμπόδιστα, μια και ο κεντρικός σύνδεσμος που παρεμβάλλεται αναλαμβάνει φορτία και αναπτύσσει εντάσεις και παραμορφώσεις (αρχικά με ελαστικό τρόπο στη συνέχεια με ανελαστικό τρόπο) επηρεάζοντας έτσι την συνολική συμπεριφορά του συστήματος σφονδύλων-συνδέσμων. Δύο διαφορετικές αριθμητικές προσομοιώσεις εξετάστηκαν εδώ που η βασική τους διαφορά επικεντρώνεται στην διεπιφάνεια δύο σφονδύλων και στην ύπαρξη ή απουσία κεντρικού συνδέσμου. Όλες οι προσομοιώσεις που εξετάστηκαν αναφέρονται στο δισδιάστατο επίπεδο. Στην πρώτη αριθμητική προσομοίωση θεωρούνται δύο κυβικά στερεά σώματα που συνδέονται στην μεταξύ τους διεπιφάνεια κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται μόνο η ολίσθηση μεταξύ τους. Στην αριθμητική αυτή προσομοίωση εξετάζονται δύο υποπεριπτώσεις η μία προσεγγίζοντα μία διεπιφάνεια επαφής δύο χαλύβδινων σφονδύλων η δε δεύτερη μια διεπιφάνεια επαφής δύο μαρμάρινων σφονδύλων. Η σύνδεση των σφονδύλων στην διεπιφάνεια γίνεται μέσω μιας ομάδας ελατηρίων με γραμμικές και μη γραμμικές (πέραν ορισμένων ορίων) ιδιότητες, που βασίζονται στις πειραματικές μετρήσεις των αντίστοιχων συντελεστών τριβής. Η δεύτερη αριθμητική προσομοίωση αναφέρεται σε μία σύνθετη διάταξη που εκτός από την απλή επαφή μεταξύ των δύο σφονδύλων, όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση, περιλαμβάνει έναν κεντρικό σύνδεσμο με πόλος και εμπόλιο. Η σύνδεση του πόλου με το εμπόλιο γίνεται και πάλι με ελατήρια που έχουν γραμμικές και μη γραμμικές ιδιότητες, ώστε να διαχωρίζεται ο πόλος από το εμπόλιο όταν στην επιφάνεια σύνδεσής τους αναπτύσσονται ελκυστικές δυνάμεις. Επιπρόσθετα, και ο πόλος και το εμπόλιο προσομοιώνονται με νόμους υλικών ώστε πέραν ενός ορίου να πλαστικοποιούνται. Και σ' αυτήν την δεύτερη αριθμητική προσομοίωση προσεγγίζονται αφενός μία διεπιφάνεια επαφής δύο χαλύβδινων σφονδύλων αφετέρου

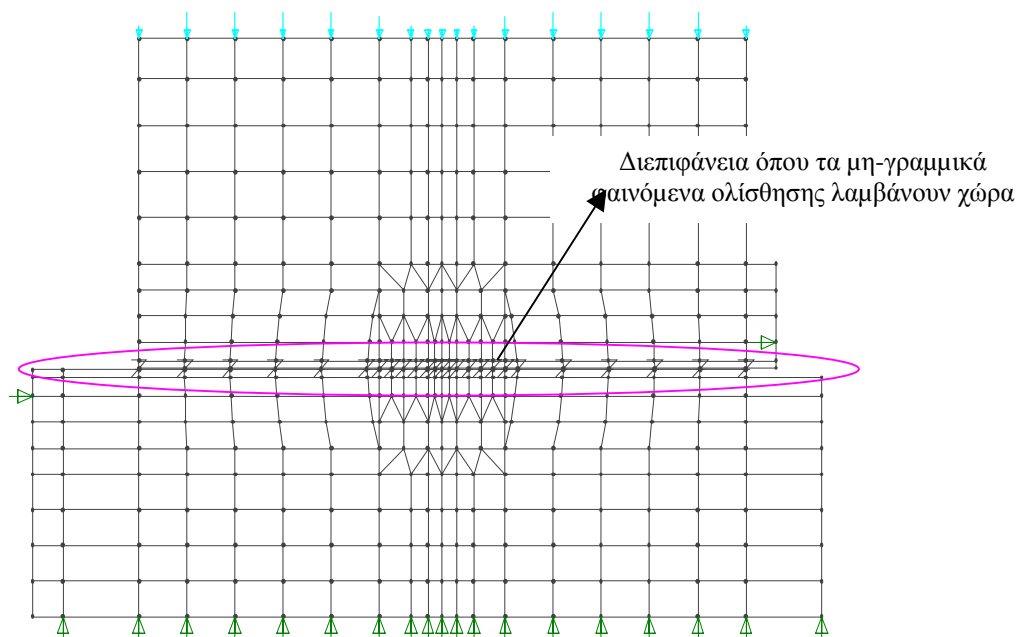
μια διεπιφάνεια επαφής δύο μαρμάρινων σφονδύλων, όπως και πριν. Επιπρόσθετα, διερευνάται η επιρροή της διαμέτρου του πόλου του συνδέσμου, προσομοιώνοντας μία φορά πόλο διαμέτρου 10mm ενώ την άλλη φορά πόλο διαμέτρου 40mm. Όπως προαναφέρθηκε, με βάση συγκεκριμένες παραδοχές ως προς τις ιδιότητες των σφονδύλων και των συνδέσμων γενικευμένου χαρακτήρα, γίνεται εδώ η προσπάθεια της ποιοτικής προσέγγισης της συμπεριφοράς που παρατηρήθηκε πειραματικά. Δηλαδή της μεταβολής της φέρουσας ικανότητας του συστήματος που εξετάζεται κάτω από διαρκώς αυξανόμενες οριζόντιες μετατοπίσεις στην διεπιφάνεια των σφονδύλων, όταν ταυτόχρονα το σύστημα υπόκειται σε κατακόρυφα φορτία συγκεκριμένου σταθερού επιπέδου. Επιπρόσθετα να παρατηρηθούν μορφές συμπεριφοράς με επίκεντρο τα συνθετικά μέρη του κεντρικού συνδέσμου, δηλαδή τον πόλο και τα εμπόλια. Εδώ ενδιαφέρει η επιρροή των συνδέσμων στη φέρουσα ικανότητα και ειδικότερα το μέγεθος του πόλου καθώς και η δυνατότητα πλαστικοποίησης που έχει δοθεί αριθμητικά στον πόλο και τα εμπόλια.

7.2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΛΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, η πρώτη κατηγορία αριθμητικών προσομοιώσεων αφορά την συμπεριφορά δύο σφονδύλων που βρίσκονται σε απλή επαφή μεταξύ τους, με μία οριζόντια διεπιφάνεια επαφής-ολίσθησης και υποβάλλονται σε σύνθετη φορτιστική διαδικασία που περιλαμβάνει μία πρόθλιψη των σφονδύλων και κατόπιν μια διαδοχική αύξηση του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου μέσω μιας σταδιακής βήμα προς βήμα αύξησης της οριζόντιας σχετικής μετατόπισης των δύο σφονδύλων στην διεπιφάνεια τους. Η αριθμητική αυτή προσομοίωση περιλαμβάνει δύο επιφανειακά στοιχεία που λειτουργούν μόνο εντός επιπέδου και αντιπροσωπεύουν τα δύο στερεά σώματα (τους σφονδύλους) και μία σειρά ελατήριων τριβής που πάλι διατηρούν δύο βαθμούς ελευθερίας και προσομοιώνουν τις συνθήκες επαφής μεταξύ των δύο στερεών σωμάτων στην διεπιφάνεια. Οι διαστάσεις των επιφανειακών στοιχείων είναι 0.5m x 0.5m x 0.15m για το μεγαλύτερο σώμα και 0.4m x 0.4m x 0.2m για το μικρότερο. Τα δύο σώματα-σφόνδυλοι θεωρείται ότι συμπεριφέρονται ελαστικά, καθ' όλη την διάρκεια της ανάλυσης, θέτοντας υψηλό μέτρο ελαστικότητας για τους σφονδύλους, του επιπέδου του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα 2×10^{11} N/m². Οι συνθήκες επαφής είναι ίδιες τόσο για τους χαλύβδινους σφονδύλους όσο και τους μαρμάρινους σφονδύλους εκτός από τις γραμμικές και μη γραμμικές ιδιότητες των ελατηρίων. Όλα τα μη-γραμμικά φαινόμενα στην εν λόγω αριθμητική προσομοίωση συγκεντρώνονται στην διεπιφάνεια επαφής-ολίσθησης των δύο σφονδύλων. Στην πρώτη περίπτωση των χαλύβδινων σφονδύλων θεωρείται ένας συντελεστής τριβής της τάξης του $\mu=0.16$ και στην δεύτερη περίπτωση των μαρμάρινων σφονδύλων ένας συντελεστής τριβής της τάξης του $\mu=0.84$. Για λόγους διάκρισης οι επιλύσεις όπου χρησιμοποιούνται ελατήρια με ιδιότητες αντίστοιχες του συντελεστή τριβής $\mu=0.16$ θα χαρακτηρίζονται ως σφόνδυλοι με διεπιφάνεια χάλυβα-χάλυβα, ενώ εκεί όπου χρησιμοποιούνται ελατήρια με ιδιότητες αντίστοιχες του συντελεστή τριβής $\mu=0.84$ θα χαρακτηρίζονται ως σφόνδυλοι με διεπιφάνεια μάρμαρο-μάρμαρο. Παράλληλα, η συμπεριφορά των σφονδύλων στην οριζόντια καταπόνηση ελέγχεται για δύο επίπεδα πρόθλιψης, δηλαδή τη μια φορά για κατακόρυφο φορτίο 2000 Kg και την άλλη για κατακόρυφο φορτίο 4000 Kg.

Η γεωμετρία της προσομοίωσης μαζί με τις οριακές συνθήκες που υιοθετήθηκαν φαίνονται στο σχήμα 7.1. Η οριζόντια δύναμη όπως και η οριζόντια στήριξη της προσομοίωσης γίνεται σε προεπιλεγμένες θέσεις κοντά στην επιφάνεια ολίσθησης. Η πύκνωση των πεπερασμένων στοιχείων στο κέντρο της προσομοίωσης είναι

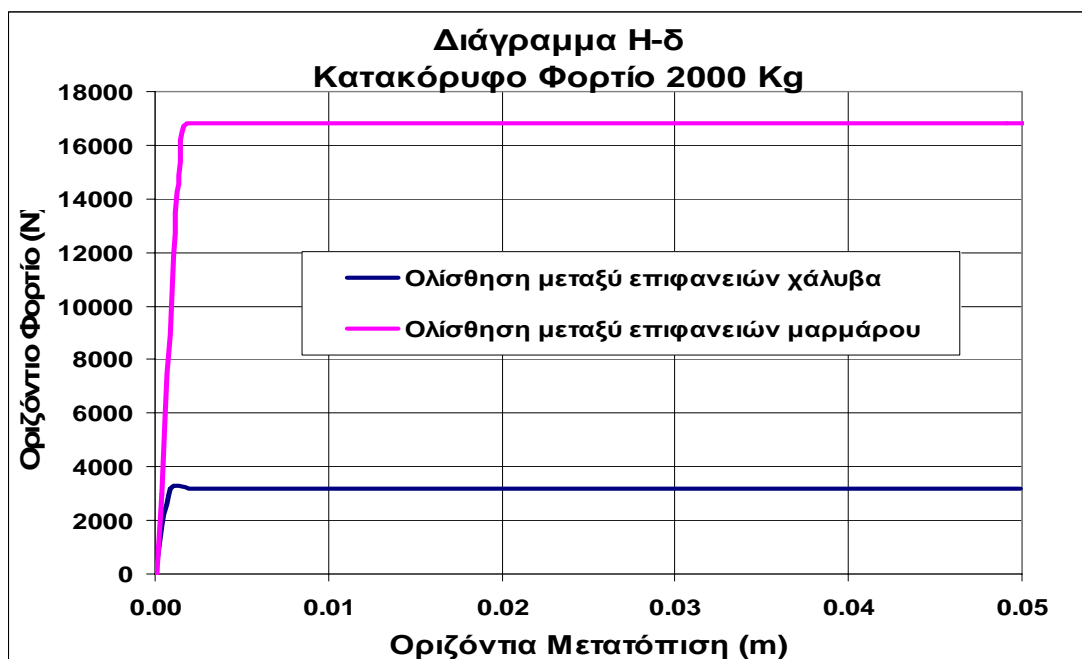
απαραίτητη γιατί το ίδιο μοντέλο τροποποιημένο θα χρησιμοποιηθεί και για την αριθμητική προσομοίωση του κεντρικού συνδέσμου με πόλο και εμπόλια μεταξύ των δύο σφονδύλων.



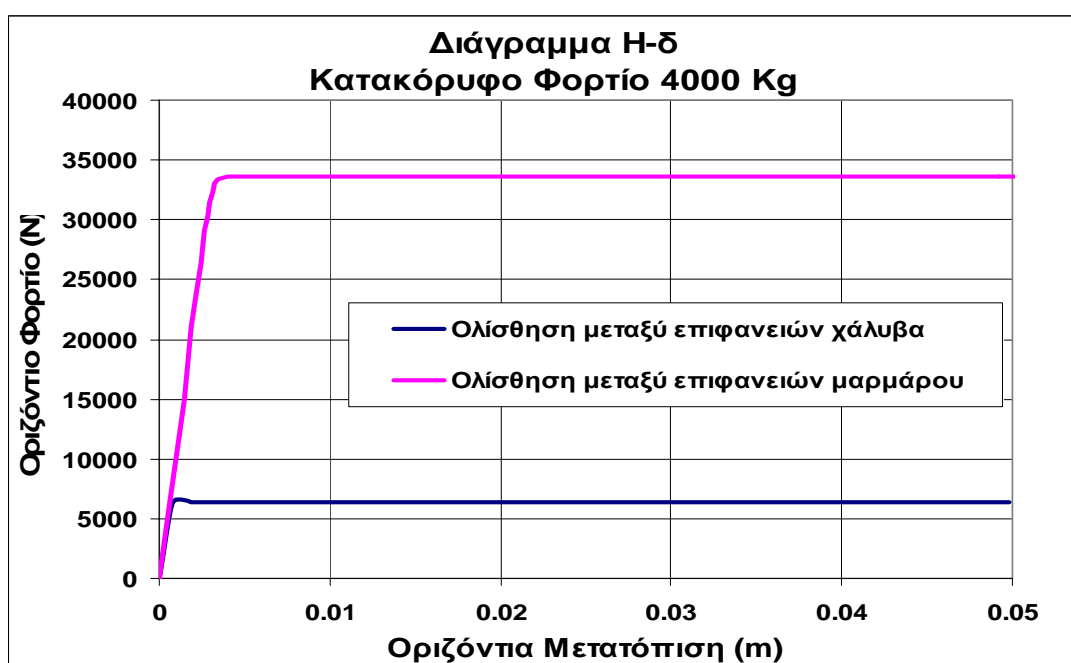
Σχήμα 7.1. Γεωμετρία προσομοίωσης πειράματος ολίσθησης δύο σωμάτων χωρίς πόλο με τις οριακές συνθήκες που υιοθετήθηκαν και την διεπιφάνεια ολίσθησης.

Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης

Στο σχήμα 7.2 και 7.3, παρατίθενται τα διαγράμματα H-δ για τις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν σε συνθήκες ανεμπόδιστης ολίσθησης. Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα **H-δ** (επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο – σχετική μετατόπιση ολίσθησης μεταξύ των σφονδύλων) για κατακόρυφο φορτίο 2000 Kg για τις δύο περιπτώσεις διεπιφανειών που επιλέχθηκαν (χαλύβδινη ή μαρμάρινη), ενώ στο σχήμα 7.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα **H-δ** για κατακόρυφο φορτίο 4000 Kg. Η ολίσθηση της διεπιφάνειας (διαρροή των ελατηρίων) συνοδεύεται με αλλαγή στην δυσκαμψία της καμπύλης **H-δ**. Η συμπεριφορά είναι ελαστοπλαστική. Αυτή η συμπεριφορά είναι κοινή για αρχικό θλιπτικό φορτίο 2000Kg και 4000Kg, ενώ η συνολική διατμητική αντοχή των μαρμάρινων επιφανειών είναι αισθητά αυξημένη σε σχέση με αυτή των χαλύβδινων επιφανειών. Τέλος, η ολίσθηση στην περίπτωση των μαρμάρινων επιφανειών ενεργοποιείται για σχετικά κάπως μεγαλύτερη οριζόντια μετακίνηση σε σχέση με τις χαλύβδινες επιφάνειες.

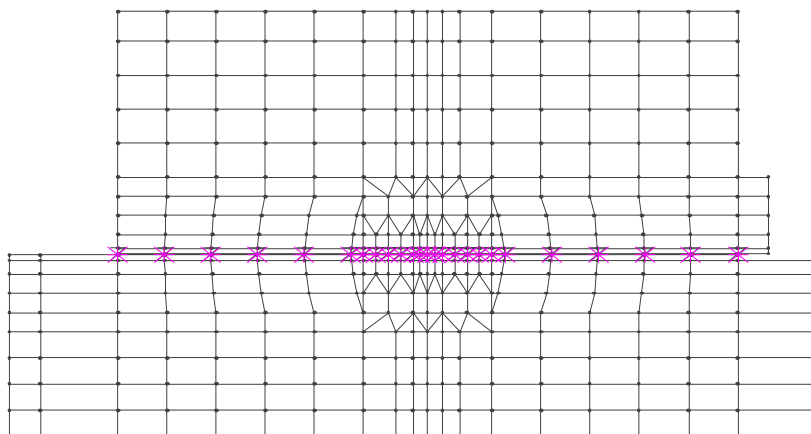


Σχήμα 7.2. Συγκριτικό διάγραμμα H-δ για ανεμπόδιστη ολίσθηση και κατακόρυφο φορτίο 2000 Kg.

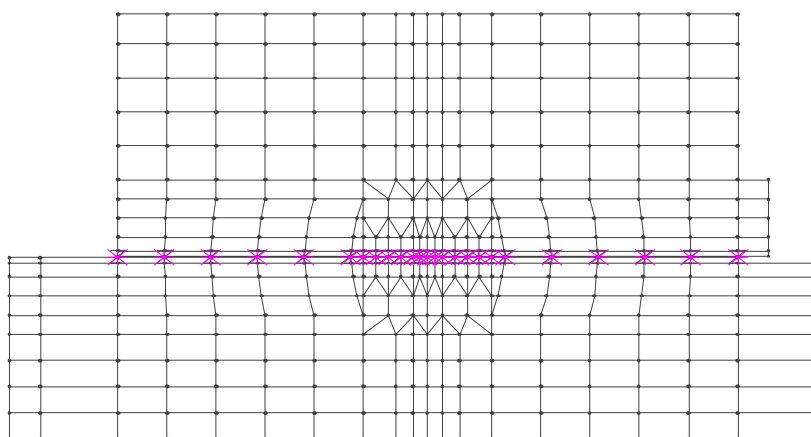


Σχήμα 7.3. Συγκριτικό διάγραμμα H-δ για ανεμπόδιστη ολίσθηση και κατακόρυφο φορτίο 4000 Kg.

Στα σχήματα 7.4 και 7.5, φαίνεται η εξέλιξη της αστοχίας για φορτίο 4000 Kg για τις δύο περιπτώσεις (χαλύβδινη ή μαρμάρινη διεπιφάνεια). Η αστοχία παρουσιάζεται με μορφή αστερίσκου και γίνεται απότομα σε όλο το μήκος της διεπιφάνειας.

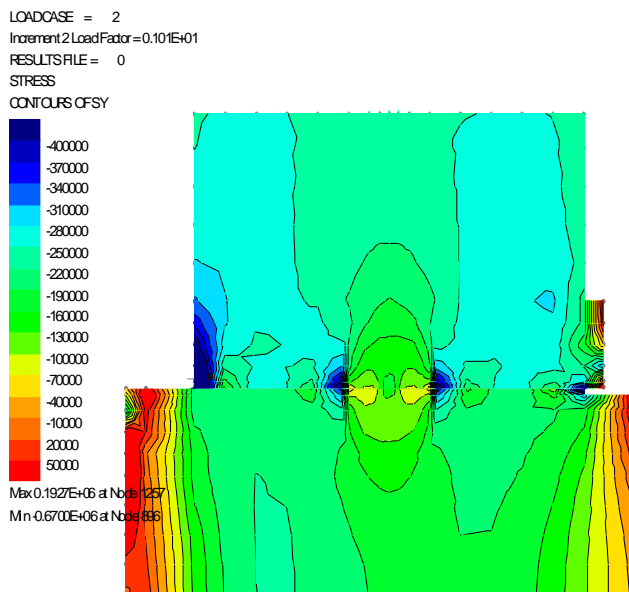


Σχήμα 7.4. Εξέλιξη αστοχίας στην διεπιφάνεια χάλυβα-χάλυβα με κατακόρυφο φορτίο 4000kg

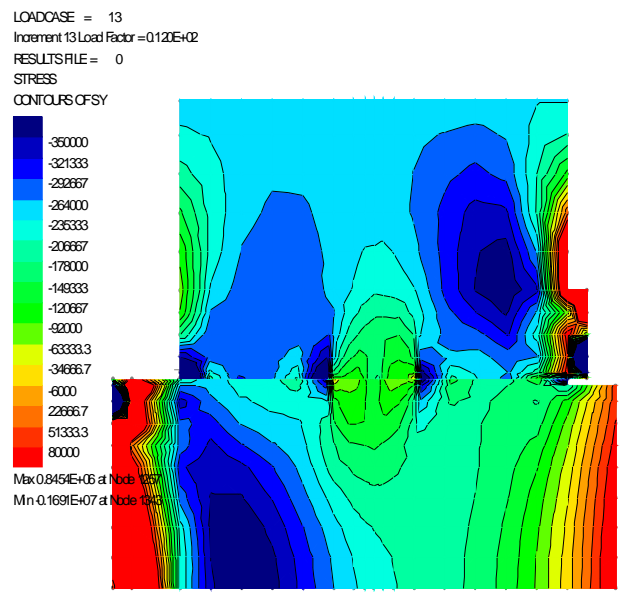


Σχήμα 7.5. Εξέλιξη αστοχίας στην διεπιφάνεια μάρμαρο-μάρμαρο με κατακόρυφο φορτίο 4000kg

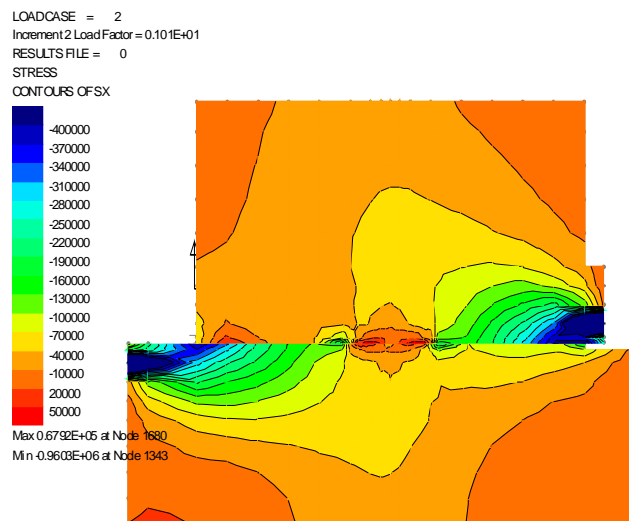
Παρακάτω παρατίθενται εικόνες κατακόρυφων ή οριζοντίων ορθών τάσεων καθώς και διατμητικών τάσεων για έναρξη της ολίσθησης. Επίσης διαγράμματα των διατμητικών τάσεων όταν η ολίσθηση έχει ολοκληρωθεί, και κύριων τάσεων σ_{max} για έναρξη της ολίσθησης. Για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε οι αντίστοιχες εικόνες τάσεων τοποθετούνται παράλληλα για εύκολη σύγκριση. Παρατηρείται αρχικά η έντονη συγκέντρωση τάσεων περιμετρικά του κέντρου της προσομοίωσης για τις κατακόρυφες τάσεις και εντονότερη συγκέντρωση για την περίπτωση της ολίσθησης μεταξύ μαρμάρινων επιφανειών. Επίσης κατά την έναρξη της ολίσθησης οι οριζόντιες τάσεις παρουσιάζουν έντονη συγκέντρωση περιμετρικά της διεπιφάνειας ολίσθησης με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στην περίπτωση των ολισθαίνων μαρμάρινων επιφανειών. Οι διατμητικές τάσεις στην περίπτωση των μαρμάρινων επιφανειών είναι αρκετά μεγαλύτερες γεγονός που εξηγεί την αυξημένη διατμητική αντοχή της συγκεκριμένης προσομοίωσης σε σχέση με την προσομοίωση των χαλύβδινων επιφανειών.



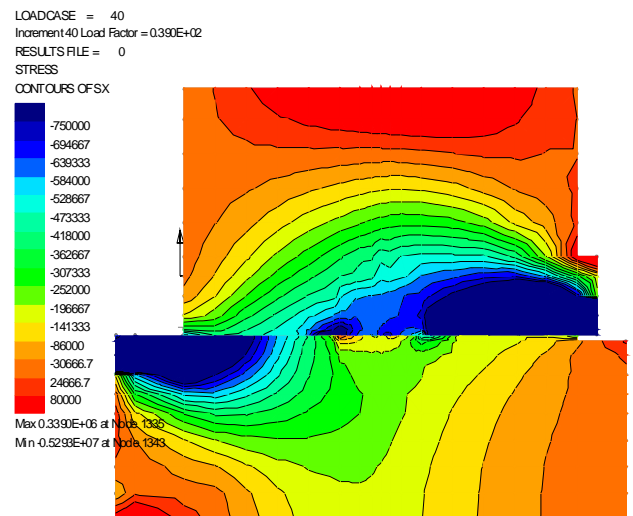
Εικόνα 1. Κατακόρυφων ορθών τάσεων χάλυβα-χάλυβα για οριζόντια μετακίνηση 0.0012 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)



Εικόνα 6. Κατακόρυφων ορθών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο οριζόντια μετακίνηση 0.0031 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)



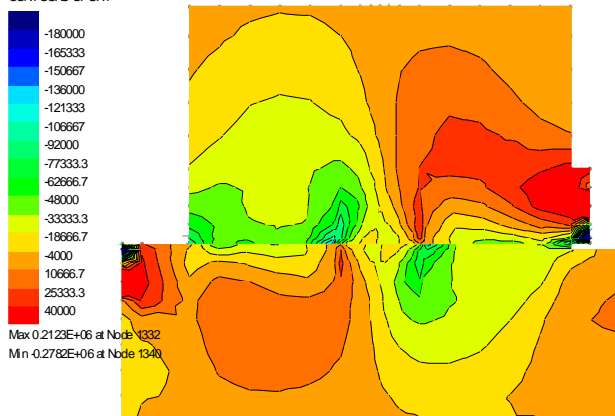
Εικόνα 2. Οριζόντιων τάσεων χάλυβα-χάλυβα οριζόντια μετακίνηση 0.0012 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)



Εικόνα 7. Οριζόντιων τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο οριζόντια μετακίνηση 0.0031 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

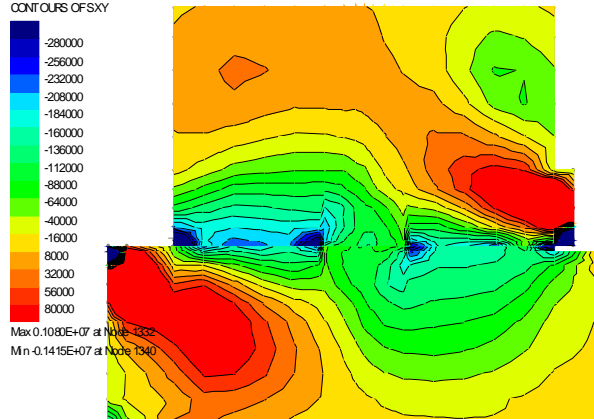


LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.101E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SXY



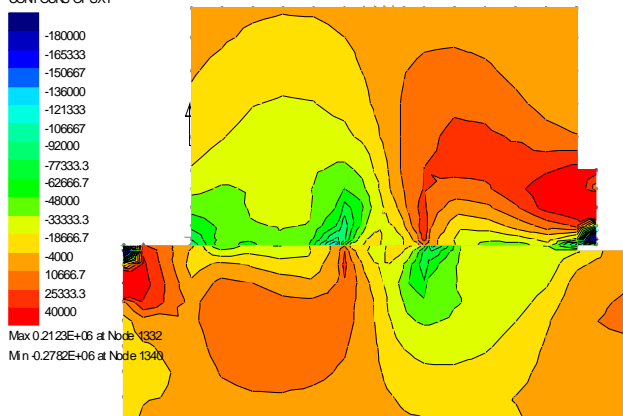
Εικόνα 3. Διατμητικών τάσεων χάλυβα-χάλυβα
Οριζόντια μετακίνηση 0.0012m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 13
Increment 13 Load Factor = 0.120E+02
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SXY



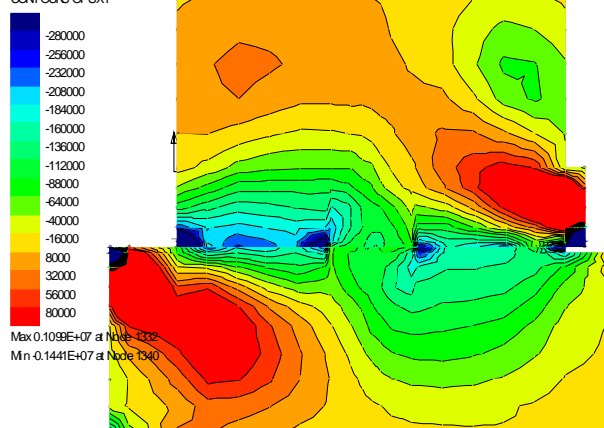
Εικόνα 8. Διατμητικών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο οριζόντια
μετακίνηση 0.0031m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.101E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SXY



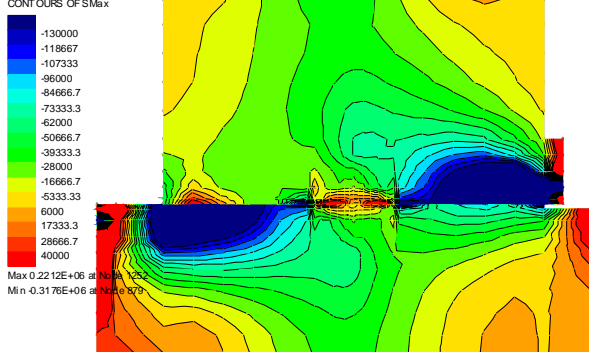
Εικόνα 4. Διατμητικών τάσεων χάλυβα-χάλυβα
οριζόντια μετακίνηση 0.040 m (συνέχεια της μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 40
Increment 40 Load Factor = 0.390E+02
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SXY



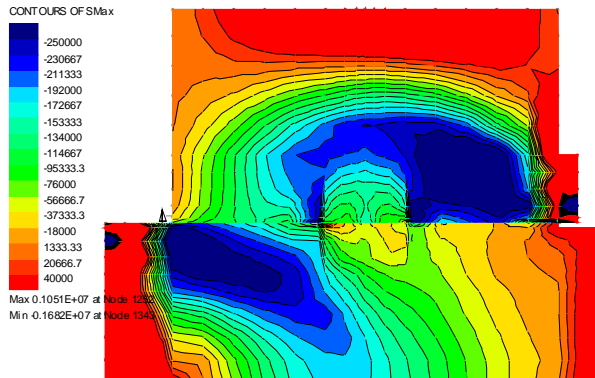
Εικόνα 9. Διατμητικών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο οριζόντια
μετακίνηση 0.040 m (συνέχεια της μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.101E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SMax



Εικόνα 5. Κύριων τάσεων χάλυβα-χάλυβα (σmax)
οριζόντια μετακίνηση 0.0012 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

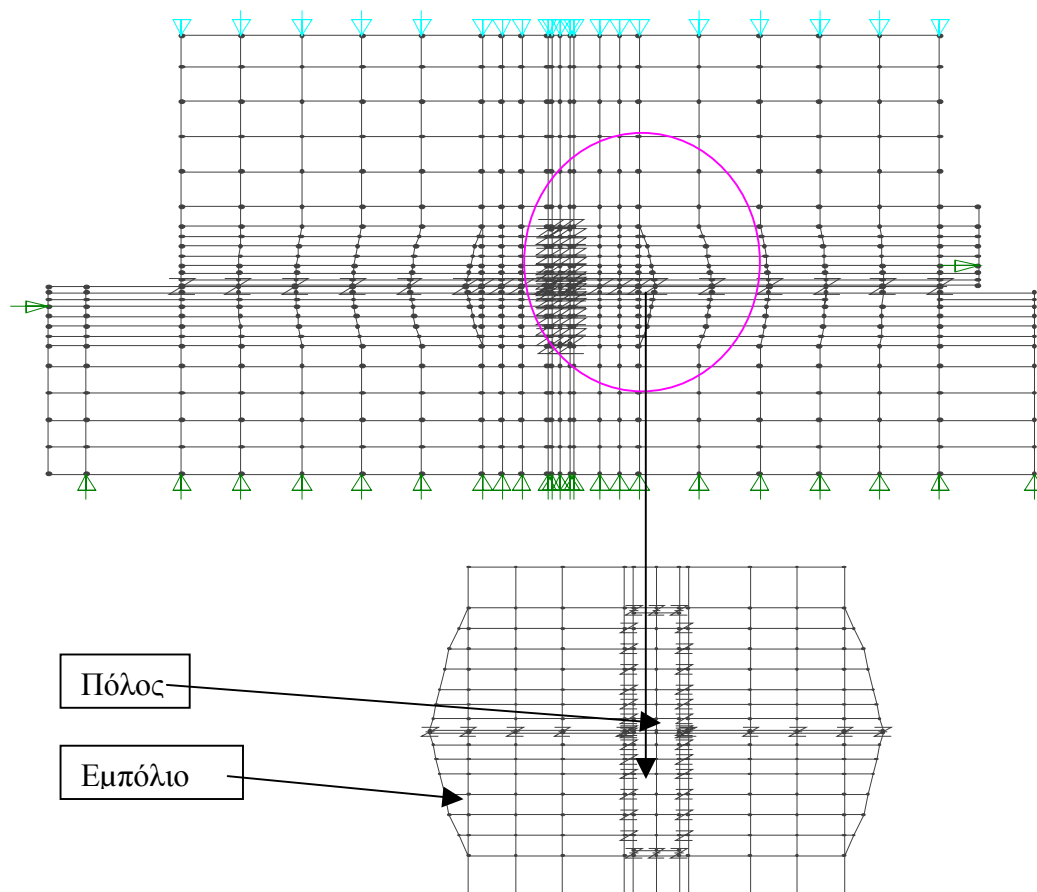
LOADCASE = 13
Increment 13 Load Factor = 0.120E+02
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SMax



Εικόνα 10. Κύριων τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο (σmax)
οριζόντια μετακίνηση 0.0031 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

7.3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΥΝΔΕΣΜΟ (Πόλος 10mm).

Η δεύτερη κατηγορία αριθμητικών προσομοιώσεων αφορά την συμπεριφορά δύο σωμάτων τα οποία βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους αλλά παράλληλα συνδέονται κεντρικά μεταξύ τους με κεντρικό σύνδεσμο. Στην πρώτη περίπτωση, που εξετάζεται στην παρούσα παράγραφο, ο πόλος έχει διάμετρο 10mm. Και πάλι προσομοιώνεται μια σύνθετη φορτιστική διαδικασία που περιλαμβάνει μία πρόθλιψη και στη συνέχεια μια διαδοχική αύξηση του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου μέσω επιβαλλόμενης βήμα προς βήμα σχετικής οριζόντιας μετακίνησης μεταξύ των δύο σφονδύλων. Τα χαρακτηριστικά αυτής της αριθμητικής προσομοίωσης όσον αφορά τα πεπερασμένα στοιχεία των δύο σφονδύλων είναι τα ίδια με την προηγούμενη αριθμητική προσομοίωση. Επίσης τα ελατήρια και οι ιδιότητές τους στην διεπιφάνεια των σφονδύλων (πλην του συνδέσμου) είναι τα ίδια με την προηγούμενη αριθμητική προσομοίωση. Η διαφορά στην εν λόγω προσομοίωση έγκειται στην προσομοίωση του πόλου και των εμπολίων.

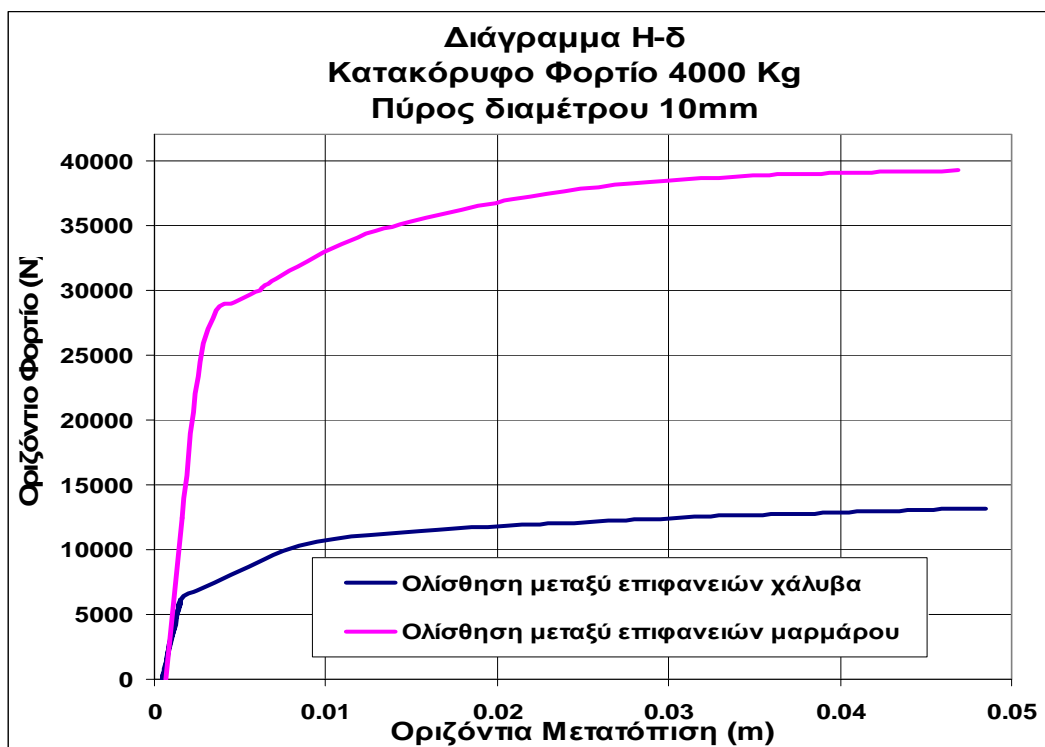


Σχήμα 7.6. Γεωμετρία προσομοίωσης πειράματος ολίσθησης δύο σωμάτων (χάλυβα-χάλυβα , μάρμαρο-μάρμαρο) με την παρουσία πόλου διαμέτρου 10mm.

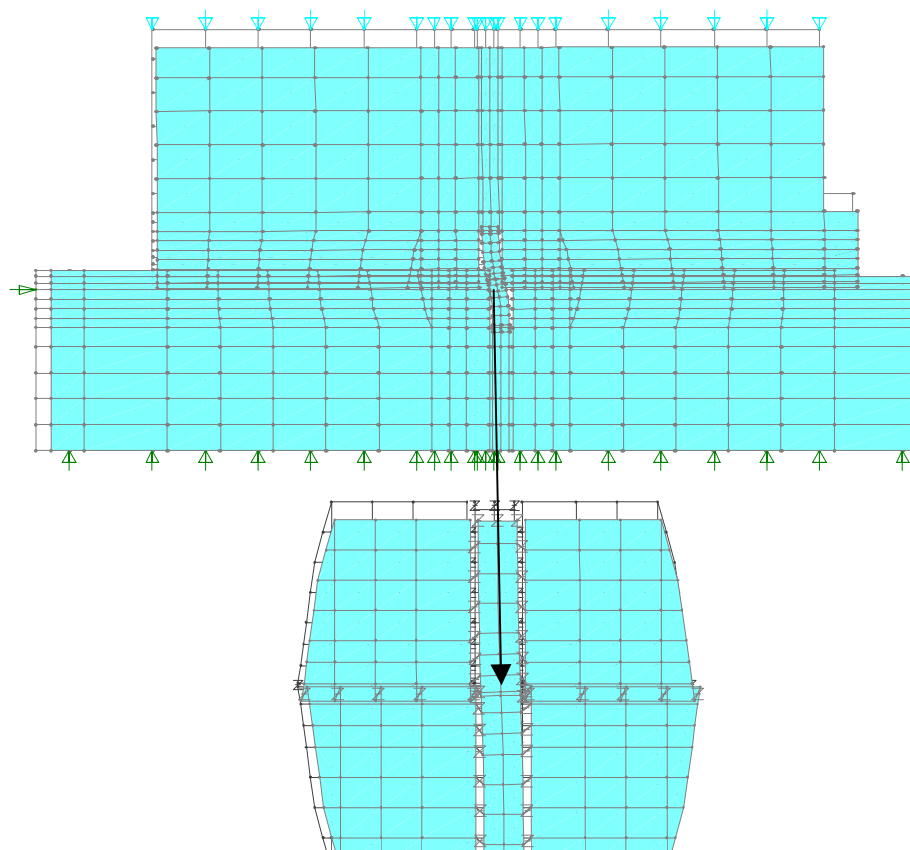
Στην πρώτη περίπτωση η παρουσία του συνδέσμου προσομοιώνεται με πόλο διαμέτρου 10 mm που συνδέει τα δύο επιφανειακά στοιχεία των σφονδύλων ενώ μαζί με τον πόλο θεωρείται ότι περιμετρικά αυτού υπάρχει η προσομοίωση σχετικά ασθενών εμπολίων. Η αριθμητική αυτή προσομοίωση πραγματοποιείται πάλι με χρήση στοιχείων επίπεδης έντασης. Τα πεπερασμένα στοιχεία των σφονδύλων θεωρείται ότι συμπεριφέρονται ελαστικά με υψηλό μέτρο ελαστικότητας όμοιο του χάλυβα $2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$. Τα εμπόλια και ο πόλος συμπεριφέρονται και αυτά μη γραμμικά. Ο πόλος έχει ένα μέτρο ελαστικότητας της τάξης του $1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, ενώ ορίζεται ένα θλιπτικό όριο της τάξης των 150 MPa και ένας ελαφρώς αυξανόμενος μη-γραμμικός κλάδος με μέτρο 10000 N/m^2 . Το εμπόλιο έχει ένα μέτρο ελαστικότητας της τάξης των $1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ και ένα θλιπτικό όριο διαρροής 30 MPa. Περιμετρικά του πόλου τοποθετούνται ελατήρια που λειτουργούν μόνο σε θλίψη σε συνθήκες μονόπλευρης επαφής με το εμπόλιο. Η γεωμετρία της προσομοίωσης μαζί με τις οριακές συνθήκες που υιοθετήθηκαν φαίνονται στο σχήμα 7.6. Οι ως άνω τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των τμημάτων του κεντρικού συνδέσμου είναι ενδεικτικές εν μέρει βασισμένες στις πειραματικές μετρήσεις.

Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης

Στο σχήμα 7.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα **H-δ** (επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο – σχετική μετατόπιση ολίσθησης μεταξύ των σφονδύλων) για κατακόρυφο φορτίο 4000 Kg για τις δύο περιπτώσεις διεπιφανειών που επιλέχθηκαν και πόλο διαμέτρου 10mm. Στην προσομοίωση αυτή αποκαλύπτεται η επίδραση του κεντρικού συνδέσμου (πόλου-εμπολίων) στην φέρουσα ικανότητα σε οριζόντιο φορτίο. Η παρουσία του πόλου οδηγεί στην αύξηση του φέρουσας ικανότητας του συστήματος σφονδύλων-κεντρικού συνδέσμου όπως απεικονίζεται από τους ανιόντες κλάδους της καμπύλης **H-δ** και για τις δύο περιπτώσεις (χαλύβδινη ή μαρμαρίνη διεπιφάνεια). Στην περίπτωση της διεπιφάνειας από μάρμαρο η συνολική συμπεριφορά κυριαρχείται αρχικά, ως προς το φορτίο, από την τριβή-ολίσθηση όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις, χωρίς ο πόλος των 10mm να αυξάνει σημαντικά το επίπεδο του οριζόντιου φορτίου που αναπτύσσεται κατά τα πρώτα στάδια της ολίσθησης. Αντίθετα, το συνολικό οριζόντιο φορτίο, όταν η μετακίνηση ολίσθησης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, σημειώνει σημαντική αύξηση όπως φαίνεται στην καμπύλη **H-δ**. Μετά την διαρροή των ελατηρίων τριβής στην διεπιφάνεια αστοχούν τα ελατήρια στην μονόπλευρη επαφή πόλου-εμπολίου. Ο πόλος παρουσιάζει σταδιακή αστοχία-πλαστικοποίηση για επίπεδο οριζόντιας μετακίνησης μεγαλύτερης των 8mm. Η συνεισφορά βέβαια του πόλου στην συνολική φέρουσα ικανότητα είναι πιο σημαντική στην περίπτωση των δύο χαλύβδινων επιφανειών, όπως παρατηρήθηκε και κατά την διάρκεια της πειραματικής διερεύνησης. Το συνολικό φορτίο στην αριθμητική προσομοίωση που διενεργήθηκε εδώ σχεδόν διπλασιάζεται. Η έναρξη και εδώ της μη γραμμικής μεταβολής της καμπύλης **H-δ** εμφανίζεται και πάλι λόγω της ολίσθησης που επισυμβαίνει στην διεπιφάνεια των δύο σφονδύλων. Στην περίπτωση των χαλύβδινων επιφανειών η καμπύλη **H-δ** παρουσιάζει έναν τριγωνικό κλάδο όπου από για οριζόντια μετατόπιση μεγαλύτερη των 8mm παρατηρούμε πάλι έναρξη της μη γραμμικής συμπεριφοράς του πόλου και των εμπολίων. Στο σχήμα 7.8 παρουσιάζεται η εικόνα των παραμορφώσεων των προσομοιώσεων με χάλυβα-χάλυβα με πόλο 10mm για οριζόντια μετακίνηση 0.00148 m και έναρξη της μη-γραμμικής συμπεριφοράς.

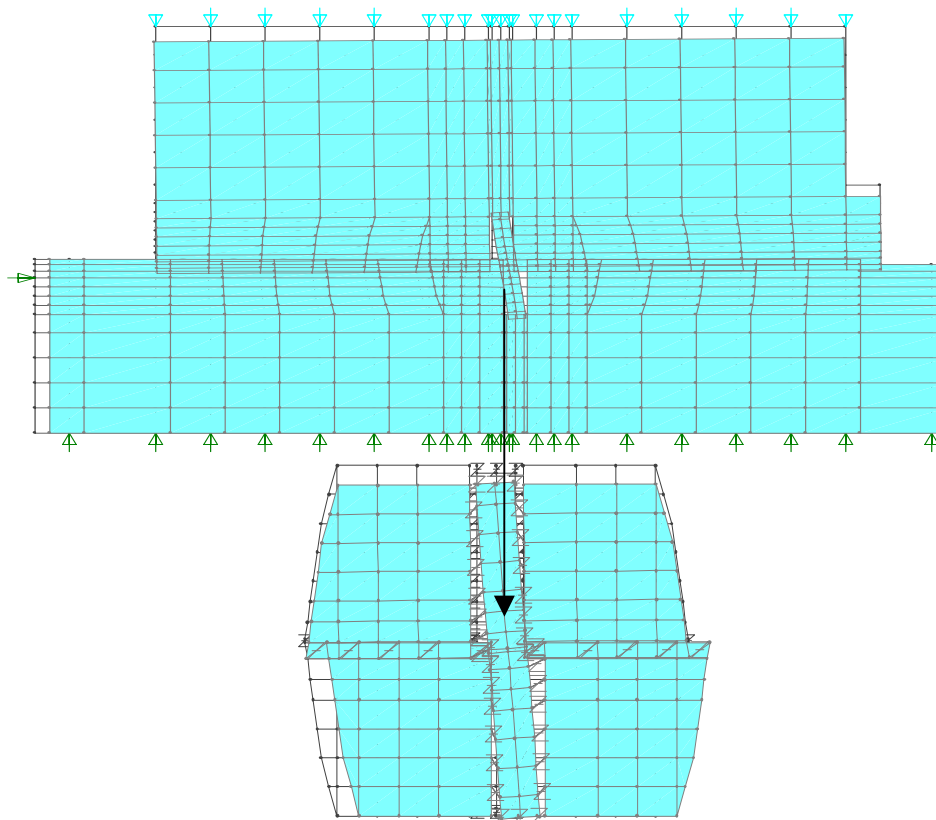


Σχήμα 7.7. Συγκριτικό διάγραμμα Η-δ για σύνθετη ολίσθηση με κεντρικό σύνδεσμο και κατακόρυφο φορτίο 4000 Kg.



Σχήμα 7.8. Εικόνα παραμορφώσεων προσομοίωσης με χάλυβα-χάλυβα και πόλο διαμέτρου 10mm

Στο σχήμα 7.9 παρουσιάζεται η εικόνα των παραμορφώσεων των προσομοιώσεων με μάρμαρο-μάρμαρο με πόλο 10mm για οριζόντια μετακίνηση 0.0036 m και έναρξη της μη-γραμμικής συμπεριφοράς.

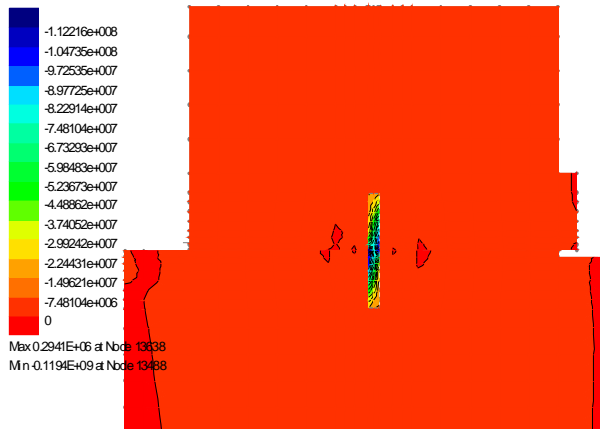


Σχήμα 7.9. Εικόνα παραμορφώσεων προσομοίωσης με μάρμαρο-μάρμαρο και πόλο διαμέτρου 10mm

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες κατακόρυφων ορθών, οριζοντίων ορθών και διατμητικών τάσεων για έναρξη της ολίσθησης καθώς και διατμητικών τάσεων όταν η ολίσθηση έχει ολοκληρωθεί, ή κύριων τάσεων σmax για έναρξη της ολίσθησης. Για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε οι αντίστοιχες εικόνες τάσεων τοποθετούνται παράλληλα για εύκολη σύγκριση. Στην εικόνα των κατακόρυφων τάσεων παρουσιάζεται συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή του πόλου και για τις χαλύβδινες και για τις μαρμάρινες επιφάνειες, το ίδιο παρουσιάζεται και στην περίπτωση των οριζοντίων τάσεων αλλά και των διατμητικών. Οι διατμητικές τάσεις για τις μαρμάρινες επιφάνειες είναι σαφώς πιο αυξημένες γεγονός που δικαιολογεί την αυξημένη αντοχή. Σε αντίθεση με την ελαστοπλαστική συμπεριφορά της ανεμπόδιστης ολίσθησης εδώ η καμπύλη H-δ παρουσιάζει μία ανιούσα συμπεριφορά που και αυτή εξηγείται από την αύξηση των διατμητικών τάσεων που παραλαμβάνονται από τον πόλο.

LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.100E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

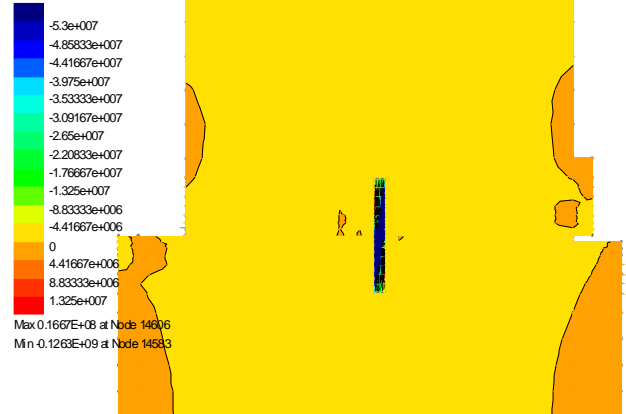
CONTOURS OF SY



Εικόνα 11. Κατακόρυφων ορθών τάσεων χάλυβα-χάλυβα, οριζόντια μετακίνηση 0.00148 m(έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 4
Increment 4 Load Factor = 0.301E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

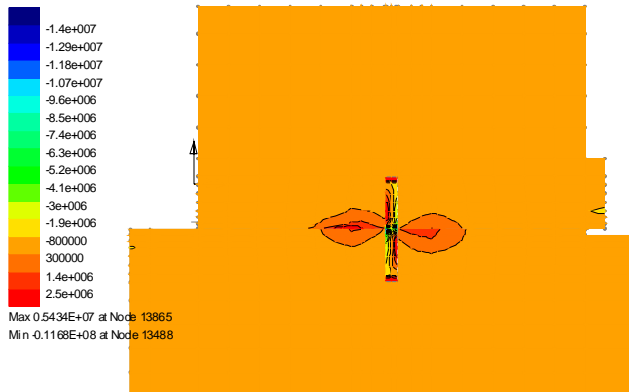
CONTOURS OF SY



Εικόνα 16.Κατακόρυφων ορθών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο, οριζόντια μετακίνηση 0.0036 m(έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.100E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

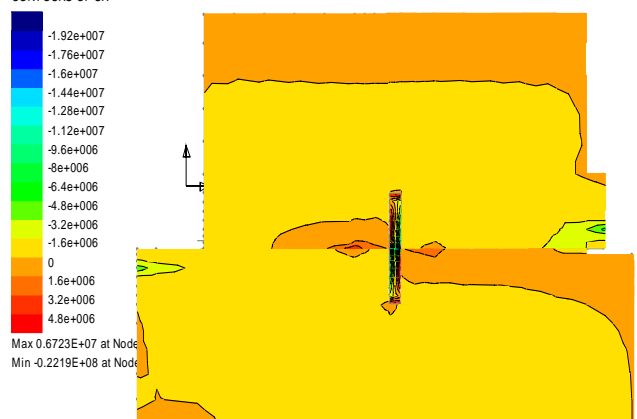
CONTOURS OF SX



Εικόνα 12. Οριζόντιων ορθών τάσεων χάλυβα-χάλυβα για οριζόντια μετακίνηση 0.00148 m(έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOAD CASE = 4
Increment 4 Load Factor = 0.301E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

CONTOURS OF SX



Εικόνα 17.Οριζόντιων ορθών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο για οριζόντια μετακίνηση 0.0036 m(έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)



LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.100E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SXY

-8e+006
-7.36667e+006
-6.73333e+006
-6.1e+006
-5.46667e+006
-4.83333e+006
-4.2e+006
-3.56667e+006
-2.93333e+006
-2.3e+006
-1.66667e+006
-1.03333e+006
-400000
233333
866667
1.5e+006

Max 0.5340E+07 at Node 14645
Min -0.1163E+08 at Node 13485

Εικόνα 13. Διατμητικών τάσεων χάλυβα-χάλυβα οριζόντια μετακίνηση 0.00148 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 4
Increment 4 Load Factor = 0.301E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SXY

-1.92e+007
-1.76e+007
-1.6e+007
-1.44e+007
-1.28e+007
-1.12e+007
-9.6e+006
-8e+006
-6.4e+006
-4.8e+006
-3.2e+006
-1.6e+006
0
1.6e+006
3.2e+006
4.8e+006

Max 0.5348E+07 at Node
Min -0.2269E+08 at Node

Εικόνα 18. Διατμητικών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο οριζόντια μετακίνηση 0.0036 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 40
Increment 40 Load Factor = 0.390E+02
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SXY

-5e+006
-4.56667e+006
-4.13333e+006
-3.7e+006
-3.26667e+006
-2.83333e+006
-2.4e+006
-1.96667e+006
-1.53333e+006
-1.1e+006
-666667
-233333
200000
633333
1.06667e+006
1.5e+006

Max 0.7208E+07 at Node 13867
Min -0.6813E+08 at Node 13480

Εικόνα 14. Διατμητικών τάσεων χάλυβα-χάλυβα οριζόντια μετακίνηση 0.040 m (συνέχεια της μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 33
Increment 33 Load Factor = 0.292E+02
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SXY

-2e+008
-1.83333e+008
-1.66667e+008
-1.5e+008
-1.33333e+008
-1.16667e+008
-1e+008
-8.33333e+007
-6.66667e+007
-5e+007
-3.33333e+007
-1.66667e+007
0
1.66667e+007
3.33333e+007
5e+007

Max 0.3416E+08 at Node
Min -0.9584E+08 at Node

Εικόνα 19. Διατμητικών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο οριζόντια μετακίνηση 0.030 m (συνέχεια της μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.100E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SMax

-5e+006
-4.56667e+006
-4.13333e+006
-3.7e+006
-3.26667e+006
-2.83333e+006
-2.4e+006
-1.96667e+006
-1.53333e+006
-1.1e+006
-666667
-233333
200000
633333
1.06667e+006
1.5e+006

Max 0.5928E+07 at Node 13525
Min -0.1049E+08 at Node 13488

Εικόνα 15. Κύριων τάσεων χάλυβα-χάλυβα (σ_{max}) οριζόντια μετακίνηση 0.00148 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 4
Increment 4 Load Factor = 0.301E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS
CONTOURS OF SMax

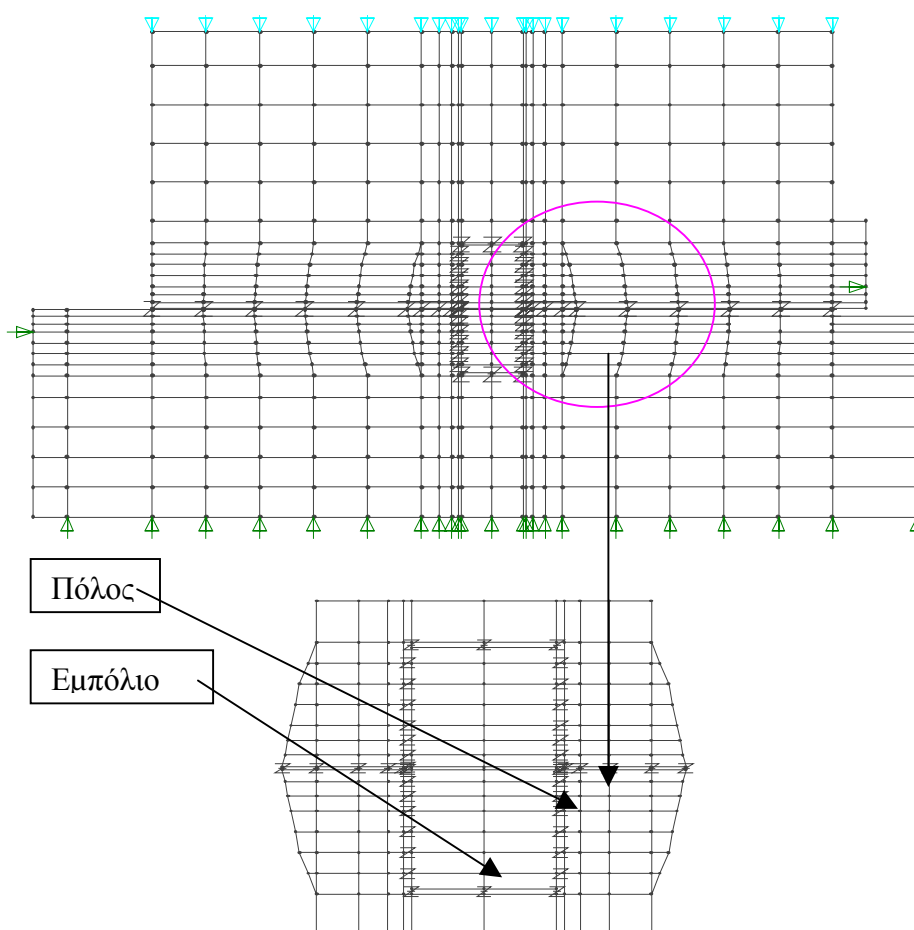
-6.7e+006
-6.17333e+006
-5.64667e+006
-5.12e+006
-4.59333e+006
-4.06667e+006
-3.54e+006
-3.01333e+006
-2.48667e+006
-1.96e+006
-1.43333e+006
-906667
-380000
146667
673333
1.2e+006

Max 0.1848E+08 at Node
Min -0.1759E+08 at Node

Εικόνα 20. Κύριων τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο (σ_{max}) οριζόντια μετακίνηση 0.040 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

7.4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΥΝΔΕΣΜΟ (Πόλος 40mm).

Στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ οι δύο σφόνδυλοι, που βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους, συνδέονται κεντρικά μεταξύ τους με σχετικά ισχυρό κεντρικό σύνδεσμο, έχοντας αυτή τη φορά πόλο διαμέτρου 40mm. Ο πόλος έχει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες με αυτές που προσδιορίστηκαν για τον πόλο διαμέτρου 10mm. Η γεωμετρία της προσομοίωσης μαζί με τις οριακές συνθήκες που υιοθετήθηκαν φαίνονται στο σχήμα 7.10.

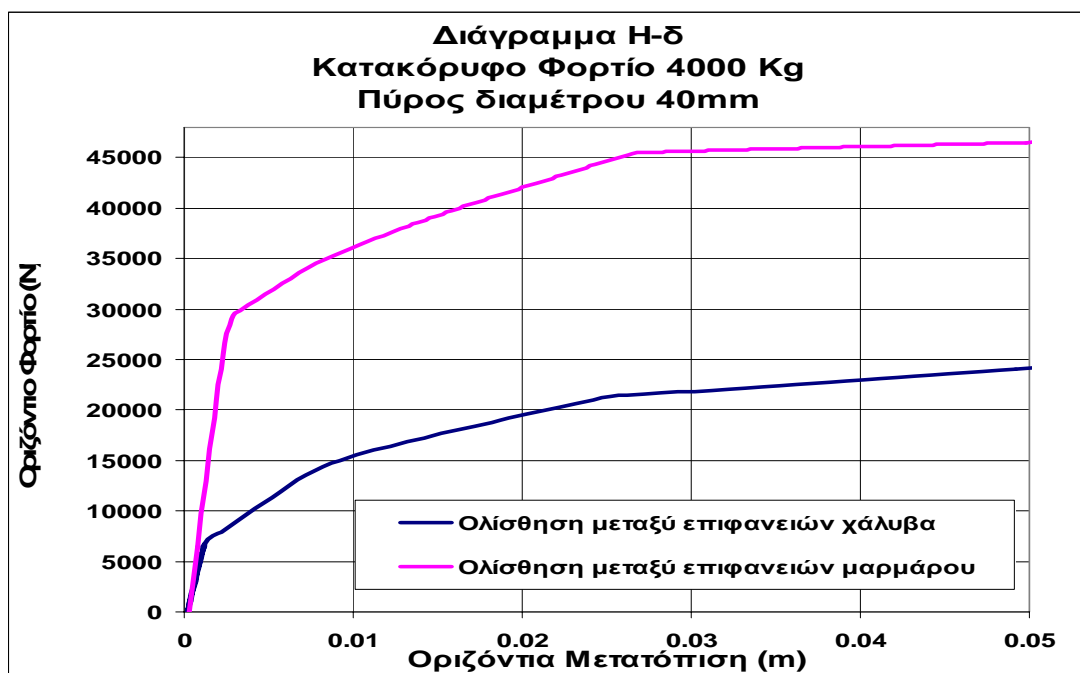


Σχήμα 7.10. Γεωμετρία προσομοίωσης πειράματος ολίσθησης δύο σωμάτων (χάλυβα-χάλυβα , μάρμαρο-μάρμαρο) με την παρουσία πόλου διαμέτρου 40mm.

Αποτελέσματα της Αριθμητικής Προσομοίωσης

Στο σχήμα 7.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα **H-δ** (επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο – σχετική μετατόπιση ολίσθησης μεταξύ των σφονδύλων) για κατακόρυφο φορτίο 4000 Kg για τις δύο περιπτώσεις διεπιφανειών που επιλέχθηκαν (χαλύβδινη ή μαρμαρίνη) και πόλο διαμέτρου 40mm. Οι μη-γραμμικές καμπύλες, που εμφανίζονται στα διαγράμματα H-δ, αντικατοπτρίζουν την συμπεριφορά των σφονδύλων για την περίπτωση της σύνθετης ολίσθησης με κεντρικό σύνδεσμο, που φέρει πόλο διαμέτρου 40mm. Αρχικά η φέρουσα ικανότητα επηρεάζεται από την παρουσία του πόλου, χωρίς την έναρξη της σύνθετης ολίσθησης. Στην συνέχεια γίνεται η έναρξη της σύνθετης ολίσθησης, που όσο αυξάνεται δημιουργεί πρόσθετα μη-γραμμικά φαινόμενα στην επιφάνεια σύνδεσης μεταξύ του πόλου και των εμπολίων (που προσομοιώνεται με ελατήρια που

αναπτύσσουν μονόπλευρη επαφή) καθώς και τοπικά σε περιοχές των εμπολίων που πλαστικοποιούνται. Η διαδικασία αυτή είναι κοινή και για τις δύο περιπτώσεις διεπιφάνειας (χαλύβδινη ή μαρμάρινη), με την διαφορά ότι τοπικές αστοχίες των εμπολίων δεν είναι τόσο εκτεταμένες στους μαρμαρίνους σφονδύλους. Η σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας των προσομοιώσεων οφείλεται στο ότι ο πόλος αυτός, λόγω της σχετικά μεγάλης διαμέτρου, συνεχίζει να συμπεριφέρεται ελαστικά. Η συνεισφορά λοιπόν του πόλου θεωρείται σημαντική αφού στην περίπτωση των μαρμαρίνων σφονδύλων αυξάνει την φέρουσα ικανότητα κατά 53%, ενώ στην περίπτωση των χαλύβδινων σφονδύλων η αύξηση είναι της τάξης του 275%.

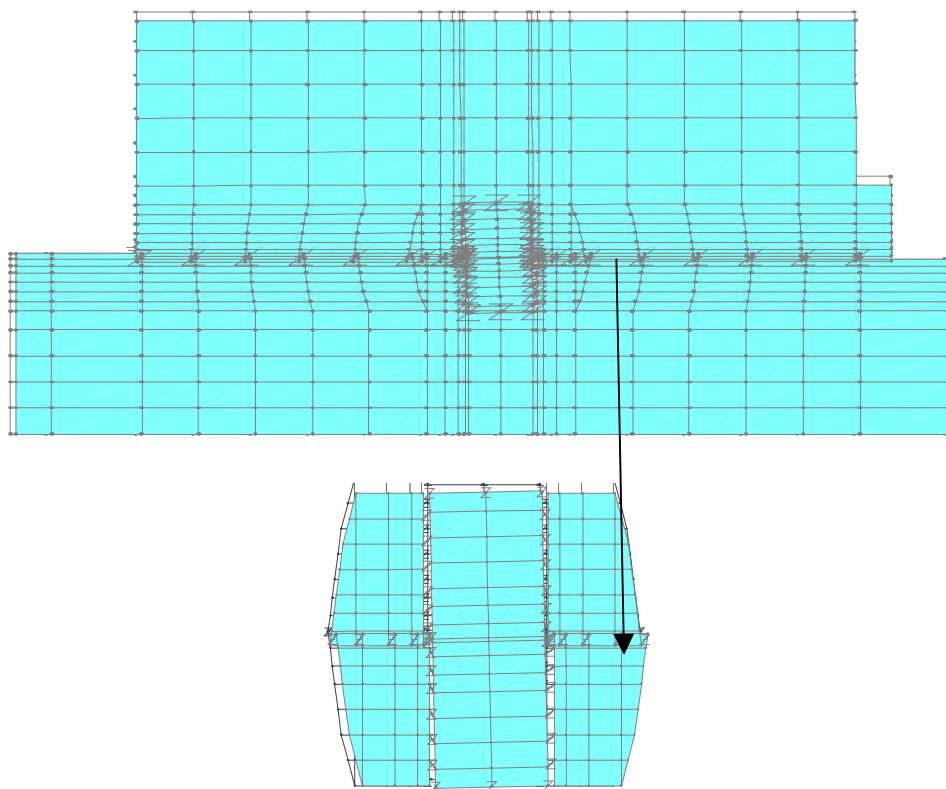


Σχήμα 7.11. Συγκριτικό διάγραμμα H-δ για σύνθετη ολίσθηση με πόλο 40mm και κατακόρυφο φορτίο 4000 Kg.

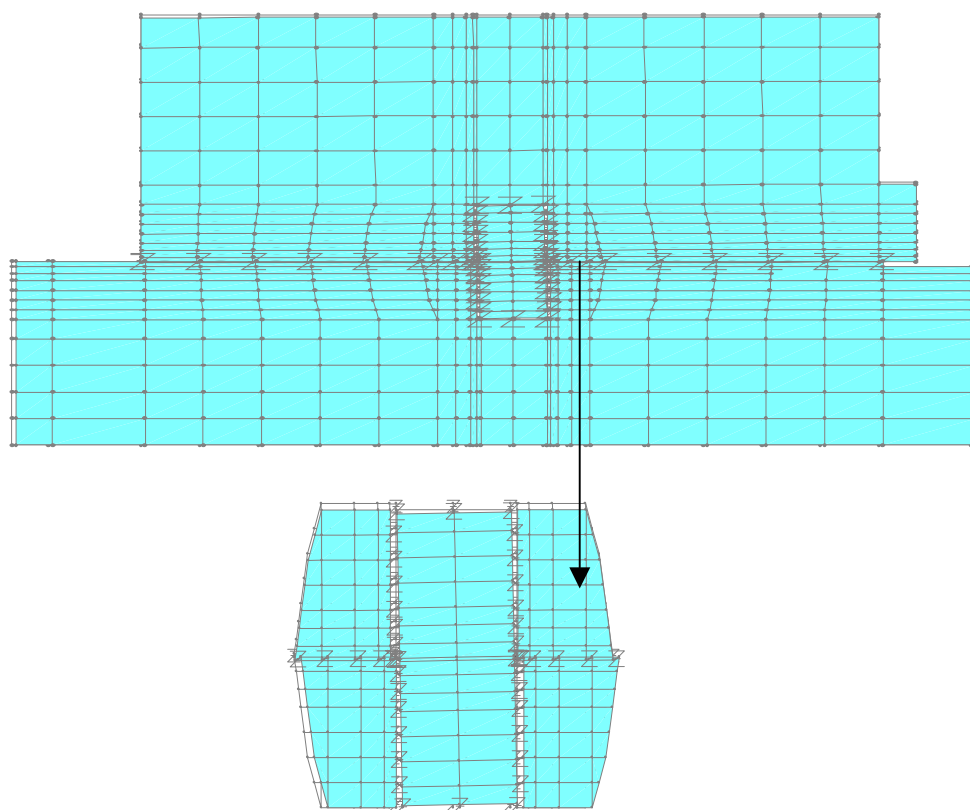
Στο σχήμα 7.12 παρουσιάζεται η εικόνα των παραμορφώσεων των προσομοιώσεων με χάλυβα-χάλυβα με πόλο 40mm για οριζόντια μετακίνηση 0.00124 m και έναρξη της μη-γραμμικής συμπεριφοράς.

Στο σχήμα 7.13 παρουσιάζεται η εικόνα των παραμορφώσεων των προσομοιώσεων με μάρμαρο-μάρμαρο με πόλο 40mm για οριζόντια μετακίνηση 0.0028 m και έναρξη της μη-γραμμικής συμπεριφοράς.

Ακολουθούν διαγράμματα κατακόρυφων ορθών, οριζοντίων ορθών και διατμητικών τάσεων για έναρξη της ολίσθησης καθώς και διατμητικών τάσεων όταν η ολίσθηση έχει ολοκληρωθεί ή κύριων τάσεων σ_{max} για έναρξη της ολίσθησης. Για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε οι αντίστοιχες εικόνες τάσεων τοποθετούνται παράλληλα για εύκολη σύγκριση. Η αύξηση της συνολικής φέρουσας ικανότητας σε οριζόντιο φορτίο οφείλεται στην αύξηση του αναλαμβανόμενου φορτίου από τον πόλο ο οποίος δεν αστοχεί (έναρξη πλαστικοποιήσεων) ακόμα και για υψηλά επίπεδα οριζόντιων φορτίσεων.



Σχήμα 7.12. Εικόνα παραμορφώσεων προσομοίωσης με χάλυβα-χάλυβα και πόλο διαμέτρου 40mm



Σχήμα 7.13. Εικόνα παραμορφώσεων προσομοίωσης με μάρμαρο-μάρμαρο και πόλο διαμέτρου 40mm

LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.100E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

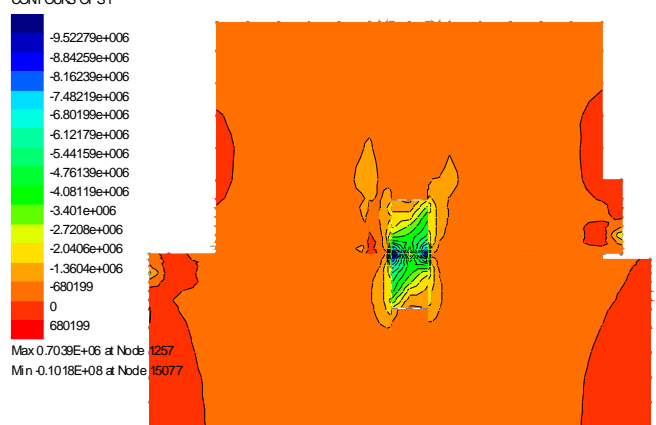
CONTOURS OF SY



Εικόνα 21. Κατακόρυφων ορθών τάσεων χάλυβα-χάλυβα, οριζόντια μετακίνηση 0.00124m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 6
Increment 6 Load Factor = 0.500E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

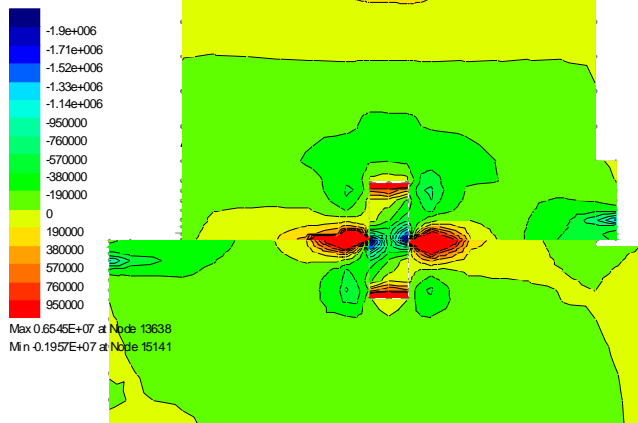
CONTOURS OF SY



Εικόνα 26. Κατακόρυφων ορθών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο, οριζόντια μετακίνηση 0.0028m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.100E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

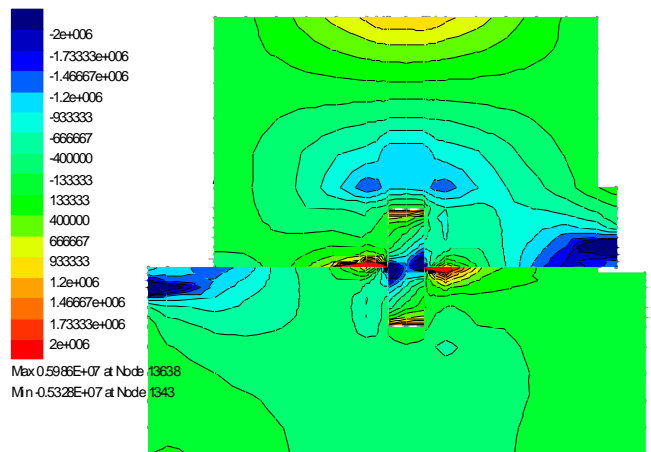
CONTOURS OF SX



Εικόνα 22. Οριζόντιων ορθών τάσεων χάλυβα-χάλυβα, οριζόντια μετακίνηση 0.00124 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 6
Increment 6 Load Factor = 0.500E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

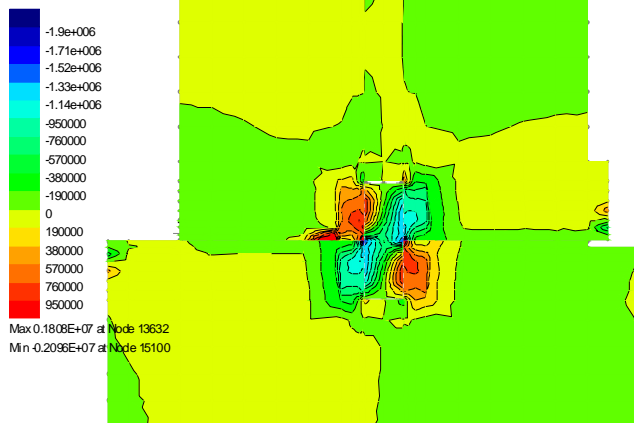
CONTOURS OF SX



Εικόνα 27. Οριζόντιων ορθών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο, οριζόντια μετακίνηση 0.0028 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφ.)

LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.100E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

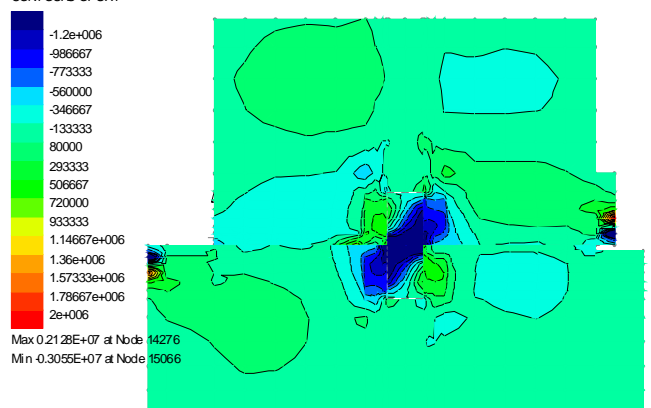
CONTOURS OF SXY



Εικόνα 23. Διατμητικών τάσεων χάλυβα-χάλυβα οριζόντια μετακίνηση 0.00124 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπ.)

LOADCASE = 6
Increment 6 Load Factor = 0.500E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

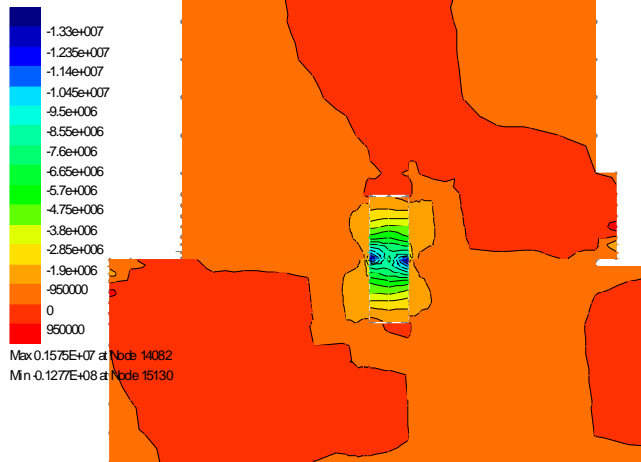
CONTOURS OF SXY



Εικόνα 28. Διατμητικών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο οριζόντια μετακίνηση 0.0028 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφ.)

LOADCASE = 27
Increment 27 Load Factor = 0.260E+02
RESULTS FILE = 0
STRESS

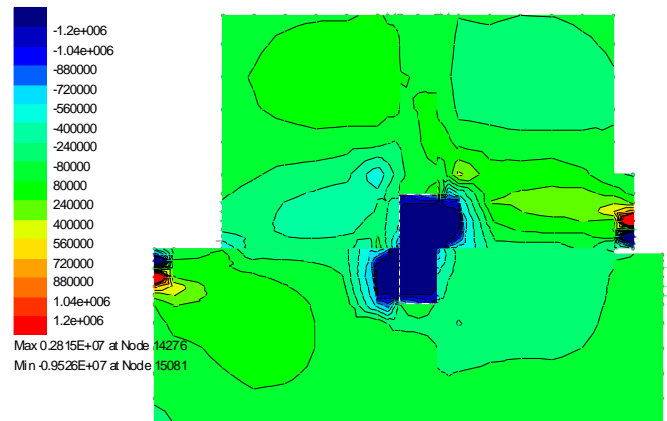
CONTOURS OF SXY



Εικόνα 24. Διατμητικών τάσεων χάλυβα-χάλυβα οριζόντια μετακίνηση 0.026 m (συνέχεια μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 27
Increment 27 Load Factor = 0.260E+02
RESULTS FILE = 0
STRESS

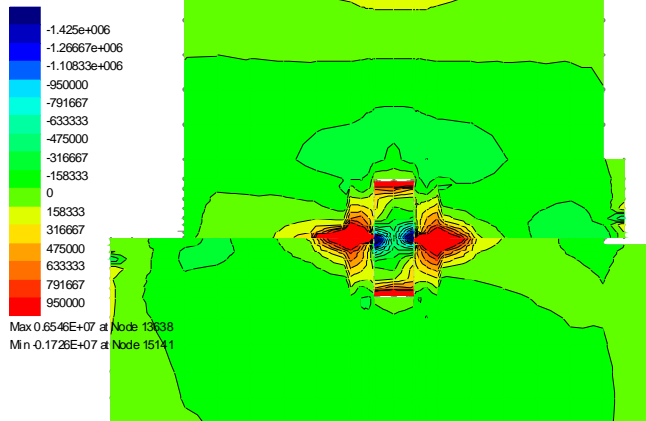
CONTOURS OF SXY



Εικόνα 29. Διατμητικών τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο οριζόντια μετακίνηση 0.040 m (συνέχεια μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 2
Increment 2 Load Factor = 0.100E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

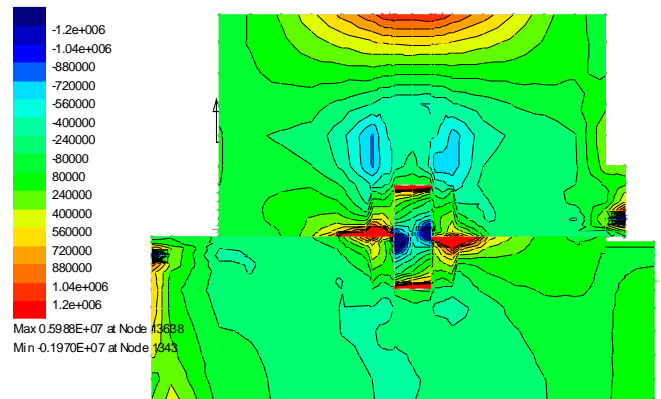
CONTOURS OF SMax



Εικόνα 25. Κύριων τάσεων χάλυβα-χάλυβα (σ_{max}) οριζόντια μετακίνηση 0.00124 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)

LOADCASE = 6
Increment 6 Load Factor = 0.500E+01
RESULTS FILE = 0
STRESS

CONTOURS OF SMax



Εικόνα 30. Κύριων τάσεων μάρμαρο-μάρμαρο (σ_{max}) οριζόντια μετακίνηση 0.0028 m (έναρξη μη-γραμμικής συμπεριφοράς)



7.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως έχει αναφερθεί, η παρούσα διερεύνηση δεν έχει σαν στόχο να αναπαραγάγει τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά να αναδείξει ποιοτικές διαφορές με την παρουσία διαφορετικών τρόπων σύνδεσης μεταξύ δύο επιφανειών. Πρόκειται λοιπόν για μία αριθμητική καθαρά διερεύνηση. Έτσι, στην παρούσα φάση της πειραματικής προσομοίωσης δεν γίνεται προσπάθεια να γίνει η ποσοτική προσέγγιση γνωστών πειραματικών αποτελεσμάτων. Αντίθετα, με βάση συγκεκριμένες παραδοχές, ως προς τις ιδιότητες των σφονδύλων και των συνδέσμων, γενικευμένου χαρακτήρα, γίνεται εδώ η προσπάθεια της ποιοτικής προσέγγισης της συμπεριφοράς που παρατηρήθηκε πειραματικά. Δηλαδή, αφενός ως προς την ολίσθηση που εμφανίζεται στην διεπιφάνεια των σφονδύλων που δεν έχουν συνδέσμους, αφετέρου στα σύνθετα φαινόμενα που συνοδεύουν την προσθήκη συνδέσμων.

Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν ανεμπόδιστη ολίσθηση μεταξύ των σωμάτων καθώς και σύνθετη ολίσθηση λόγω της παρουσίας κεντρικού συνδέσμου με διαφορετικών διαμέτρων πόλους. Η φέρουσα ικανότητα των προσομοιώσεων και η εξέλιξη της μη γραμμικής συμπεριφοράς είναι τα σημεία στα οποία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση.

Α) Όσο αφορά την φέρουσα ικανότητα των προσομοιώσεων που εξετάστηκαν για ανεμπόδιστη ολίσθηση παρατηρείται ότι το συνολικό οριζόντιο φορτίο που αναλαμβάνεται επηρεάζεται από το κατακόρυφο φορτίο. Όπως αναμένονταν, υψηλότερο κατακόρυφο φορτίο οδηγεί σε αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε οριζόντιο φορτίο με συνολική συμπεριφορά που απεικονίζει ικανοποιητικά το φαινόμενο της ολίσθησης. Επίσης, ελατήρια με γραμμικές και μη-γραμμικές ιδιότητες που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή τριβής οδηγούν και πάλι σε μεγαλύτερες τιμές της φέρουσας ικανότητας για την ανεμπόδιστη ολίσθηση των δύο σφονδύλων. Η συμπεριφορά είναι ελαστο-πλαστική στο σύνολο των περιπτώσεων και η ολίσθηση της διεπιφάνειας γίνεται απότομα και περιλαμβάνει το σύνολο των ελατηρίων της διεπιφάνειας.

Β) Στην περίπτωση της σύνθετης ολίσθησης εξετάστηκε κεντρικός σύνδεσμος με δύο περιπτώσεις η μία με παρουσία πόλου ανάμεσα στις δύο ολίσθησες επιφάνειες διαμέτρου 10 mm και η άλλη με παρουσία πόλου διαμέτρου 40mm. Παρατηρείται ότι η συνολική συμπεριφορά επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία συνδέσμου. Η επιρροή του συνδέσμου στη φέρουσα ικανότητα είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερος είναι ο πόλος του συνδέσμου, συμπέρασμα που συμφωνεί με τις πειραματικές παρατηρήσεις. Η παραμετρική μελέτη στην περίπτωση της αριθμητικής ανάλυσης περιορίστηκε στην διάμετρο του πόλου και δεν επεκτάθηκε στην μεταβολή του υλικού των εμπολίων.

Γ) Πόλοι μικρών διαμέτρων αναπτύσσουν περιοχές πλαστικοποίησης που υποδηλώνουν αστοχία, όπως επίσης παρατηρήθηκε στην πειραματική ακολουθία, σε αντίθεση με πόλους μεγάλων διαμέτρων.

Δ) Ο κεντρικός σύνδεσμος συνεισφέρει στη συνολική φέρουσα ικανότητα σε μεγαλύτερο ποσοστό όταν ο συντελεστής τριβής στην διεπιφάνεια έχει σχετικά μικρές τιμές παρά όταν ο συντελεστής αυτός αυξάνεται σημαντικά, που και πάλι συμφωνεί με τις πειραματικές παρατηρήσεις.

Με βάση τα ανωτέρω η αριθμητική διερεύνηση που ακολουθήθηκε έχει όλα τα στοιχεία της ποιοτικής αξιοπιστίας στην προσέγγιση του σύνθετου φαινομένου που μελετάται ώστε να αποτελέσει την βάση για επέκταση της εφαρμογής της σε συνθετότερα δομικά συστήματα. Προς τον σκοπό αυτό απαιτείται περαιτέρω αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της πειραματικής ακολουθίας.