

*ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΜΑΝ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΠΗΝΕΙΟΥ ΗΛΕΙΑΣ*

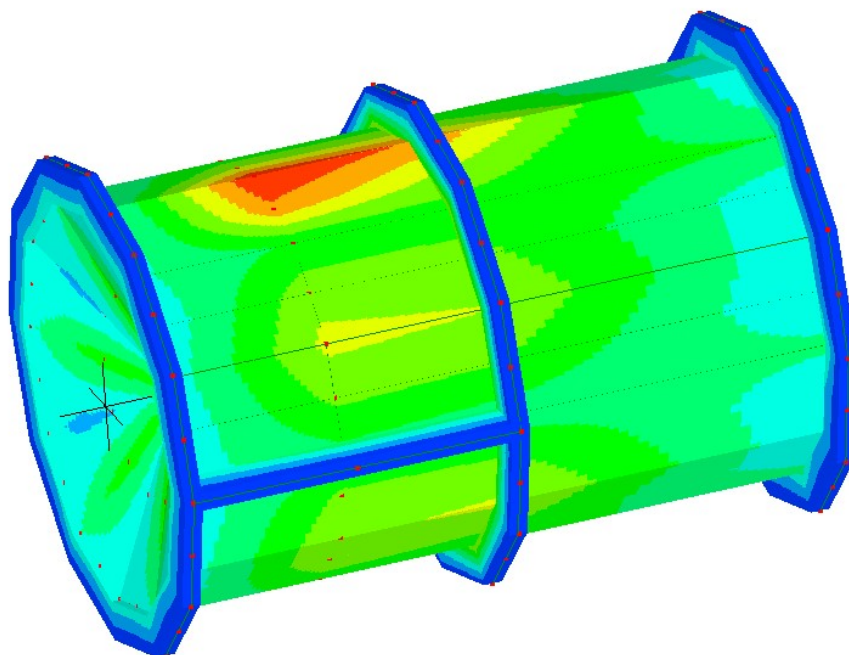
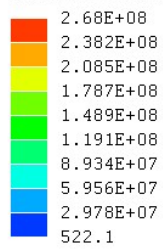
---

Ανάλυση-Διερεύνηση Βαλβίδας

---

# ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΜΑΝ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΠΗΝΕΙΟΥ ΗΛΕΙΑΣ

von Mises Stress, Bottom Surface



ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ  
undergraduate PhD student in engineering Atlantic University U.S.A.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα μελέτη “έλεγχος τερματικής βαλβίδας MAN” έχει σκοπό την ανάλυση της συμπεριφοράς της υπάρχουσας βαλβίδας με μαθηματική μοντελοποίηση, αλλά και την αποσαφήνιση των χαρακτηριστικών της κάτι που θα φανεί σίγουρα χρήσιμο στο μέλλον.

Η βαλβίδα αυτή είναι τύπου σταθερού κώνου (fixed cone valve) και είναι μια από τις μεγαλύτερες βαλβίδες αυτού του είδους ανά τον κόσμο. Στην εργολαβία που βρίσκεται σε εξέλιξη και αφορά την «Επισκευή –αποκατάσταση λειτουργίας ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού φράγματος Πηνειού Π.Ε. Ηλείας» προβλεπόταν η αντικατάστασή της με νέα, λόγω των μεγάλων προβλημάτων λειτουργίας που παρουσίαζε. Το άνοιγμα-κλείσιμο γινόταν με μεγάλη δυσκολία χειροκίνητα, καθώς ο ηλεκτρικός ενεργοποιητής ήταν κατεστραμμένος, ενώ η συνεχής διαρροή των 0,5 m<sup>3</sup>/sec εμπόδιζε την εκκένωση της λεκάνης ηρεμίας και απέκλειε οποιοδήποτε έλεγχο και συντήρηση της. Η νέα βαλβίδα θα ήταν σύμφωνα με τη μελέτη αντοχής 10 ατμοσφαιρών, βάρους 7τόνων και παροχής 25m<sup>3</sup>/sec. Η λίμνη έχει μέγιστο βάθος 35 μέτρα. Το υδροστατικό ύψος στη θέση της βαλβίδας είναι 40 μέτρα, οπότε η αναπτυσσόμενη υδροστατική πίεση είναι ίση με 4 ατμόσφαιρες.

Μετά την αποκατάσταση λειτουργίας του επιπέδου ροϋφράχτη του πύργου υδροληψίας, κατέστη δυνατή η εκκένωση της λεκάνης ηρεμίας και έγινε επιτρεπτός ο επιτόπου έλεγχος της τερματικής βαλβίδας. Η επιτόπου προσεκτική εξέταση και καταμέτρηση των χαρακτηριστικών της, έδειξε ότι πρόκειται για κατασκευή ιδιαίτερης στιβαρότητας με βάρος αντοχή και παροχή πολύ ανώτερα των αντίστοιχων της προβλεπόμενης νέας βαλβίδας. Κατόπιν τούτου δημιουργήθηκαν ερωτηματικά ως προς την ορθότητα των χαρακτηριστικών της νέας βαλβίδας. Για την αποσαφήνιση των ερωτηματικών αυτών συντάχθηκε η παρούσα μελέτη.

<p><b>[1] Υλικά</b></p> <p>Σκυρόδεμα C16/20  Χάλυβας οπλισμού stiii  Κατηγορία έκθεσης [XC3]  Δομικός χάλυβας S235  Χάλυβας αντοχής στη διάβρωση A4</p> <p><b>[2] Μόνιμα φορτία</b></p> <p>Ειδικό βάρος σκυροδέματος 25.0 kN/m<sup>3</sup>  Ειδικό βάρος χάλυβα 78.5 kN/m<sup>3</sup>  Ειδικό βάρος γαιών 20.0 kN/m<sup>3</sup></p>	<p><b>[5] Στοιχεία αντισεισμικού σχεδιασμού</b></p> <p>Εθνικό προσάρτημα GR(Ελλάς)  Κατηγορία πλαστιμότητας ΚΠΜ Σεισμική  ζώνη Z2 <math>a_{gR} = 0,240</math>  Κατακόρυφη συνιστώσα ΟΧΙ  Τύπος φάσματος Σχεδιασμού 1  Εδαφικός τύπος B S = 1,35  Ιδιοπερίοδοι <math>T_B=0,15</math> <math>T_C=0,80</math> <math>T_D=2,50</math>  φάσματος  Συντ. απόσβεσης <math>\xi=5,00\%</math>  Συντελεστής τοπογραφίας <math>S_T = 1,00</math></p> <p><b>[5.1] Συντελεστής συμπεριφοράς</b></p> <p>Συντ. σεισμικής συμπεριφοράς οριζ. <math>a_{\chi}=1,00</math> <math>a_Z=1,00</math>  Συντ. σεισμικής συμπεριφοράς κατακόρυφα <math>a_{\nu}=1,00</math>  Βασική τιμή συντ. συμπεριφοράς <math>a_{0\chi}=1,00</math> <math>a_{0Z}=1,00</math>  Αντισεισμική Ανάλυση Δυναμική με Μ.Μαζών</p>
<p><b>[3] Συντελεστές ασφαλείας φορτίων-υλικών</b></p> <p>Μόνιμα φορτία <math>\gamma_G=1,35</math>  Μεταβλητά φορτία <math>\gamma_Q=1,50</math>  Σκυροδέματος <math>\gamma_C=1,50</math>  Συντελεστής θλιπτικής αντοχής <math>a_{cc}=0,85</math>  Χάλυβα οπλισμού <math>\gamma_S=1,15</math>  Δομικός χάλυβας <math>\gamma_{M0}=1,00</math> <math>\gamma_{M1}=1,00</math> <math>\gamma_{M2}=1,25</math>  Συντ. υπεραντοχής δομικού χάλυβα <math>\gamma_{ov}=1,25</math>  Συνδυασμοί EC0 (6.10a)+(6.10b) <math>\xi=0,85</math></p>	<p><b>[6] Πρότυπα κ' Εθνικά προσάρτηματα (ΕΛΟΤ)</b></p> <p>Βάσεις σχεδιασμού EN1990 2002  Δράσεις στους φορείς EN1991-1 2002  Κανονισμός Σκυροδέματος EN1992-1 2004  Κανονισμός κατασκευών από Χάλυβα EN1993-1 2006  Κανονισμός κατασκευών από τοιχοποιία EN1996-1 2006  Γεωτεχνικός Σχεδιασμός EN1997-1 2004  Αντισεισμικός Κανονισμός EN1998-1,5 2004</p>
<p><b>[4] Έδαφος</b></p> <p>Μέθοδος υπολογισμού Απλοποιημένη μεθ.  Επιτρεπόμενη τάση <math>\sigma_{επ}=100,00</math> kN/m<sup>2</sup>  Γωνία τριβής στη βάση θεμελίου <math>\delta=25,00[^\circ]</math></p>	

- **Υλικά - Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων**

- **Αντοχές υλικών**

Για υφιστάμενα υλικά λαμβάνονται οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών των υλικών όπως αυτές προσδιορίζονται από δοκιμές. Για νέα ή προστιθέμενα υλικά οι υπολογισμοί βασίζονται στις χαρακτηριστικές τιμές των υλικών που προδιαγράφονται στην μελέτη. Βλ. EC8-3 §2.2.1 και ΚΑΝ.ΕΠΕ. παράρτημα 4.1 και 9Α.

- **Επίπεδο Γνώσης (ή Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων Σ.Α.Δ.)**

Προσδιορίζεται το Επίπεδο Γνώσης ή αλλιώς η Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων των υλικών και της γεωμετρίας του φορέα σύμφωνα με EC8-3 §3.3 ή ΚΑΝ.ΕΠΕ. §3.6. Η Σ.Α.Δ. καθορίζει την τιμή του συντελεστή εμπιστοσύνης  $C_F$  για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα, καθώς και τους αντίστοιχους συντελεστές ασφαλείας  $\gamma_c$  και  $\gamma_s$  βάσει EC8-3 §3.3.1(4) και §2.2.1(7)Α.

## **ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**

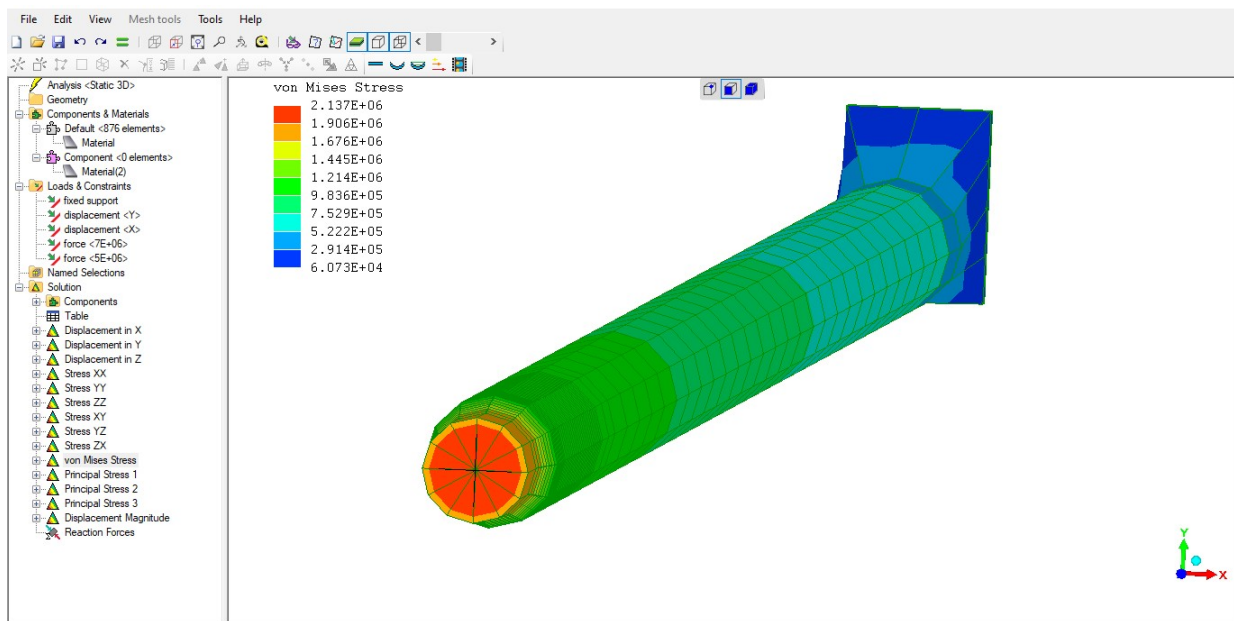
Στους Ευρωκώδικες υπάρχουν δύο είδη διατάξεων: Αυτές που αφορούν σε Αρχές και αυτές που αφορούν σε Κανόνες Εφαρμογής. Οι Αρχές (Principles) αφορούν σε γενικές διατυπώσεις, ορισμούς, απαιτήσεις και αναλυτικά προσομοιώματα, για τα οποία δεν υπάρχει εναλλακτική επιλογή, εκτός εάν ρητά αναφέρεται διαφορετικά. Οι διατάξεις που αφορούν σε αρχές χαρακτηρίζονται από το γράμμα “P” που ακολουθεί τον αριθμό της παραγράφου. Οι Αρχές καθορίζουν τη φιλοσοφία σχεδιασμού και είναι υποχρεωτική η εφαρμογή τους. Αντίθετα, οι Κανόνες Εφαρμογής είναι γενικά αναγνωρισμένοι κανόνες που ικανοποιούν τις απαιτήσεις των Αρχών. Επιτρέπεται η χρήση εναλλακτικών κανόνων σχεδιασμού, διαφορετικών από αυτούς που δίνονται στους Ευρωκώδικες, αλλά θα πρέπει να αποδεικνύεται ότι συμφωνούν με τις Αρχές και εξασφαλίζουν ισοδύναμη ασφάλεια, λειτουργικότητα και ανθεκτικότητα με τους Ευρωκώδικες. Ο σχεδιασμός μιας κατασκευής σύμφωνα με τους Κανόνες Εφαρμογής που προτείνονται στους Ευρωκώδικες εξασφαλίζει αυτόματα (τουλάχιστον τυπικά), την ικανοποίηση των Αρχών. Θεωρητικά θα μπορούσε να εφαρμοστεί και διαφορετικός σχεδιασμός. Σε μια τέτοια περίπτωση ο μελετητής πρέπει να αποδείξει ότι ικανοποιούνται όλες οι Αρχές, για τις οποίες χρησιμοποιούνται διαφορετικοί Κανόνες Εφαρμογής από αυτούς που προτείνονται. Επιπρόσθετα πρέπει να αποδειχθεί ότι δεν επηρεάζεται δυσμενώς η ασφάλεια, η λειτουργικότητα και η ανθεκτικότητα της κατασκευής.

# ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

## Διακριτοποίηση

Για το στάδιο της αποτίμησης χρησιμοποιήθηκε χωρικό προσομοίωμα.

Για την προσομοίωση των δομικών μελών χρησιμοποιήθηκε μέθοδος μαθηματικής ανάλυσης με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία (πρισματικά).



Μοντέλο του υπό μελέτη αγωγού με πρισματικά πεπερασμένα στοιχεία (είναι μοντελοποιημένο και το νερό του αγωγού).

## Συνδυασμοί δράσεων

Στα πλαίσια των αναλύσεων λαμβάνονται υπόψη τόσο ο μη-σεισμικός όσο και οι σεισμικοί συνδυασμοί δράσεων.

Οι συνδυασμοί αυτοί των δράσεων είναι οι εξής:

- Μη σεισμικός συνδυασμός.
- Σεισμικοί συνδυασμοί.

## ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ- ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ο EC8 προδιαγράφει πέντε κατηγορίες εδάφους A, B, C, D και E ανάλογα με τη στρωματογραφία και τις παραμέτρους που περιγράφονται παρακάτω.

Κατάταξη εδαφών				
Κατηγορίες εδαφών	Περιγραφή στρωματογραφίας	Παράμετροι		
		V <sub>S,30</sub>	N <sub>SPT</sub>	C <sub>u</sub> (kPa)
A	Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός που περιλαμβάνει το πολύ 5 m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού	>800	-	-
B	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος	360-800	>50	>250
C	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων	180-360	15-50	70-250
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά	<180	<15	<70
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα ύψους με τιμές v <sub>S</sub> κατηγορίας C ή D και πάχος που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5 m και 20 m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με v <sub>S</sub> > 800 m/s			
S1	Αποθέσεις που αποτελούνται ή που περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 m μαλακών αργίλων/ιλών με υψηλό δείκτη πλαστικότητας (PI > 40) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό	<100 (ενδεικτικό)	-	10-20



S2	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων, ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A – E ή S1			
----	---	--	--	--

Η μέθοδος ανάλυσης που θα ακολουθηθεί περιλαμβάνει πλήρη ιδιομορφική ανάλυση του συστήματος, υπολογισμό της μέγιστης σεισμικής απόκρισης για κάθε ιδιομορφή ταλάντωσης και επαλληλία των μέγιστων ιδιομορφικών αποκρίσεων.

### **ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ – ΕΔΑΦΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ**

Η σεισμική δράση σε κάθε ζώνη χαρακτηρίζεται από την επιτάχυνση του εδάφους  $a_{gR}$ , η οποία αντιστοιχεί σε έδαφος κατηγορίας A.

Σύμφωνα με το εθνικό προσάρτημα υπάρχουν 3 ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας οι Z1,Z2,Z3 με αντίστοιχους συντελεστές σεισμικής επιτάχυνσης (με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια, δηλαδή με περίοδο επανάληψης του γεγονότος τα 475 έτη) τους 0,16g, 0,24g, 0,36g.

Η περίοδος επανάληψης των 475 ετών με βάση την οποία έχει κατασκευαστεί ο χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας του εθνικού προσαρτήματος του EC8, είναι μικρή για τέτοιας σπουδαιότητας έργα. Η σπουδαιότητα δεν σχετίζεται μόνο με τη δυνατότητα του έργου να λειτουργεί μετά από σεισμική διέγερση, αλλά με βάση τον αμερικάνικο κανονισμό FEMA, για τη περίπτωση φραγμάτων, και με τις επιπτώσεις που θα έχει στις κατάντη περιοχές. Το φράγμα του Πηνειού Ηλείας με ύψος 50 μέτρων και χωρητικότητα λίμνης 420 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, αποτελεί ένα σημαντικό φράγμα. Για τον λόγο αυτό πρέπει να επιλεγεί κατάλληλος για την περιοχή συντελεστής εδαφικής σεισμικής επιτάχυνσης. Με βάση μελέτη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για το φράγμα Πείρου- Παραπείρου, (εξίσου σημαντικό έργο σε γειτονική περιοχή) επιλέχθηκε συντελεστής εδαφικής σεισμικής επιτάχυνσης ίσος με 0,39g έπειτα από συνεργασία με το ΙΤΣΑΚ, για περίοδο επανάληψης γεγονότος τα 1000 έτη (πιθανότητα υπέρβασης 5% στα 50 χρόνια).

Αξίζει να σημειωθεί, ότι με βάση τον αμερικάνικο κανονισμό FEMA, ένα φράγμα τέτοιας σπουδαιότητας αν σχεδιαζόταν σήμερα, θα είχε πρόβλεψη για εκκένωση του 90% της χωρητικότητας για στάθμη ταμιευτήρα +85,80(κατώφλι εκροής τοξωτού θυροφράγματος) εντός δεκατεσσάρων ημερών. Αυτό αντιστοιχεί σε βαλβίδα με δυνατότητα παροχέτευσης 330m<sup>3</sup>/sec. Αυτό είναι αδύνατον, λόγω του πεπερασμένου των διαστάσεων του αγωγού προσαγωγής. Η λογική είναι να υπάρχει η δυνατότητα ταχείας μείωσης της στάθμης του ταμιευτήρα σε κατάσταση emergency, όπως π.χ. μετά από έναν πολύ ισχυρό σεισμό που δεν είναι βέβαιο ότι ήταν ο κύριος. Αν υπάρχει υπόνοια ότι θα ακολουθήσει θεομηνία, είναι φρόνιμο να ελαττωθεί η

στάθμη της λίμνης, για να ελαττωθούν οι δυνάμεις καταπόνησης του όλου συγκροτήματος, αλλά και για να αυξηθεί η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της στέψης του φράγματος και της επιφάνειας του ταμιευτήρα, σε μία προσπάθεια να αποφευχθεί η υπερπήδηση της στέψης από ενδεχόμενο τσουνάμι.

Η υφιστάμενη βαλβίδα του αγωγού προσαγωγής, έχει δυνατότητα εκκένωσης του 90% της ποσότητας που περιέχει ο ταμιευτήρας κάτω από τη στάθμη +85,80, σε διάστημα 57 ημερών. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διατομή όπως και το φάρδος έδρασης του φράγματος Πηνειού, αυξάνεται σημαντικά κάτω της στάθμης +82,00. Αυτό αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα ασφαλείας.

## **ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑΣ**

Υπάρχουν 4 κατηγορίες σπουδαιότητας. Η υψηλότερη είναι η τέταρτη, στην οποία κατατάσσονται τα κτίρια και γενικά υποδομές που είναι σημαντικές για τη ζωή των κατοίκων, πχ σταθμοί παραγωγής ενέργειας. Για το συγκεκριμένο έργο ελήφθη υπόψη αυτή η κατηγορία, καθώς είναι έργο μεγάλης σπουδαιότητας και πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί χωρίς προβλήματα μετά από σεισμική διέγερση, δεδομένου ότι καλύπτει τις αρδευτικές ανάγκες του κάμπου της Ηλείας, αλλά και τις ανάγκες ύδρευσης της πόλης της Αμαλιάδας και αρκετών γύρω πόλεων. Επιπρόσθετα, μια αστοχία του θα έθετε σε κίνδυνο τις ζωές χιλιάδων κατοίκων της κατάντη περιοχής, καταστρέφοντας συγχρόνως χιλιάδες στρέματα καλλιεργειών.

## **ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑΣ γι**

Η τιμή του συντελεστή που αντιστοιχεί στην κατηγορία σπουδαιότητας 4 είναι 1,4.

Αυτός ο συντελεστής θα ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της φασματικής επιτάχυνσης, με την οποία θα μελετηθεί ο αγωγός και η βαλβίδα του φράγματος.

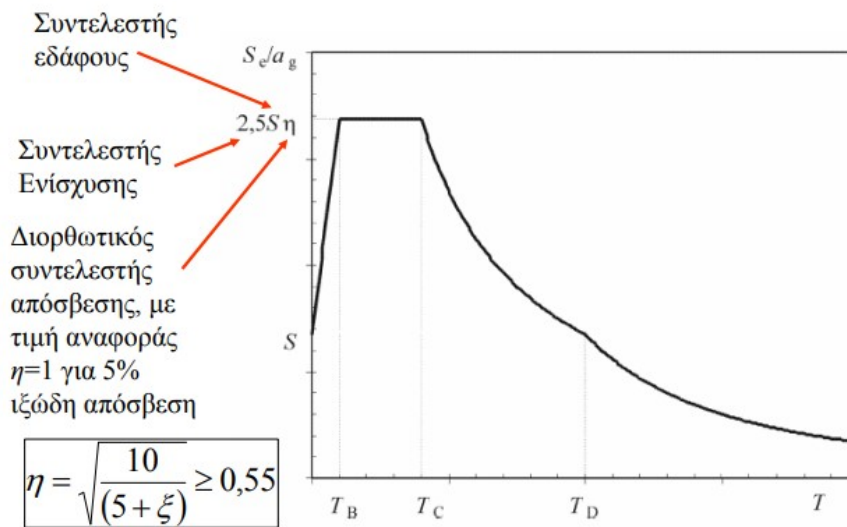
## **ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ**

Η σεισμική κίνηση που λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό των σεισμικών δράσεων, ορίζεται από ελαστικά φάσματα απόκρισης (elastic response spectra).

Με τέτοιου είδους φάσματα, μελετάμε κατασκευές που θέλουμε να συμπεριφερθούν ελαστικά στον σεισμό σχεδιασμού. Για το συγκεκριμένο έργο, αυτό αποτελεί σημαντική προϋπόθεση. Τούτο διότι αφενός μεν πρέπει να παραληφθούν τα φορτία σχεδιασμού χωρίς αστοχίες, αφετέρου δε η φύση του προβλήματος στο συγκεκριμένο τμήμα του (αγωγός προσαγωγής και τερματική βαλβίδα ελέγχου εκροής) είναι τέτοια, που δεν μπορεί να γίνει παραδοχή πλαστικής συμπεριφοράς, δεδομένου ότι το νερό που θα μοντελοποιηθεί και αναλυθεί ακολούθως με

πρισματικά-χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, είναι ελαστικό μέσον και δεν μπορεί να απορροφήσει ενέργεια μέσω πλαστικής συμπεριφοράς.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι για κατασκευές με μεγάλη σπουδαιότητα  $\gamma_i > 1$ , πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τοπογραφικός συντελεστής ενίσχυσης. Στο συγκεκριμένο έργο δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής αυτός, καθώς εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (τοπογραφική ενίσχυση συμβαίνει ιδιαίτερα σε περιπτώσεις άκρων πρανών και κορυφών λόφων ύψους μεγαλύτερου των 30m).



Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε το φάσμα απόκρισης του EC8.

## ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Εφαρμόζοντας το ελαστικό φάσμα απόκρισης για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής φόρτισης, η ελαστική επιτάχυνση σχεδιασμού σε κάθε περιοχή υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B \quad \begin{array}{l} \text{Σχέσεις (3.2)} \\ \text{έως (3.5) ΕΚ8} \end{array}$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec}$$

Όπου:

$$a_g = \gamma_i \cdot a_{gR}$$

S = συντελεστής εδάφους (βλ. παρακάτω)

$\eta$  = συντελεστής απόσβεσης. Για  $\xi=5\%$  τίθεται  $\eta=1$ , δηλαδή οι παραπάνω σχέσεις αντιστοιχούν σε απόσβεση  $\xi=5\%$ . Για διαφορετικές τιμές απόσβεσης, η τιμή του  $\eta$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta = (10 / (5 + \xi))^{0,5} \geq 0,55 \quad \text{Σχέση 3.6 EC8}$$

Ο EC8 προβλέπει δυο τύπους ελαστικού φάσματος σχεδιασμού, τον 1 και τον 2, για τους οποίους αντιστοιχούν διαφορετικές τιμές για τις χαρακτηριστικές περιόδους  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  και για τον συντελεστή S. Για την Ελλάδα έχει επιλεγθεί ο τύπος 1. Οι χαρακτηριστικές τιμές για τον τύπο 1 παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Κατηγορία εδάφους	S	$T_B$ (sec)	$T_C$ (sec)	$T_D$ (sec)
A	1.00	0.15	0.4	2.5
B	1.20	0.15	0.5	2.5
C	1.15	0.2	0.6	2.5
D	1.35	0.2	0.8	2.5
E	1.40	0.15	0.5	2.5

Με βάση τα παραπάνω και με δεδομένο ότι, όπως ήδη αναφέρθηκε, ο φορέας πρέπει να συμπεριφερθεί ελαστικά, κατασκευάστηκε το ελαστικό φάσμα απόκρισης και συνεχίζεται περαιτέρω ανάλυση. Το ελαστικό φάσμα απόκρισης είναι του EC8.

## **ΕΛΕΓΧΟΙ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΚΑΙ ΒΑΛΒΙΔΑΣ MAN**

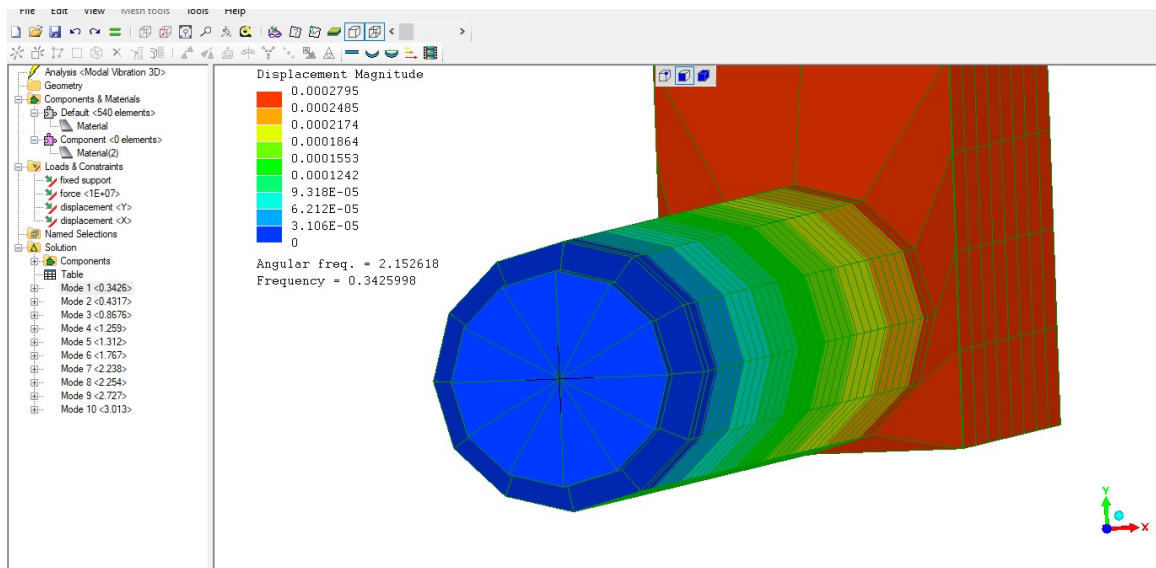
Όπως ήδη αναφέρθηκε, για την εν λόγω μελέτη-ανάλυση επιλέχθηκε η μοντελοποίηση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι πολλά, με κυριότερο την υψηλή ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος αυτή παράγει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας, καθώς χρησιμοποιούνται βασικά πεπερασμένα στοιχεία και υπάρχουν κόμβοι σε όλη τη μάζα του μοντέλου. Αυτό δίνει υψηλή ακρίβεια δεδομένων σε κάθε θέση-σημείο του μοντέλου, καθώς υπάρχουν πολλοί κόμβοι σε όλη τη μάζα και το υλικό επιλύεται με όρους τάσεων.

Είναι η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, στο αποτέλεσμα των οποίων ασκεί επιρροή η τρισδιάστατη μορφή του μοντέλου-φορέα, όπως στη περίπτωση του αγωγού προσαγωγής του φράγματος Πηνειού Ηλείας.

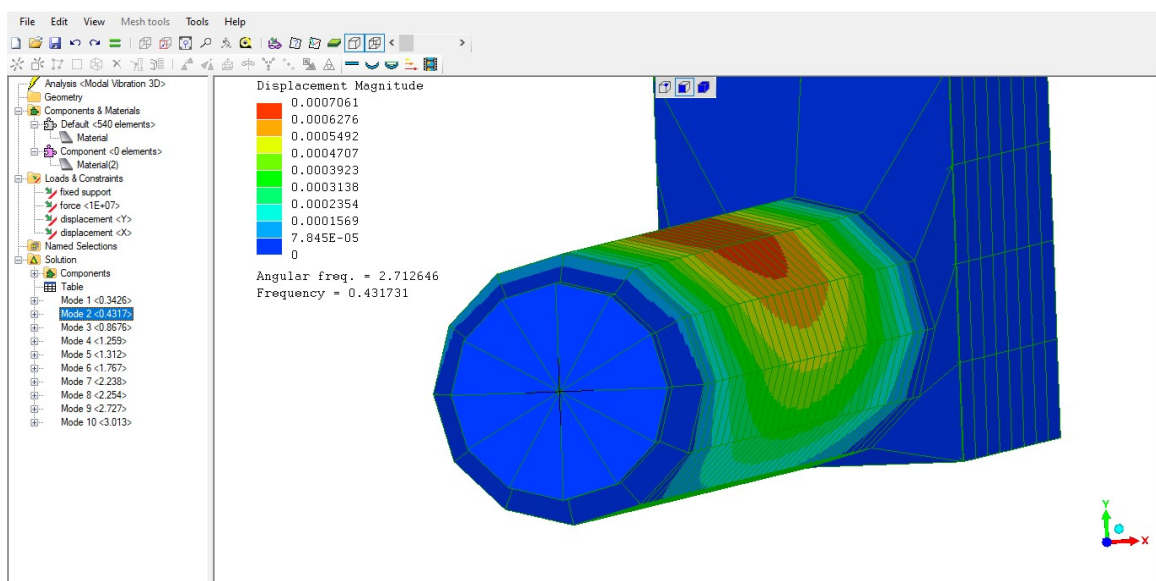
Για τη μοντελοποίηση και επίλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα μαθηματικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων LISA. Είναι ένα πρόγραμμα Καναδικής προέλευσης. Δημιουργός του είναι ο Αγγλικής καταγωγής καθηγητής Karl. Το πρόγραμμα έχει χρησιμοποιηθεί από πολλά πανεπιστήμια ανά τον κόσμο σε μελέτες έρευνας και ανάπτυξης, καθώς επίσης και από ιδιωτικές εταιρείες μελετών και κατασκευών. Χρησιμοποιήθηκε επίσης και από τον διάσημο Άγγλο μηχανικό και σχεδιαστή αεροσκαφών της ROLSS ROYCE Paul Martin, για την σχεδίαση του ειδικού υπερηχητικού οχήματος εδάφους Aussie Invader.

## MODAL ANALYSIS

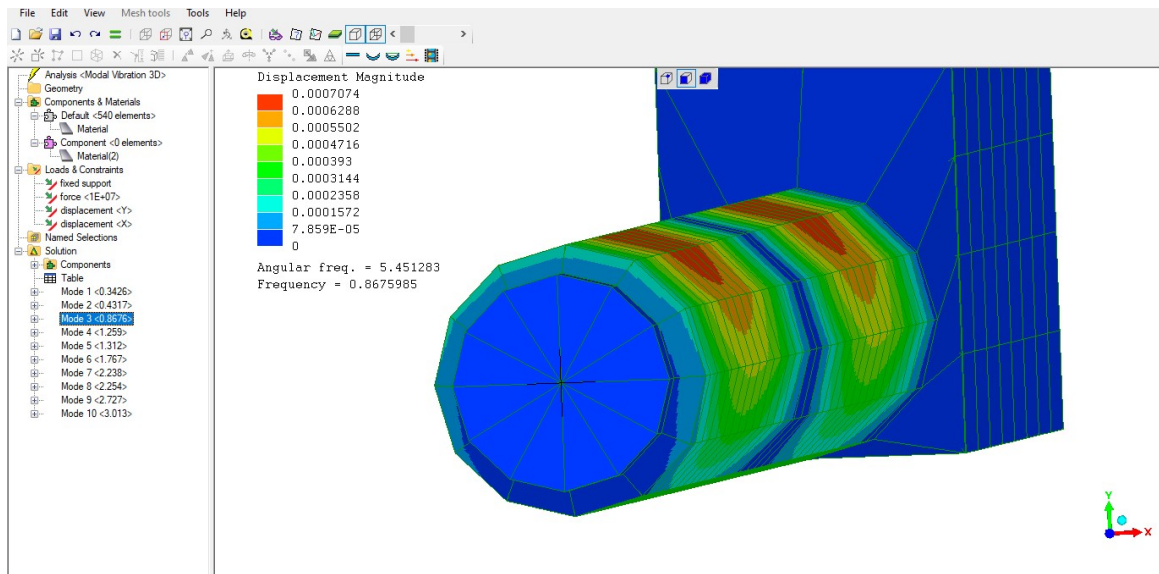
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της modal analysis για τις πρώτες 10 ιδιομορφές του μοντέλου. Κατά την ανάλυση τηρήθηκε η συνθήκη ποσοστού μάζας συμμετοχής άνω του 90%, και η συνθήκη συμμετοχής μάζας ιδιομορφής σε ποσοστό άνω του 5%. Κατόπιν αυτού πραγματοποιήθηκε η παραγωγή τάσεων σεισμού. Το νερό είναι μοντελοποιημένο με πεπερασμένα στοιχεία και στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η συμπεριφορά του ανάλογα με την ιδιομορφή.



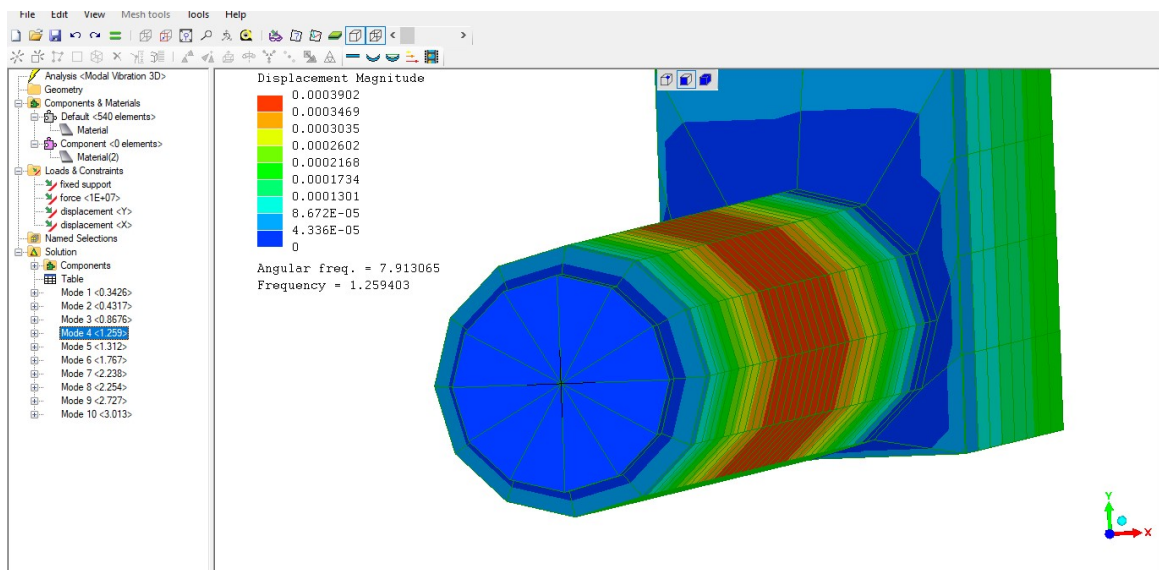
1<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου



2<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου

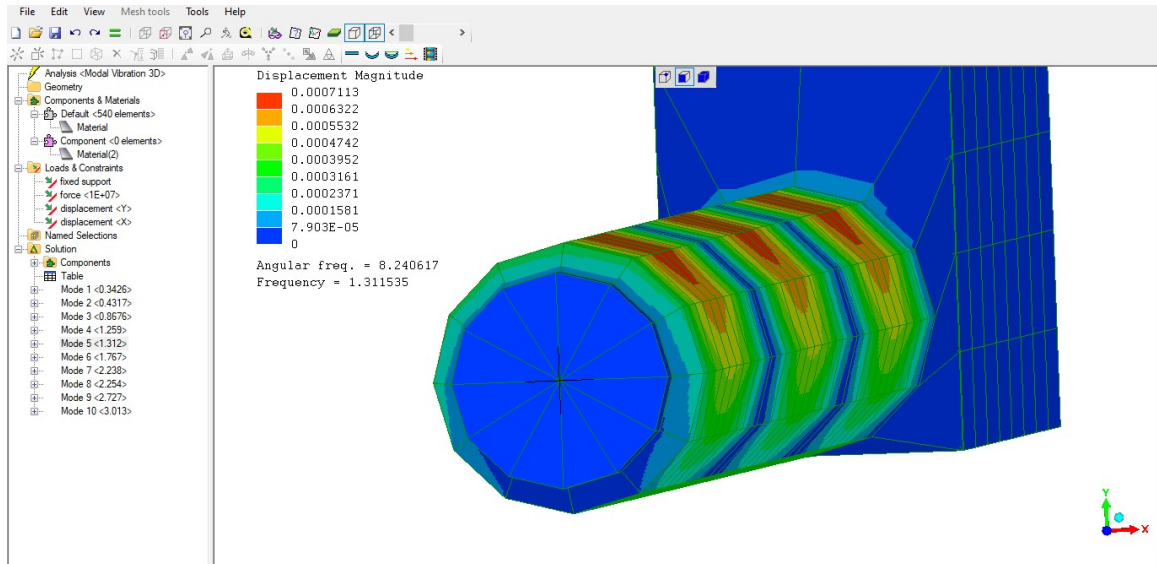


3<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου

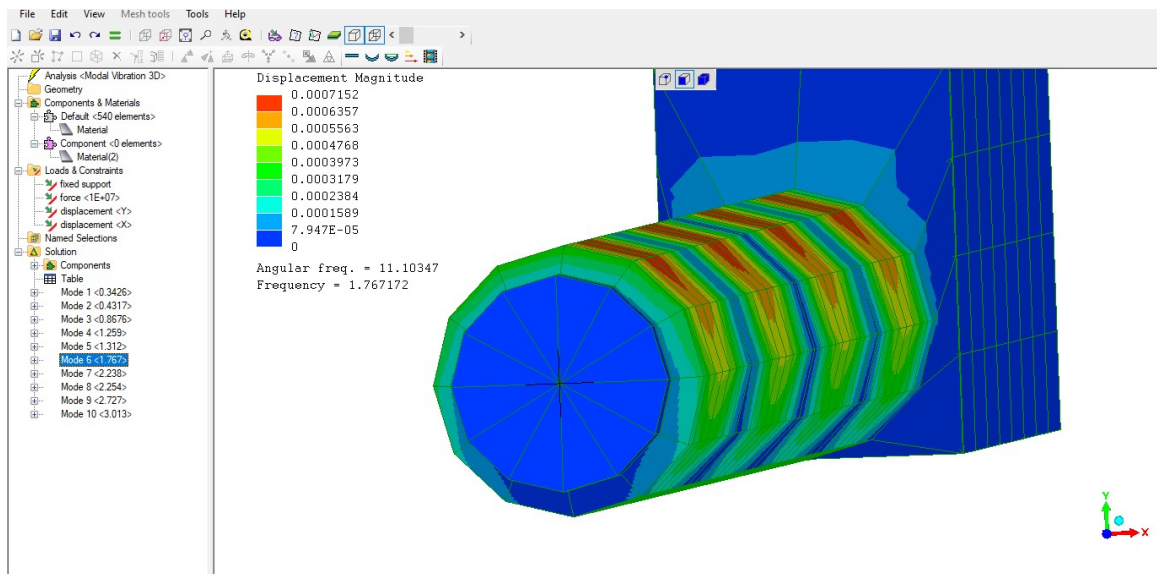


4<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου



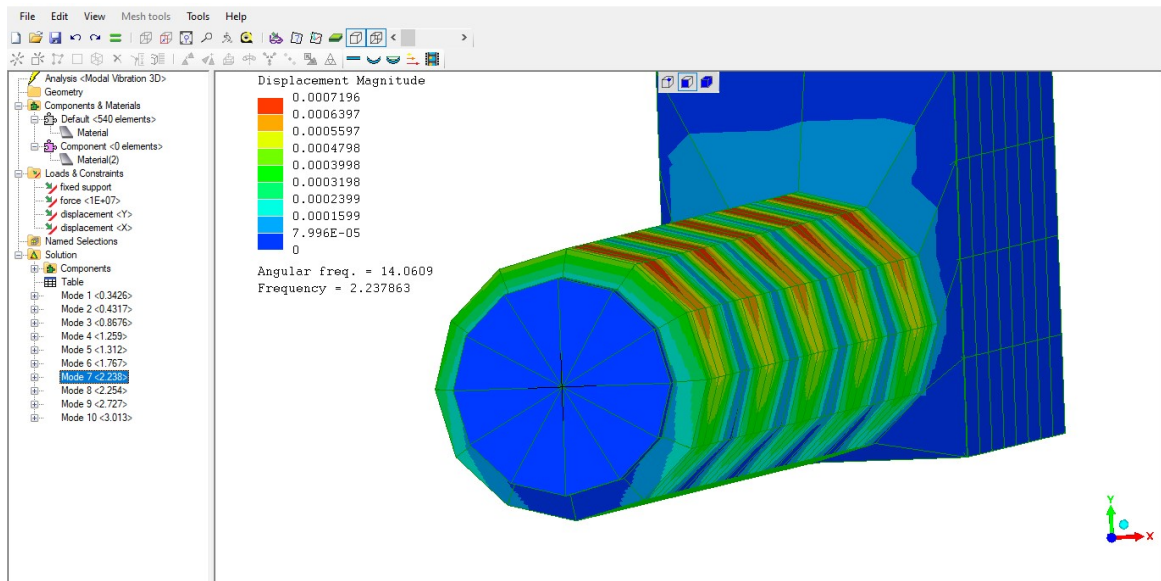


5<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου

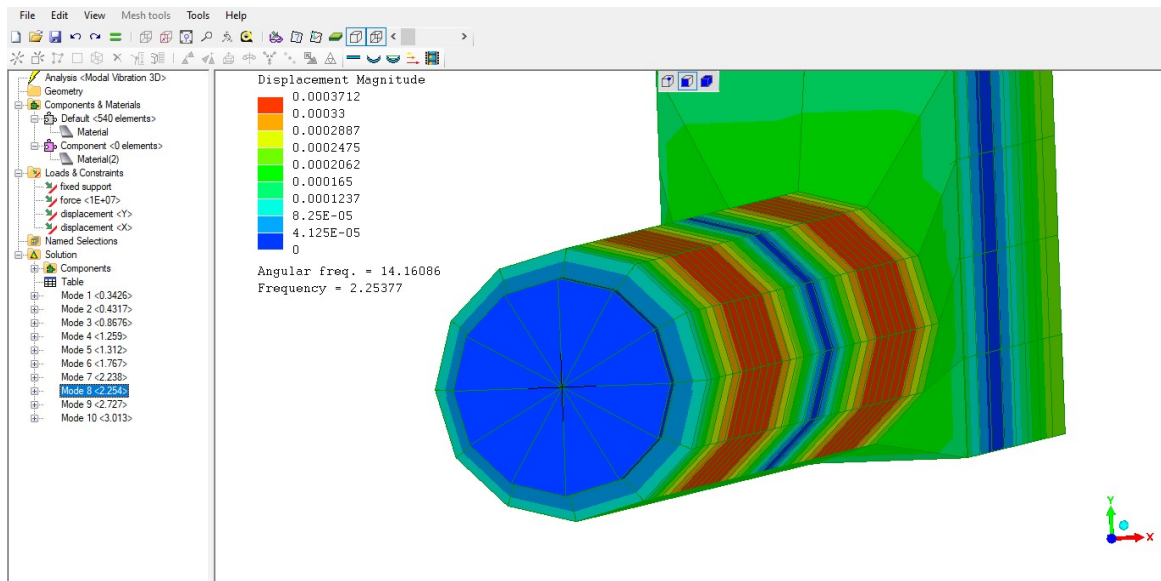


6<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου

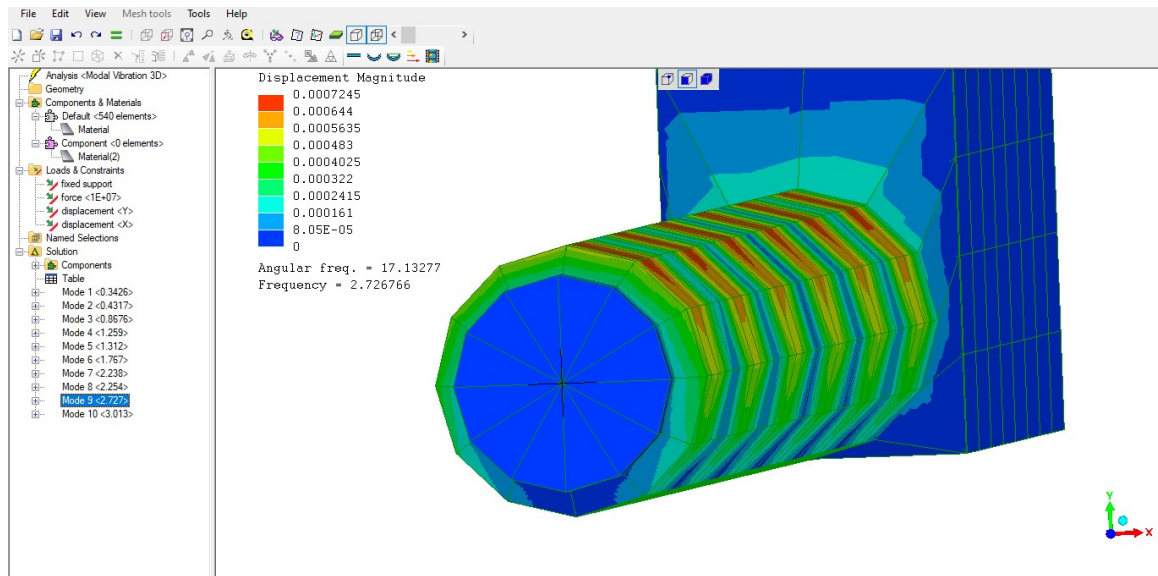




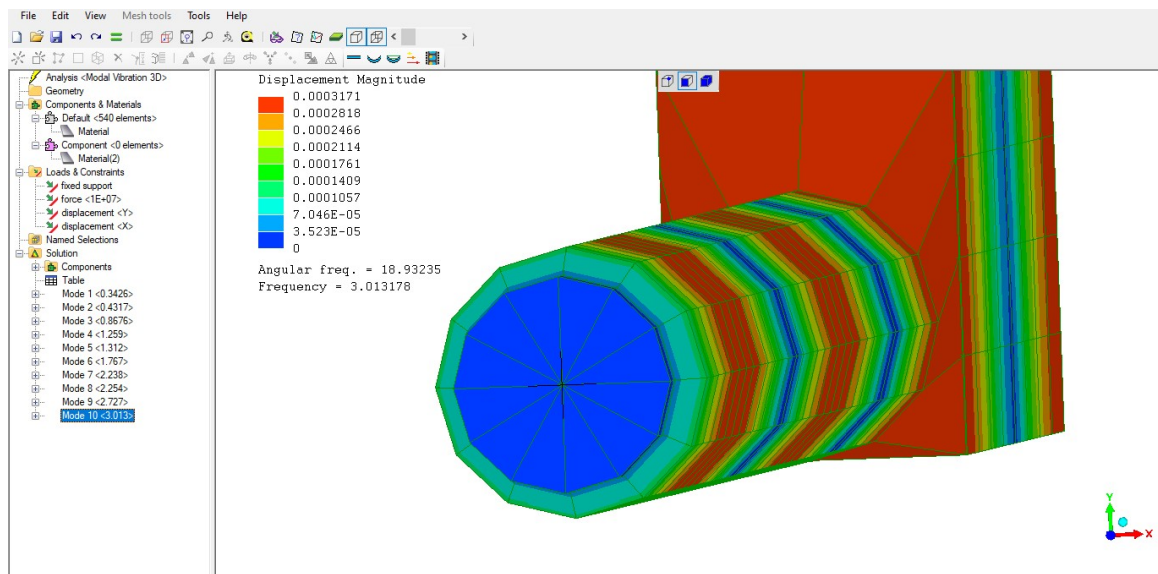
7<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου



8<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου

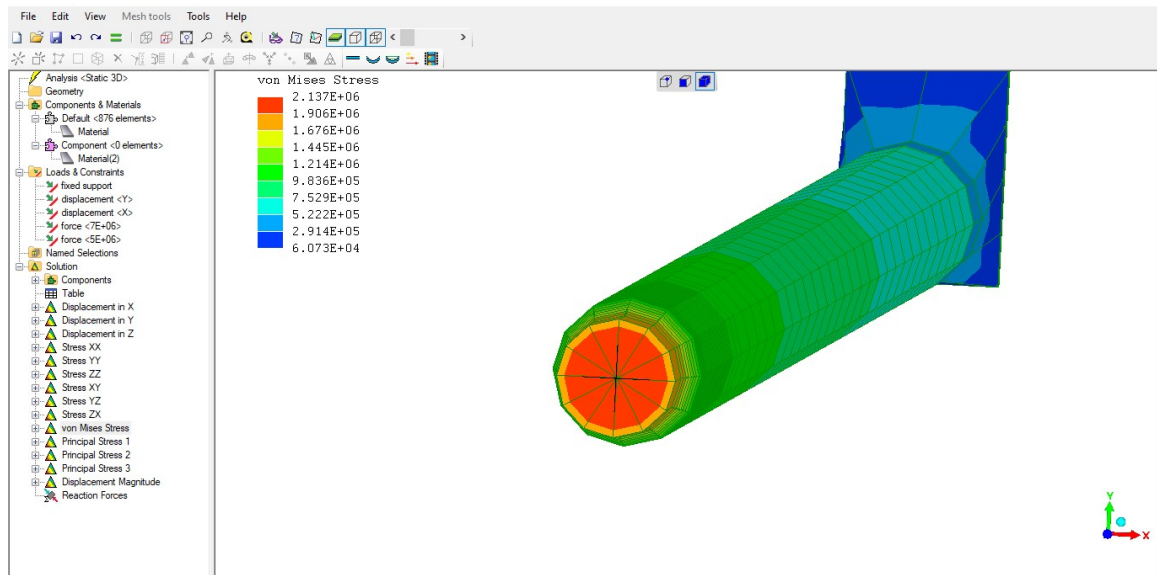


9<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου



10<sup>η</sup> ιδιομορφή του υπο μελέτη μοντέλου

Από τα αποτελέσματα της modal analysis, σύμφωνα με τον κανονισμό πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της συνιστώσας του σεισμού που εμφανίζεται παρακάτω.



Σεισμική διέγερση διεύθυνσης z (διαμήκης άξονας αγωγού).

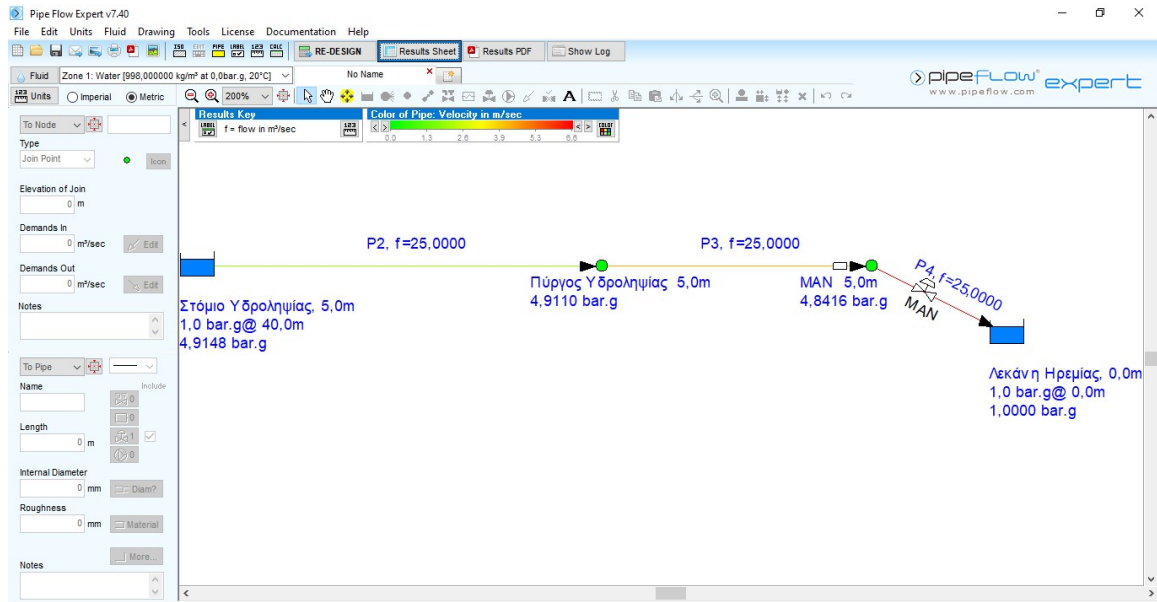
### Συμπεράσματα φασματικής ανάλυσης:

Παρατηρούμε τις υψηλές τάσεις- πιέσεις οι οποίες αυξάνονται πλησίον της βαλβίδας.

Η πίεση του νερού στη βαλβίδα εγγίζει τις 22 ατμόσφαιρές.

### **ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ**

Η βαλβίδα ενδέχεται να είναι σε ανοικτή θέση κατά τη σεισμική διέγερση. Κάτι τέτοιο θα άλλαζε τις πιέσεις που δέχεται, διότι λόγω της πτώσης της πιεζομετρικής γραμμής η πίεση στην εισαγωγή της θα ήταν μικρότερη. Για τον λόγο αυτό μοντελοποιήθηκε και επιλύθηκε το σύστημα αγωγού-βαλβίδας για παροχή 25M<sup>3</sup>/sec στο πρόγραμμα ρευστομηχανικής Pipe Flow και υπολογίστηκαν οι επιμέρους πιέσεις.



Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Οι πιέσεις είναι σε απόλυτες τιμές (η πίεση υπολογισμού προκύπτει από αυτές αφαιρώντας την ατμοσφαιρική πίεση).

Pipes	Pumps	FCVs	PRVs	BPVs	Components	Nodes	Energy	Factors	Fluid Zones	Pipe Materials	Pipe Fittings	All Results			
FCV Results															
Pipe Id	Pipe Name	Fluid Zone	Material	Inner Diameter	FCV Name	FCV Mass Flow	FCV Vol Flow	FCV Loss							
4	P4	Water (20°C at 0	1400 mm Cast Iro	2200,000	MAN	24950,0000	25,0000	44,186							
PRV Results															
Pipe Id	Pipe Name	Fluid Zone	Material	Inner Diameter	PRV Name	PRV Pressure	PRV Loss								
						bar.g	m.hd								
BPV Results															
Pipe Id	Pipe Name	Fluid Zone	Material	Inner Diameter	BPV Name	BPV Pressure	BPV Loss								
						bar.g	m.hd								
Node Results															
Node Id	Node Type	Node	Elevation	Liquid Level	Surface Press.	Press. at Node	HGL at Node	Demand In (Mass)	Demand Out (Ma	Demand In (Vol) i	Demand Out (Vol)	Total Flow In (Ma	Total Flow Out (W	Total Flow In (Vol)	Total
			m	m	bar.g	bar.g	m.hd Fluid	kg/sec	kg/sec	m³/sec	m³/sec	kg/sec	kg/sec	m³/sec	m³/sec
1	Tank	N1	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,000	N/A	N/A	0,0000	N/A	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
2	Join Point	N2	0,000	N/A	N/A	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
3	Tank	Στόμιο Υδροληψι	5,000	40,000	1,0000	4,9148	55,218	N/A	N/A	N/A	N/A	0,0000	24950,0000	0,0000	25,000
4	Join Point	Πύργος Υδροληψι	5,000	N/A	N/A	4,9110	55,179	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	24950,0000	0,0000	25,0000	25,000
5	Join Point	MAN	5,000	N/A	N/A	4,8416	54,470	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	24950,0000	0,0000	24950,0000	25,0000
6	Tank	Λεκάνη Ηρεμίας	0,000	0,000	1,0000	1,0000	10,218	N/A	N/A	N/A	N/A	24950,0000	0,0000	25,0000	0,000
Energy Results															
Pipe Id	Pipe Name	Energy Loss To	Energy Loss To	Energy Loss To	Energy Loss To	Energy Loss To	SUBTOTAL Loss	Energy Loss To	Energy Loss To	TOTAL USED					
		Pipe Friction	Pipe Fittings	Pipe Components	Pipe Control Valv	Pump Inefficiency	Pipe Items +Pump	Discharge Pressi	Change in Elevati	Sum of All Items					
		Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts					
1	P1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	N/A	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000					
2	P2	9,463690	0,000000	0,000000	0,000000	N/A	9,463690	0,000000	0,000000	9,463690					
3	P3	164,054067	9,513619	0,000000	0,000000	N/A	173,567686	0,000000	0,000000	173,567686					
4	P4	16,227919	0,000000	0,000000	10011,156993	N/A	10827,384912	2500,000000	-1223,379588	12104,005325					

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πιέσεων του προγράμματος ρευστομηχανικής Pipe Flow. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο αγωγός μετά το σημείο σύνδεσης με τον αγωγό του διυλιστηρίου ύδρευσης της Αμαλιάδας, παρουσιάζει κατωφέρεια και για τον λόγο αυτό η πίεση στην εισαγωγή της βαλβίδας προκύπτει μεγαλύτερη από την πίεση στο στόμιο υδροληψίας. Η πτώση δε της πιεζομετρικής γραμμής μέχρι το σημείο που αρχίζει η κατωφέρεια υπολογίστηκε 0,0732bar ήτοι 0,0722 ατμόσφαιρες ή 0,722 μέτρα υδάτινης στήλης.

## Computational Fluid Dynamics (CFD)

Ο μοναδικός τρόπος για την εξακρίβωση της πραγματικής δυναμικής της βαλβίδας, είναι η μαθηματική μοντελοποίηση και ανάλυση της με την βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD analysis). Η ανάλυση αυτή λαμβάνει χώρα συνήθως στην έρευνα και ανάπτυξη νέων προϊόντων (ο αεροδυναμικός σχεδιασμός αυτοκινήτων-αεροσκαφών, η μοντελοποίηση του μετάπου φλογός και βελτιστοποίηση του στους κινητήρες άμεσου ψεκασμού μέσω της στρωματικής μύξης, είναι μερικές από τις εφαρμογές της), με σκοπό την βελτιστοποίηση τους. Για την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων χρειάζεται μαθηματική ανάλυση εκατοντάδων χιλιάδων πεπερασμένων στοιχείων, καθώς πρέπει να ικανοποιηθεί μια σειρά απαιτήσεων στο μοντέλο του κανάβου των πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας ανάλογα με τις απαιτήσεις. Στη περίπτωση π.χ. μελέτης-διερεύνησης ενός αεροσκάφους στην οριακή κατάσταση απώλειας στήριξης, χρειάζεται ιδιαίτερη μέριμνα και προσοχή στη μοντελοποίηση του οριακού στρώματος ροής, για να προκύψει σωστά η μετάβαση από τη στρωτή ροή στη τυρβώδη και ο σωστός υπολογισμός της τύρβης από τους στροβίλους που θα οδηγήσουν στην απώλεια στήριξης, με ταυτόχρονη αύξηση της οπισθέλκουσας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη, καθώς οδηγεί το αεροσκάφος σε σπειροειδή βύθιση και φέρει σε ακραία δοκιμασία τις ικανότητες του πιλότου. Λόγω των απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ που έχει η επίλυση αυτών των μοντέλων ροής, μόλις την τελευταία εικοσαετία κατέστη δυνατή η ακριβής μαθηματική ανάλυση, που σε μεγάλο ποσοστό αντικατέστησε τις πολυδάπανες εργαστηριακές δοκιμές. Πρέπει να αναφερθεί ότι ένα σωστά δομημένο μοντέλο έχει αποκλίσεις μελέτης κάτω του 1% σε σύγκριση με τις εργαστηριακές δοκιμές, έχοντας το μεγάλο πλεονέκτημα της μελέτης σε πραγματική κλίμακα (στις αεροδυναμικές σήραγγες συνήθως -λόγω μεγέθους- μελετώνται μοντέλα του πραγματικού υπό κλίμακα). Όπως ήδη αναφέρθηκε ένα βασικό πρόβλημα που προέκυψε με την εμφάνιση της CFD ανάλυσης, ήταν η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς, ιδίως για τα turbulent μοντέλα, δηλαδή τα μοντέλα μη στρωτής ροής. Αυτό ξεπεράστηκε με επιτυχία την τελευταία δεκαετία με τη νέα τεχνολογία υπολογιστικής ισχύος νέφους. Έτσι μπορεί ο σχεδιαστής να νοικιάσει υπολογιστικό χρόνο και να λύσει ένα πολύπλοκο πρόβλημα, χωρίς να έχει απαραίτητα έναν αντίστοιχα ισχυρό υπολογιστή, με μικρό κόστος και σε μικρό χρονικό διάστημα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι ο σχεδιασμός και εξέλιξη ενός μικρού laminaρ αεροσκάφους, απαιτεί συνολικά λίγο πάνω από 65 χιλιάδες ώρες πυρήνα. Γίνεται λοιπόν σαφές το πλεονέκτημα του νέφους, καθώς μοντέλα χιλιάδων ωρών πυρήνα που θα απαιτούσαν πολλές εκατοντάδες ώρες λειτουργίας ενός ισχυρού υπολογιστή, επιλύονται εντός λίγων ωρών με τη βοήθεια του νέφους, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω των αλληπάλληλων δοκιμών.

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η μαθηματική επίλυση σε όλες τις περιπτώσεις βασίζεται στις εξισώσεις των Navier-Stokes. Το αξιοσημείωτο στη περίπτωση αυτή, είναι ότι οι δύο επιστήμονες ποτέ δεν συναντήθηκαν. Είναι μια θαυμαστή σύμπτωση ότι η περίφημη εξίσωση Navier-Stokes, δημιουργήθηκε από τον Claude-Louis Navier (1785-1836) και τον Sir George Gabriel Stokes (1819-1903), που δεν είχαν συναντηθεί ποτέ. Αρχικά, ο Claude-Louis Navier διεξήγαγε μελέτες σε ένα μερικό τμήμα των εξισώσεων μέχρι το 1822. Αργότερα, ο Sir George Gabriel Stokes προσάρμοσε και οριστικοποίησε τις εξισώσεις το 1845.

Η κύρια δομή της ανάλυσης των ρευστών γίνεται από εξισώσεις που βασίζονται στο νόμο διατήρησης των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού. Οι βασικές εξισώσεις αυτές είναι:

Διατήρηση μάζας: Εξίσωση συνέχειας

Διατήρηση της ορμής: Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα

Διατήρηση της Ενέργειας: Πρώτος Νόμος Θερμοδυναμικής, Εξίσωση Ενέργειας

Αυτές οι αρχές δηλώνουν ότι η μάζα, η ορμή και η ενέργεια είναι σταθερές μέσα σε ένα κλειστό σύστημα ελέγχου.

Η διερεύνηση της ροής ρευστού με θερμικές αλλαγές βασίζεται σε ορισμένες φυσικές ιδιότητες. Οι τρεις άγνωστοι που πρέπει να ληφθούν ταυτόχρονα από αυτές τις τρεις βασικές εξισώσεις διατήρησης, είναι η ταχύτητα  $\vec{v}$ , η πίεση  $p$  και η απόλυτη θερμοκρασία  $T$ . Ωστόσο, τα  $p$  και  $T$  θεωρούνται οι δύο απαιτούμενες ανεξάρτητες θερμοδυναμικές μεταβλητές. Η τελική μορφή των εξισώσεων διατήρησης περιέχει επίσης τέσσερις άλλες θερμοδυναμικές μεταβλητές, την πυκνότητα  $\rho$ , την ενθαλπία  $h$ , το ιξώδες  $\mu$ , και τη θερμική αγωγιμότητα  $k$ . Αυτές οι τέσσερις ιδιότητες καθορίζονται μοναδικά από την τιμή των  $p$  και  $T$ .

Η ροή ρευστού θα πρέπει να αναλυθεί για να υπολογιστούν τα  $v$ ,  $p$  και  $T$ , σε κάθε σημείο του περιβάλλοντος ροής. Αυτό είναι πολύ σημαντικό πριν από το σχεδιασμό οποιουδήποτε προϊόντος που περιλαμβάνει ροή ρευστού. Επιπλέον, η μέθοδος υπολογισμού της ροής του ρευστού με βάση τις κινηματικές ιδιότητες, είναι ένα θεμελιώδες ζήτημα. Η κίνηση του υγρού μπορεί να διερευνηθεί είτε με τη μέθοδο Lagrange είτε με τη μέθοδο Euler. Η περιγραφή κατά Lagrange της κίνησης του ρευστού βασίζεται στη θεωρία ότι ακολουθεί ένα ρευστό σωματίδιο που είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να έχει ανιχνεύσιμες ιδιότητες. Πρέπει να εξεταστούν οι αρχικές συντεταγμένες τη στιγμή  $t_0$  και οι συντεταγμένες του ίδιου σωματιδίου τη στιγμή  $t_1$ . Το να αναλυθούν εκατομμύρια ξεχωριστά σωματίδια μέσω της διαδρομής τους είναι σχεδόν αδύνατο. Στη μέθοδο κατά Euler,

αντί να ακολουθεί οποιοδήποτε συγκεκριμένο σωματίδιο κατά μήκος της διαδρομής, το πεδίο της ταχύτητας εξετάζεται ως συνάρτηση του χώρου και του χρόνου.

Η διατύπωση της κίνησης του Lagrange εξαρτάται πάντα από το χρόνο. Με  $a$ ,  $b$  και  $c$  να είναι οι αρχικές συντεταγμένες ενός σωματιδίου και  $x$ ,  $y$  και  $z$  οι συντεταγμένες του ίδιου σωματιδίου τη χρονική στιγμή  $t$ , η περιγραφή της κίνησης για ροή κατά Lagrange παίρνει τη μορφή:

$$x=x(a,b,c,t)$$

$$y=y(a,b,c,t)$$

$$z=z(a,b,c,t)$$

Στη μέθοδο Euler με τα  $u$ ,  $v$  και  $w$  να είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στο σημείο  $(x,y,z)$  τη χρονική στιγμή  $t$ , και οι  $u$ ,  $v$  και  $w$  είναι οι άγνωστοι των συναρτήσεων των ανεξάρτητων μεταβλητών  $x,y,z$  και  $t$ , η περιγραφή της κίνησης για μια ροή Euler για οποιαδήποτε συγκεκριμένη χρονική στιγμή  $t$  παίρνει τη μορφή:

$$u=u(x,y,z,t)$$

$$v=v(x,y,z,t)$$

$$w=w(x,y,z,t)$$

#### **ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ**

Η εξίσωση για τη διατήρηση της μάζας γίνεται:

$$D\rho/Dt+\rho(\nabla\cdot\mathbf{v})=0$$

Όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα,  $\mathbf{v}$  η ταχύτητα και  $\nabla$  ο τελεστής κλίσης.

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

Εάν η πυκνότητα είναι σταθερή και η ροή ασυμπίεστη τότε η εξίσωση συνέχειας συμπυκνώνεται σε:

$$D\rho/Dt=0 \rightarrow \nabla\cdot\mathbf{v} = \partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0$$

Η διατήρηση της ορμής υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση Navier-Stokes:



$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v})}_I + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})}_II = \underbrace{-\nabla p}_III + \underbrace{\nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}})}_IV + \underbrace{\rho \vec{g}}_V$$

Όπου  $p$  είναι στατική πίεση,  $\tau$  είναι ο τανυστής ιξώδους τάσης και  $\rho \vec{g}$  είναι η βαρυτική δύναμη ανά μονάδα όγκου.

Οι λατινικοί αριθμοί δηλώνουν:

I: Τοπική αλλαγή με το χρόνο

II: Μεταφορά ορμής

III: Πίεση

IV: Διάχυση

V: Δύναμη μάζας

Ο τανυστής της ιξώδους τάσης  $\tau$  μπορεί να προσδιοριστεί ως ακολούθως σύμφωνα με την υπόθεση του Stokes

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \delta_{ij} \right)$$

Με την υπόθεση ότι το ρευστό είναι ασυμπίεστο και με σταθερό συντελεστή ιξώδους  $\mu$ , η εξίσωση Navier-Stokes απλοποιείται ως εξής:

$$\rho D\vec{v} / Dt = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g}$$

Η διατήρηση της ενέργειας είναι ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής που δηλώνει ότι το άθροισμα του έργου και της θερμότητας που προστίθεται στο σύστημα, θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας του συστήματος:

$$dE_t = dQ + dW$$

Όπου  $dQ$  είναι η θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα,  $dW$  είναι η ενέργεια του έργου που προστίθεται στο σύστημα και  $dE_t$  είναι η αύξηση της συνολικής ενέργειας του συστήματος. Ένας από τους κοινούς τύπους εξίσωσης ενέργειας είναι:



$$\rho \left[ \overbrace{\frac{\partial h}{\partial t}}^I + \overbrace{\nabla \cdot (h\vec{v})}^{II} \right] = -\overbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}^{III} + \overbrace{\nabla \cdot (k\nabla T)}^{IV} + \overbrace{\phi}^V$$

I: Τοπική αλλαγή με το χρόνο

II: Convective term

III: Έργο πίεσης

IV: Ροή θερμότητας

V: Πηγή

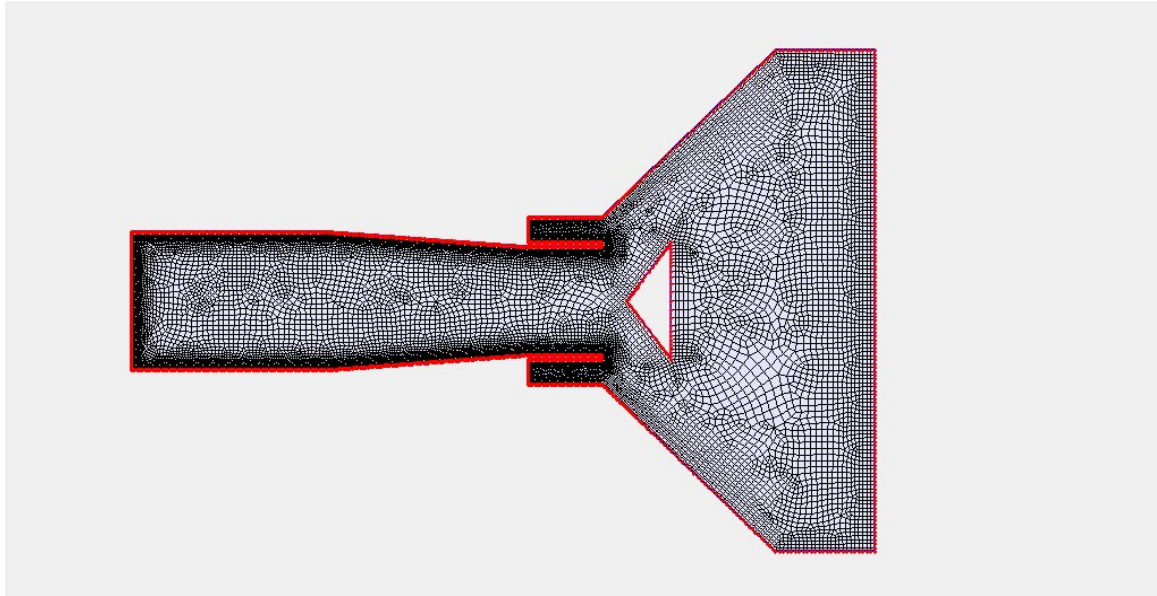
### ΜΕΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ (ΜΔΕ)

Το Μαθηματικό μοντέλο απλώς μας δίνει τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων μεταφοράς που εμπλέκονται στην όλη διαδικασία, είτε άμεσα είτε έμμεσα. Παρόλο που κάθε μεμονωμένος όρος σε αυτές τις εξισώσεις έχει μια σχετική επίδραση στο φυσικό φαινόμενο, οι αλλαγές στις παραμέτρους θα πρέπει να εξετάζονται ταυτόχρονα μέσω της αριθμητικής λύσης που περιλαμβάνει διαφορικές εξισώσεις, διανύσματα και τανυστές. Ένα σύστημα ΜΔΕ περιλαμβάνει περισσότερες από μία μεταβλητές και συμβολίζεται με "d". Εάν η εξίσωση διεξάγεται με "d", αυτές οι εξισώσεις ονομάζονται Συνήθεις Διαφορικές Εξισώσεις (ΣΔΕ), που περιέχουν μια μεμονωμένη μεταβλητή. Οι ΜΔΕ εμπλέκονται στο να μετατρέψουν τον διαφορικό τελεστή ( $\partial$ ) σε αλγεβρικό τελεστή προκειμένου να ληφθεί μια λύση. Η μεταφορά θερμότητας, η δυναμική των ρευστών, η ακουστική, η ηλεκτρονική και η κβαντομηχανική είναι τα πεδία στα οποία οι ΜΔΕ χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για επίλυση.

Υπάρχει γενικά πλούσια βιβλιογραφία γύρω από την επίλυση αυτών των προβλημάτων και δεν θα γίνει περισσότερη ανάλυση σε αυτό το σημείο.

Στην πράξη για την κατάστρωση και επίλυση των παραπάνω εξισώσεων χρησιμοποιούνται προγράμματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Υπάρχουν διάφορα τέτοια προγράμματα διαθέσιμα. Για την παρούσα μελέτη-ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το αγγλικής προέλευσης πρόγραμμα OpenFOAM με μέθοδο επίλυσης την k-omega SST.

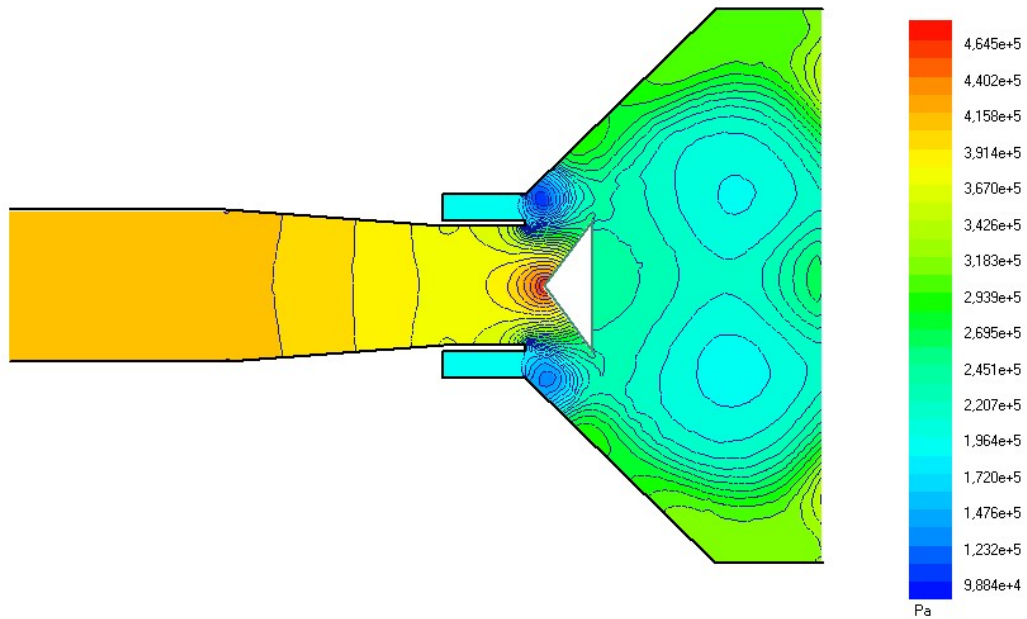
Ακολουθεί σύντομη παρουσίαση και περιγραφή του μοντέλου.



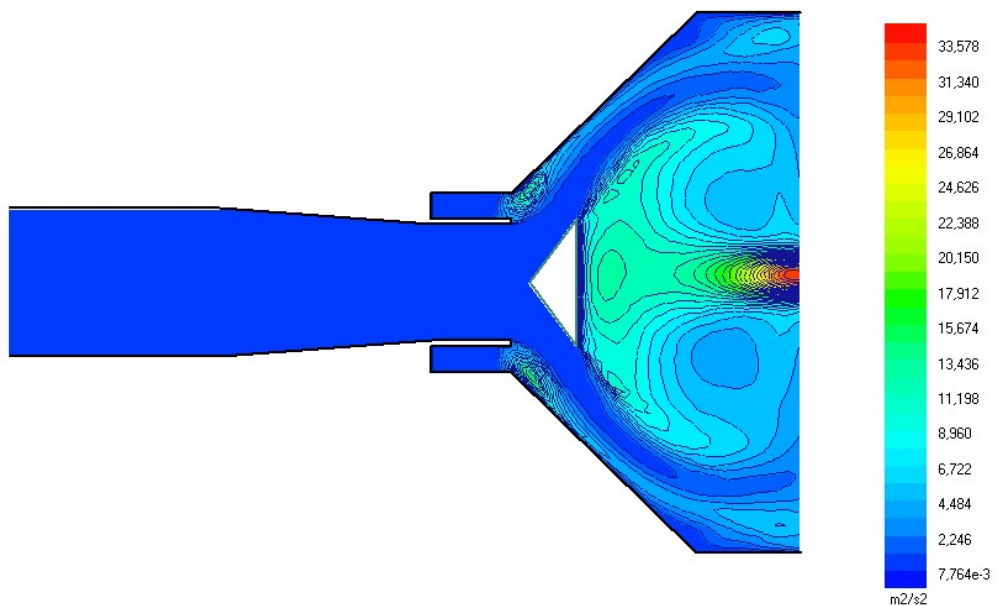
Στη παραπάνω εικόνα φαίνεται η κατανομή των πεπερασμένων στοιχείων του όγκου ελέγχου, στο OpenFOAM στην οριζόντια τομή στο μέσον του ύψους της βαλβίδας, για βαλβίδα 100% ανοικτή. Γίνεται φανερή η πύκνωση των πεπερασμένων στοιχείων στα κρίσιμα σημεία. Επίσης φαίνονται και τα boundary layers για τη λεπτομερή μελέτη του οριακού στρώματος ροής.

Η πρώτη εκτίμηση από την ανάλυση της βαλβίδας MAN με το πρόγραμμα μαθηματικής ανάλυσης OpenFOAM, είναι ότι φτάνει σε υψηλές τιμές παροχής. Ακολουθήθηκε κυκλική διαδικασία, προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή της πίεσης στο στόμιο του αγωγού προσαγωγής (πριν τη συστολή) για τη βαλβίδα MAN 100% ανοικτή. Για την επίλυση της πιεζομετρικής γραμμής κάθε φορά χρησιμοποιήθηκε το Αγγλικής προέλευσης πρόγραμμα ρευστομηχανικής Pipe Flow.

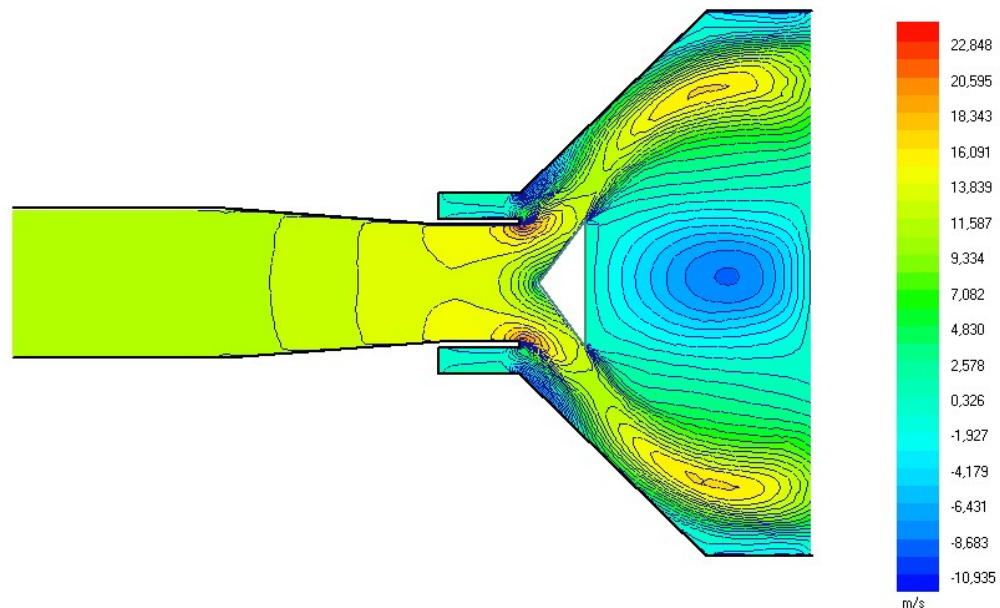
Κατόπιν ολοκλήρωσης της προαναφερθείσας κυκλικής διαδικασίας υπολογίστηκε η πίεση στο στόμιο του αγωγού ανάντη της βαλβίδας MAN. Για την πίεση αυτή έγινε η επίλυση και τα αποτελέσματα της παρουσιάζονται ακολούθως.



Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η κατανομή των πιέσεων στον χώρο ελέγχου. Γίνεται φανερή η χωρίς ρότορες ροή λόγω του άριστου αρχικού σχεδιασμού τόσο της βαλβίδας όσο και του αγωγού ανάντη. Επίσης φαίνεται η περιοχή κατάντη της βαλβίδας (στη λεκάνη ηρεμίας) όπου δημιουργούνται δύο ρότορες (στο επίπεδο της τομής). Στη πραγματικότητα είναι ένας κυκλικός ρότορας διαμέτρου τεσσάρων μέτρων.



Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται οι περιοχές τυρβώδους ροής.



Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ταχυτήτων του ρευστού ανά μονάδα χρόνου στον όγκο ελέγχου. Επίσης γίνεται φανερή η ροή υψηλής ταχύτητας στην περιοχή του σταθερού κώνου.

Τα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος παραπάνω αποτελέσματα δημιούργησαν την ανάγκη μαθηματικής επαλήθευσης των αποτελεσμάτων της προαναφερθείσας κυκλικής διαδικασίας, με την 100% μοντελοποίηση στο CFD πρόγραμμα OpenFOAM.

Για τον λόγο αυτό μοντελοποιήθηκε εξολοκλήρου η σήραγγα υδροληψίας με τον αγωγό προσαγωγής, από την αρχή (στόμιο υδροληψίας) μέχρι το τέλος (βαλβίδα MAN-λεκάνη ηρεμίας) στο πρόγραμμα OpenFOAM. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή της μεθόδου και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.



Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για ολόκληρο το υπό μελέτη σύστημα. Αριστερά διακρίνεται η διαστολή του στομίου υδροληψίας, στη συνέχεια και πηγαίνοντας προς τα δεξιά διακρίνεται η συστολή που γίνεται στον πύργο υδροληψίας (όπου υπάρχει και ο κατακόρυφος ροϋφρακτης) και εν συνεχεία δεξιά γίνεται αντιληπτή η βαλβίδα με τη λεκάνη ηρεμίας.

Στη συνέχεια, με χρήση του τρόπου επίλυσης  $k$ - $\omega$  SST, εφαρμόζοντας πίεση ίση με την υδροστατική στο στόμιο υδροληψίας, ήτοι ίση με 3,5ατμόσφαιρες (αντιστοιχεί σε γεμάτο ταμιευτήρα), επιλύουμε το σύστημα. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της παροχής και πίεσης κατά μήκος του αγωγού.



Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα επίλυσης για τις πιέσεις κατά μήκος του συστήματος.



Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα επίλυσης για τις ταχύτητες κατά μήκος του συστήματος.



Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι περιοχές τυρβώδους ροής. Εμφανίζεται κυρίως στη λεκάνη ηρεμίας κατόντη της τερματικής βαλβίδας MAN.

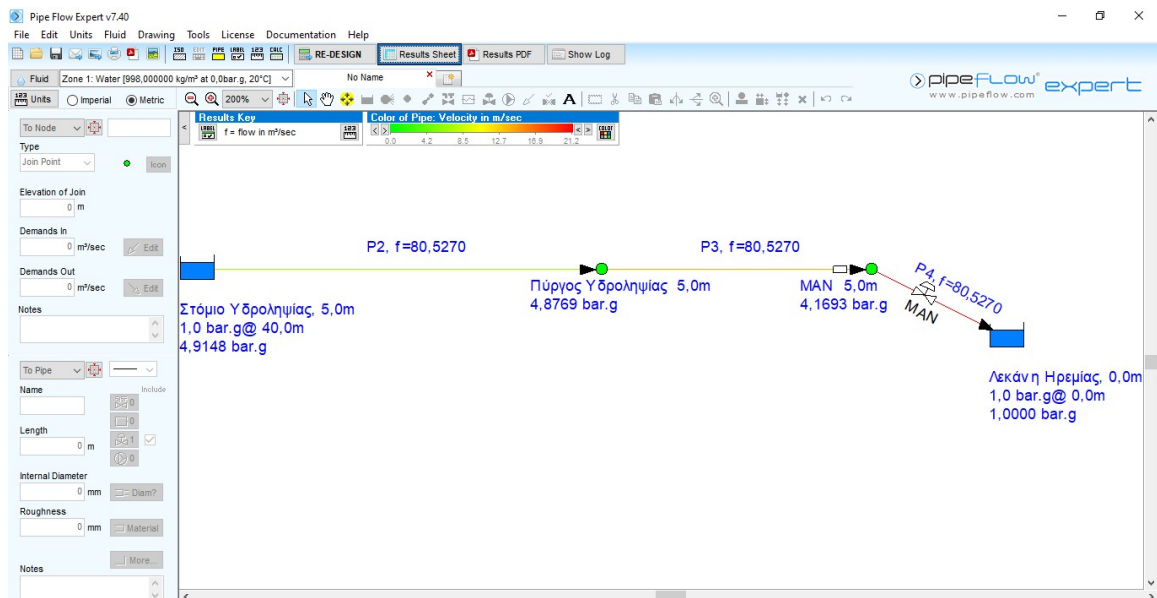
Τα αποτελέσματα της μαθηματικής ανάλυσης στο OpenFOAM συμφωνούν με τα αποτελέσματα της αρχικής κυκλικής ανάλυσης. Η διάταξη έχει ικανότητα μέγιστης παροχής ίσης με  $80,53\text{m}^3/\text{sec}$

κάτι που προσδίδει μεγάλη ασφάλεια στο έργο, καθώς σε κατάσταση emergency υπάρχει η δυνατότητα ταχείας εκκένωσης του ταμιευτήρα.

Η βαλβίδα από μόνη της αναμένεται να έχει μεγαλύτερη παροχή, η οποία θα είναι και η ονομαστική της.

Επιλύοντας το σύστημα μόνο για τη βαλβίδα προκύπτει παροχή ίση με 90,48m<sup>3</sup>/sec η οποία είναι και η ονομαστική παροχή της βαλβίδας MAN.

Στη συνέχεια διασταυρώνονται τα αποτελέσματα με το πρόγραμμα ρευστομηχανικής Pipe Flow, επιλύοντας το σύστημα με παροχή 80,53m<sup>3</sup>/sec και υπολογίζοντας την πτώση πίεσης για την παροχή αυτή. Τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:



Αποτελέσματα στο πρόγραμμα ρευστομηχανικής Pipe Flow

Pipe Flow Expert - Results														
Units														
Pipes	Pumps	FCVs	PRVs	BPVs	Components	Nodes	Energy	Factors	Fluid Zones	Pipe Materials	Pipe Fittings	All Results		
FCV Results														
Pipe Id	Pipe Name	Fluid Zone	Material	Inner Diameter	FCV Name	FCV Mass Flow	FCV Vol Flow	FCV Loss						
4	P4	Water (20°C at 0.0bar)	1400 mm Cast Iron	2200,000	MAN	80365,9460	80,5270	36,704						
PRV Results														
Pipe Id	Pipe Name	Fluid Zone	Material	Inner Diameter	PRV Name	PRV Pressure	PRV Loss							
				mm		bar.g	m.hd							
BPV Results														
Pipe Id	Pipe Name	Fluid Zone	Material	Inner Diameter	BPV Name	BPV Pressure	BPV Loss							
				mm		bar.g	m.hd							
Node Results														
Node Id	Node Type	Node	Elevation	Liquid Level	Surface Press.	Press. at Node	HGL at Node	Demand In (Mass)	Demand Out (Mass)	Demand In (Vol)	Demand Out (Vol)	Total Flow In (Mass)	Total Flow Out (Mass)	Total Flow In (Vol)
1	Tank	N1	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,000	N/A	N/A	N/A	N/A	0,0000	0,0000	0,0000
2	Join Point	N2	0,000	N/A	N/A	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	Tank	Στόμιο Υδροληψίας	5,000	40,000	1,0000	4,9148	55,218	N/A	N/A	N/A	N/A	0,0000	80365,9460	0,0000
4	Join Point	Πύργος Υδροληψίας	5,000	N/A	N/A	4,8769	54,631	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	80365,9460	80365,9460	89,5270
5	Join Point	MAN	5,000	N/A	N/A	4,1693	47,600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	80365,9460	80365,9460	89,5270
6	Tank	Λεκάνη Ηρώδης	0,000	0,000	1,0000	1,0000	10,218	N/A	N/A	N/A	N/A	80365,9460	0,0000	89,5270
Energy Results														
Pipe Id	Pipe Name	Energy Loss To Pipe Friction	Energy Loss To Pipe Fittings	Energy Loss To Pipe Components	Energy Loss To Pipe Control Valve	Energy Loss To Pump Inefficiency	SUBTOTAL Loss Pipe Items + Pump	Energy Loss To Discharge Pressure	Energy Loss To Change in Elevation	TOTAL USED				
		Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Sum of All Items				
1	P1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	N/A	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000				
2	P2	304,930494	0,000000	0,000000	0,000000	N/A	304,930494	0,000000	0,000000	304,930494				
3	P3	5380,327282	317,943739	0,000000	0,000000	N/A	5698,271021	0,000000	0,000000	5698,271021				

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα του προγράμματος Pipe Flow, ενώ με κίτρινο είναι σημειωμένα τα αντίστοιχα κελιά που αφορούν τη βαλβίδα MAN. Η πίεση στο στόμιο της δίδεται ως απόλυτη πίεση, η πίεση υπολογισμού προκύπτει από την απόλυτη αφαιρώντας την ατμοσφαιρική.

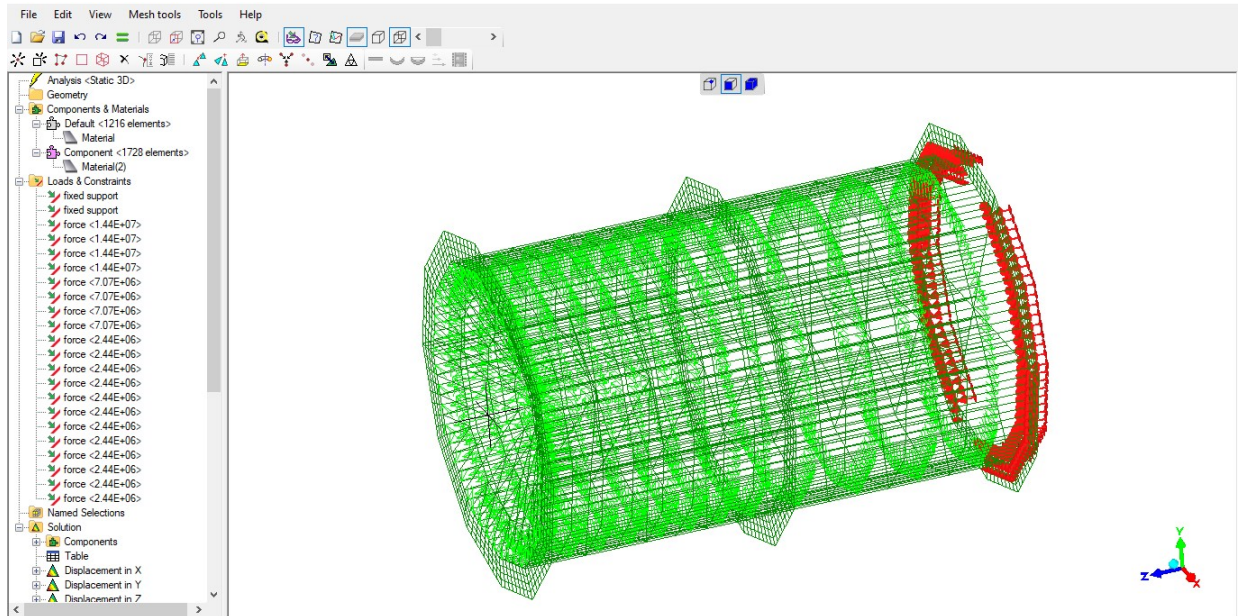
Η υπολογιζόμενη πίεση για παροχή 80,53m<sup>3</sup>/sec είναι ίση με 3,1693bar ή 3,115 ατμόσφαιρες (4,1693 bar απόλυτη πίεση), αποτέλεσμα που ταυτίζεται με αυτό της μαθηματικής ανάλυσης.

Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε με ασφάλεια στο συμπέρασμα ότι η βαλβίδα MAN έχει ονομαστική δυναμική παροχέτευσης 90,48m<sup>3</sup>/sec. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω για στάθμη ταμιευτήρα +85,80 (κατώφλι εκροής του τοξωτού θυροφράγματος), η βαλβίδα MAN χρειάζεται 57 ημέρες για να εκκενώσει το 90% της ποσότητας του ταμιευτήρα.



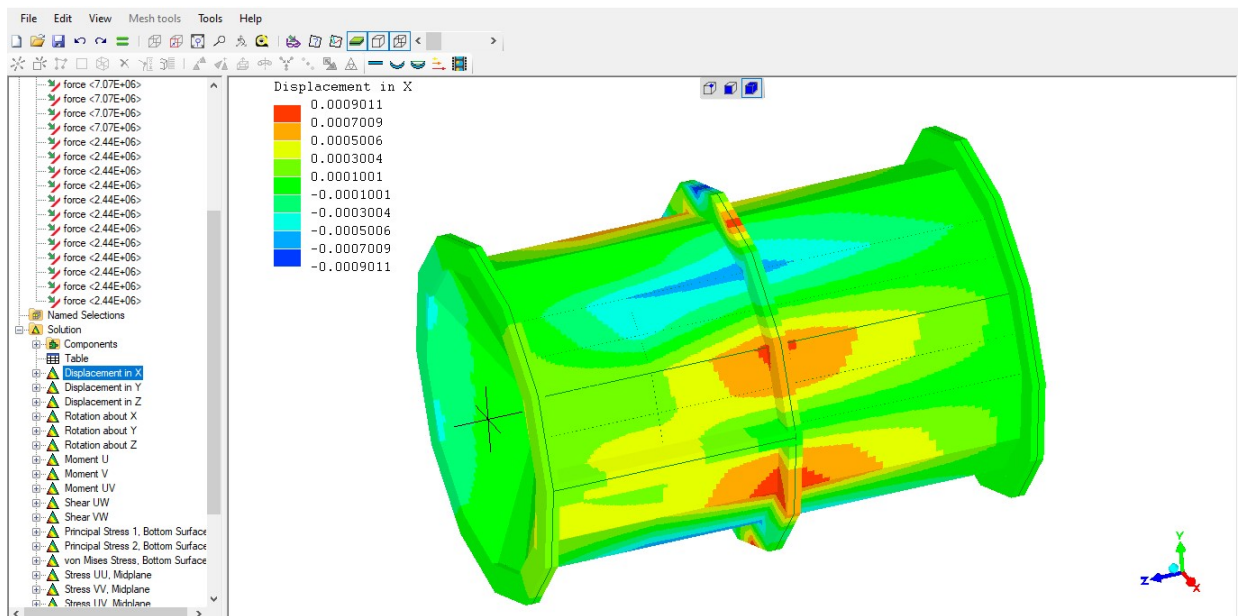
## Διερεύνηση-μαθηματική ανάλυση αντοχής της βαλβίδας

Ακολουθεί μαθηματική ανάλυση της βαλβίδας για καταπόνηση υπό πίεση 45 ατμοσφαιρών.

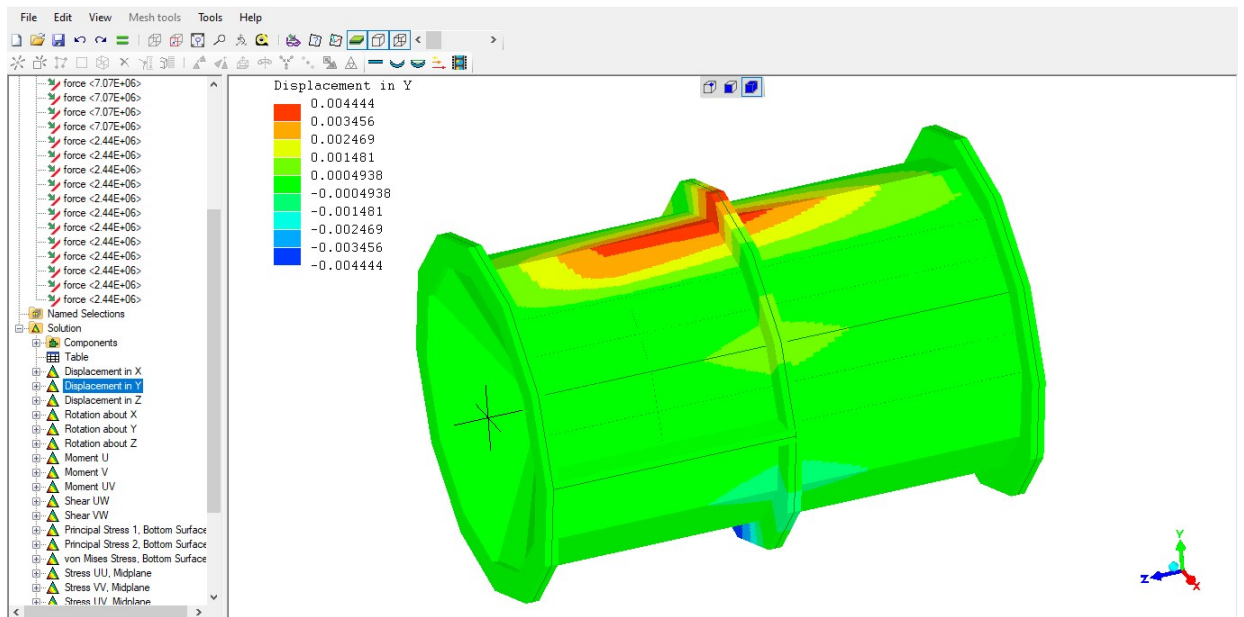


Μοντέλο της υπό διερεύνηση βαλβίδας

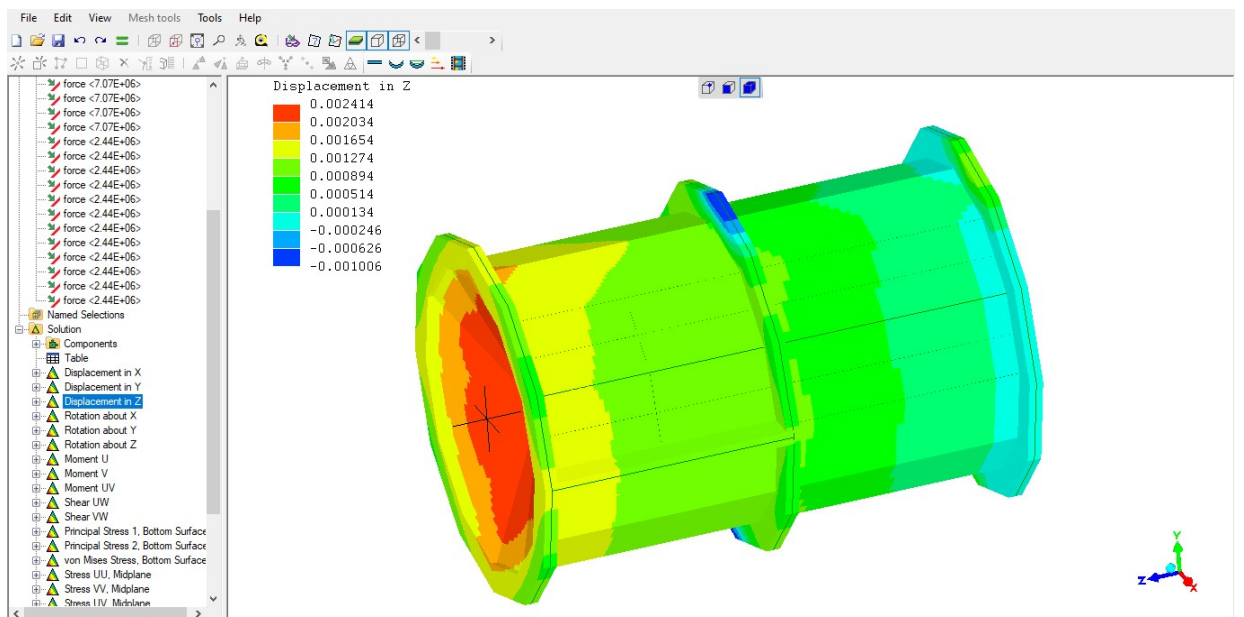
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη-ανάλυση της υφιστάμενης βαλβίδας φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Ακολουθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την πίεση υπολογισμού (45ατμ).



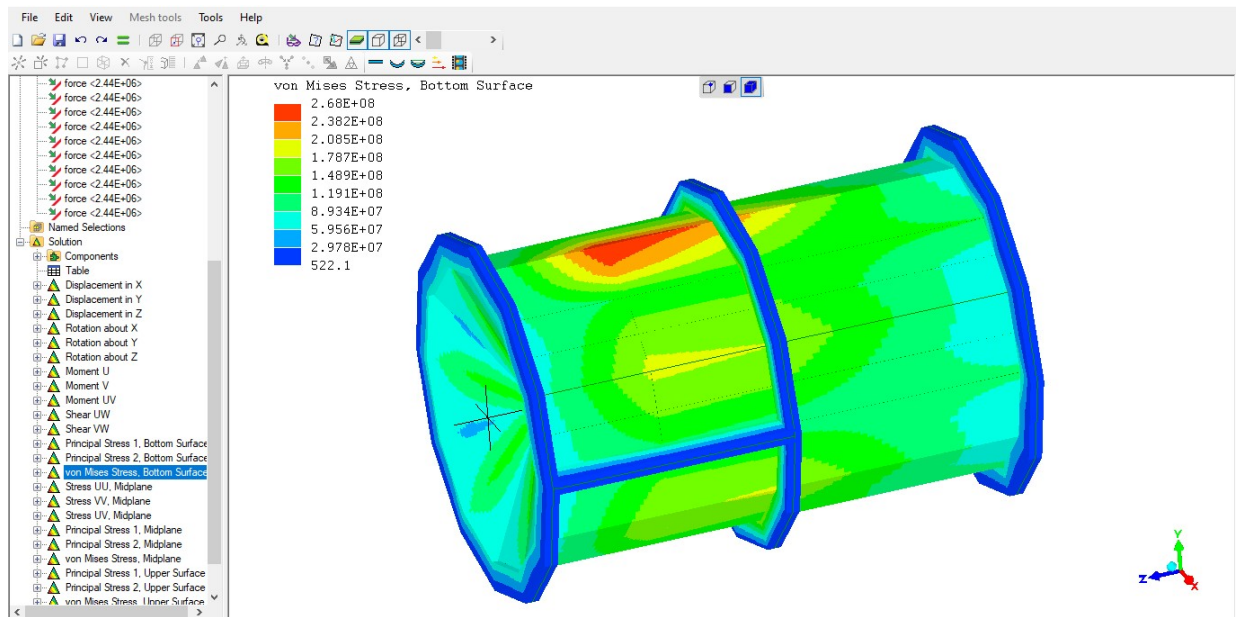
Παραμορφώσεις κατά x



Παραμορφώσεις κατά y



Παραμορφώσεις κατά z



## Αποτελέσματα τάσεων

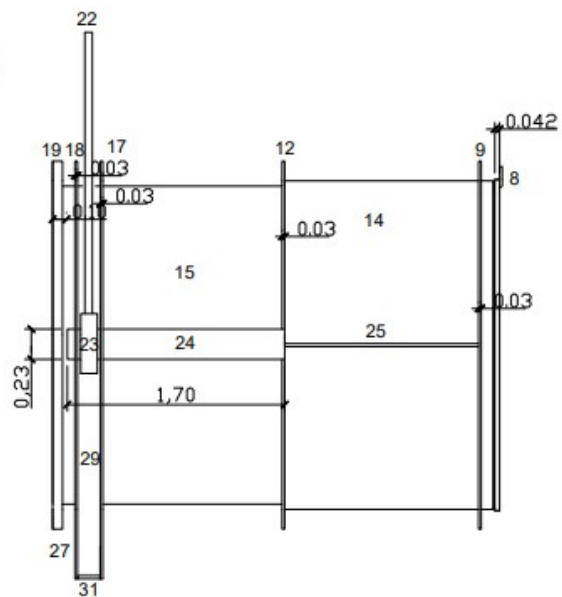
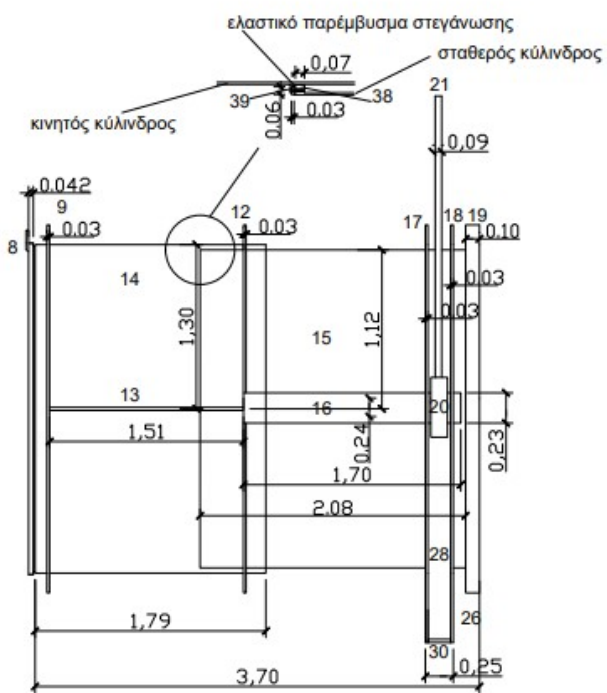
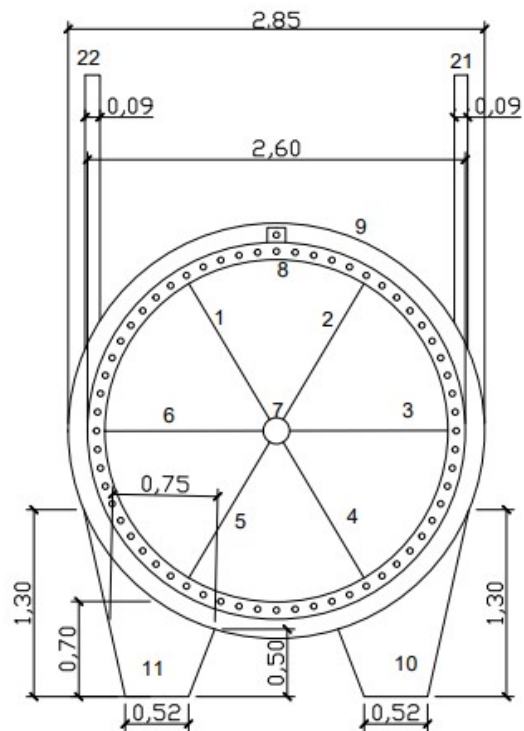
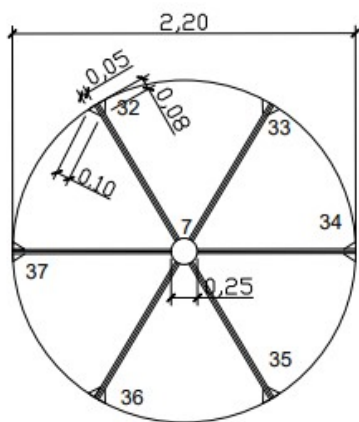
### Συμπεράσματα αναλύσης βαλβίδας MAN:

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τάσεις (όπως ήταν αναμενόμενο) εμφανίζονται στο κινητό τμήμα της βαλβίδας. Ωστόσο παραμένουν κάτω από το 50% της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης του υλικού (30% περίπου). Επίσης η βαλβίδα ικανοποιεί τη συνθήκη (αμερικανικός κανονισμός FEMA), για μέγιστο ποσοστό παραμόρφωσης μικρότερο ή ίσο του 4%. Είναι φανερό ότι η βαλβίδα MAN σχεδιάστηκε για να ανταποκρίνεται σε πίεση 45 ατμοσφαιρών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, η βαλβίδα τηρεί συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο του 2 (2,25 για την ακρίβεια) για καταπόνηση από σεισμική διέγερση.

### Ακολουθεί αναλυτικός υπολογισμός του βάρους.

Τα βάρη των τεμαχίων της βαλβίδας υπολογίζονται με το ειδικό βάρος του ανοξείδωτου χάλυβα A4 (από τον οποίο έχουν κατασκευαστεί) και είναι ίσο με 8000 kg/m<sup>3</sup>, ενώ βάρη των ειδικών τεμαχίων-εξαρτημάτων του σερβομηχανισμού (μη υποβρύχιο τμήμα), με το ειδικό βάρος του εργαλειοχάλυβα 7800 kg/m<sup>3</sup> (από τον οποίο έχουν κατασκευαστεί).



**Επιμετρικός Πίνακας Υπολογισμού Βάρους Τερματικής Βαλβίδας**

α/α	μέσο μήκος (για κύκλους ισχύει $6,28*r$ )	πλάτος	πάχος	ειδικό βάρος	βάρος
1	3.35	0.975	0.030	8000.00	<b>783.90</b>
2	3.35	0.975	0.030	8000.00	<b>783.90</b>
3	3.35	0.975	0.030	8000.00	<b>783.90</b>
4	3.35	0.975	0.030	8000.00	<b>783.90</b>
5	3.35	0.975	0.030	8000.00	<b>783.90</b>
6	3.35	0.975	0.030	8000.00	<b>783.90</b>
7	3.35	κύλινδρος, όγκος= $3,14*(D^2)/4*L=3.14*(0.25^2)/4*3.35=$			<b>1314.875</b>
	$2\pi r=6,28*(1.30-0.125)=7.38$				
8	7.38	0.250	0.040	8000.00	<b>590.40</b>
	$2\pi r=6,28*(1,30+0.125)=8.95$				
9	8.95	0.250	0.030	8000.00	<b>537.00</b>
10	0.90	0.640	0.030	8000.00	<b>138.24</b>
11	0.90	0.640	0.030	8000.00	<b>138.24</b>
	$2\pi r=6,28*(1,30+0.125)=8.95$				
12	9.20	0.250	0.030	8000.00	<b>552.00</b>
13	1.51	0.250	0.030	8000.00	<b>90.60</b>
	$2\pi r=6,28*1.30=8.16$				
14	8.16	1.790	0.017	8000.00	<b>1986.47</b>
	$2\pi r=6,28*1.12=7.03$				
15	7.03	2.080	0.017	8000.00	<b>1988.65</b>
16	1.70	0.230	0.200	8000.00	<b>625.60</b>
	$2\pi r=6,28*(1,30+0.125)=8.95$				
17	8.95	0.280	0.030	8000.00	<b>601.44</b>
	$2\pi r=6,28*(1,30+0.125)=8.95$				
18	8.95	0.280	0.030	8000.00	<b>601.44</b>
	$2\pi r=6,28*(1,30+0.125)=8.95$				
19	8.95	0.280	0.090	8000.00	<b>1804.32</b>
20	0.30	κύλινδρος, όγκος= $3,14*(D^2)/4*L=3.14*(0.4^2)/4*0.3=0.04$			<b>320</b>

21	3.00	κύλινδρος, όγκος= $3,14*(D^2)/4*L=3.14*(0.09^2)/4*3.00=0.02$			160
22	3.00	κύλινδρος, όγκος= $3,14*(D^2)/4*L=3.14*(0.09^2)/4*3.00=0.02$			160
23	0.30	κύλινδρος, όγκος= $3,14*(D^2)/4*L=3.14*(0.4^2)/4*0.3=0.04$			320
24	1.70	0.230	0.200	8000.00	625.60
25	1.51	0.250	0.030	8000.00	90.60
26	0.90	0.640	0.030	8000.00	138.24
27	0.90	0.640	0.030	8000.00	138.24
28	0.70	0.250	0.030	8000.00	42.00
29	0.70	0.250	0.030	8000.00	42.00
30	0.52	0.250	0.030	8000.00	31.20
31	0.52	0.250	0.030	8000.00	31.20
32	3.70	0.050	0.080	8000.00	118.40
33	3.70	0.050	0.080	8000.00	118.40
34	3.70	0.050	0.080	8000.00	118.40
35	3.70	0.050	0.080	8000.00	118.40
36	3.70	0.050	0.080	8000.00	118.40
37	3.70	0.050	0.080	8000.00	118.40
	$2\pi r=6,28*(1.30-0.03)=7.98$				
38	7.98	0.060	0.070	8000.00	268.13
	$2\pi r=6,28*(1.30-0.03)=7.98$				
39	7.98	0.030	0.060	8000.00	114.91
Σταθερός κώνος					
	$E=\pi*r*L$				
	r	L	πάχος		
40	1.30	1.680	0.080	8000.00	1397.76
Ελαστικό παρέμβυσμα μετώπης					
	$2\pi r=6,28*(1,30-0.10)=7.54$				
41	7.54	0.20	0.025	1220.00	45.99
Εσωτερικό ελαστικό παρέμβυσμα					
	$2\pi r=6,28*(1,30-0.03)=7.98$				
42	7.98	0.1	0.020	1220.00	19.47
Γωνιακός μειωτήρας 1					
	$V=\pi*r^2*d$				
	r	d			

43	0.25	0.18		7800.00	<b>275.54</b>
	Ατέρμωνας $V=\pi*r^2*d$				
	r	d			
44	0.05	0.3		7800.00	<b>18.37</b>
	Κάλυμα				
	Κύβος ( $\alpha*\alpha*H$ ), $E=4*\alpha*H+2*\alpha^2$				
	$\alpha$	H	d (πάχος)		
45	0.4	0.3	0.03	7800.00	<b>187.20</b>
	Φλάντζα μετάδοσης (άνω της βαλβίδας) ( $E=\pi*R^2-\pi*r^2$ )				
	R	r	d (πάχος)		
46	0.4	0.12	0.04	7800.00	<b>142.64</b>
<b>Γωνιακός μειωτήρας 2</b>					
	Γρανάζι $V=\pi*r^2*d$				
	r	d			
43	0.25	0.18		7800.00	<b>275.54</b>
	Ατέρμωνας $V=\pi*r^2*d$				
	r	d			
44	0.05	0.3		7800.00	<b>18.37</b>
	Κάλυμα				
	Κύβος ( $\alpha*\alpha*H$ ), $E=4*\alpha*H+2*\alpha^2$				
	$\alpha$	H	d (πάχος)		
45	0.4	0.3	0.03	7800.00	<b>187.20</b>
	Φλάντζα μετάδοσης (άνω της βαλβίδας) ( $E=\pi*R^2-\pi*r^2$ )				
	R	r	d (πάχος)		
46	0.4	0.12	0.04	7800.00	<b>142.64</b>
	Άξονας μετάδοσης κίνησης στους γωνιακούς μειωτήρες				
	$V=\pi*r^2*L$				
	Αριστερά				
	r	L			
47	0.03	1.2		7800	<b>26.45</b>
	Δεξιά				
	r	L			
48	0.03	1.2		7800	<b>26.45</b>
	Μειωτήρας σερβομηχανισμού				
49					<b>120</b>
	Κινητήρας σερβομηχανισμού				
					<b>80</b>
<b>Συνολικό βάρος σε κιλά</b>					
	-	-	-	-	<b>21828.82</b>

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η ανάλυση της παροχής της τερματικής βαλβίδας MAN έγινε με χρήση του προγράμματος μαθηματικής ανάλυσης OpenFOAM. Από την ανάλυση αυτή εξήχθη το συμπέρασμα ότι η εν λόγω βαλβίδα έχει δυναμική παροχέτευσης ίση με  $90,48\text{m}^3/\text{sec}$ . Η δυναμική φασματική ανάλυση έγινε με χρήση του προγράμματος μαθηματικής ανάλυσης LISA. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής η βαλβίδα είναι κατηγορίας αντοχής 45 ατμοσφαιρών. Τέλος πραγματοποιήθηκε επιμέτρηση του βάρους της με βάση τις πραγματικές τις διαστάσεις, όπως αυτές καταμετρήθηκαν επί τόπου. Το βάρος της είναι ίσο με 21,83τόνους μαζί με το actuator.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Technical assistance of LISA FEA software (Professor Karl)
- [2] 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου, 2008 Άρθρο 2043 Χωμάτινο Φράγμα Αστερίου : Σεισμική Ανάλυση με “Ακριβείς” και Απλοποιημένες Μεθόδους (ΓΙΩΡΓΟΣ ΓΚΑΖΕΤΑΣ, ΝΙΚΟΣ ΓΕΡΟΛΥΜΟΣ, ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΓΑΡΙΝΗ , ΦΑΝΗ ΓΕΛΑΓΩΤΗ, ΚΑΤΕΡΙΝΑ ΖΙΩΤΟΠΟΥΛΟΥ
- [3] ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8 ΓΙΑΝΝΗΣ Ν. ΨΥΧΑΡΗΣ Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- [4] Ευρωκώδικας 8 (EN1998-1:2004)“Γενικοί Κανόνες, Σεισμικές Δράσεις, Κανόνες Για Κτίρια” Κρίστης Χρυσοστόμου Επίκουρος Καθηγητής Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
- [5] Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance
- [6] Structural Analyses Henrick Sonnerlind
- [7] FEMA Federal Guidelines for Dam Safety Earthquake Analyses and Design of Dams May 2005
- [8] Seed H.B., and Martin G.R. (1966) “The Seismic Coefficient In Earth Dam Design”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 92, pp. 25 – 58
- [9] DEC New York State Guidelines for Design of Dams
- [10] E. Shashi Menon P.E., Pramila S. Menon MBA, in Working Guide to Pumps and Pumping Stations, 2010
- [11] Gabor Takacs PhD, in Sucker-Rod Pumping Handbook, 2015
- [12] Geoff Barker IEng.,MEI., in The Engineer's Guide to Plant Layout and Piping Design for the Oil and Gas Industries, 2018
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics)
- [14] Christos Anastasopoulos The principles of Computational Fluid Dynamics, Atlantic University 2021
- [15] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>
- [16] FIXED-CONE VALVE PROTOTYPE TESTS, FINAL SERIES NEW MELONES DAM, CALIFORNIA (TECHNICAL REPORT HL-84-7 by Timothy L. Fagerburg)