

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ

Μιχάλης Αγγελίδης
Πολιτικός Μηχανικός
AMTE A.E. Τεχνικών Μελετών
Αθήνα
e-mail: amte@otenet.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις είναι συνήθης η χρήση μεταλλικών αγωγών μεγάλης διαμέτρου (π.χ. 2 έως 6 μέτρα). Παραδοσιακά, ο σχεδιασμός των φορέων αυτών γίνεται με χρήση της θεωρίας των ισοδυνάμων δοκών, όπως και στις συνήθεις σωληνώσεις. Οι φορείς αυτοί παρουσιάζουν όμως τις ακόλουθες σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τις συνήθεις σωληνώσεις, γεγονός το οποίο έχει οδηγήσει σε αστοχίες:

Ο λόγος διαμέτρου προς άνοιγμα είναι σημαντικά μεγαλύτερος, ο τρόπος υλοποίησης των στηρίξεων εισάγει ασυμμετρίες και επηρεάζει την εντατική κατάσταση (καθότι συνήθως δεν είναι πρακτικά δυνατό να στηρίζεται όλη η περιφέρεια) και οι θλιπτικές τάσεις οδηγούν σε υβώσεις οι οποίες είναι καθοριστικές για το σχεδιασμό.

Στην παρουσίαση αναλύονται τα προβλήματα αυτά και οι επιπτώσεις τους στο σχεδιασμό των φορέων και των στηρίξεων.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

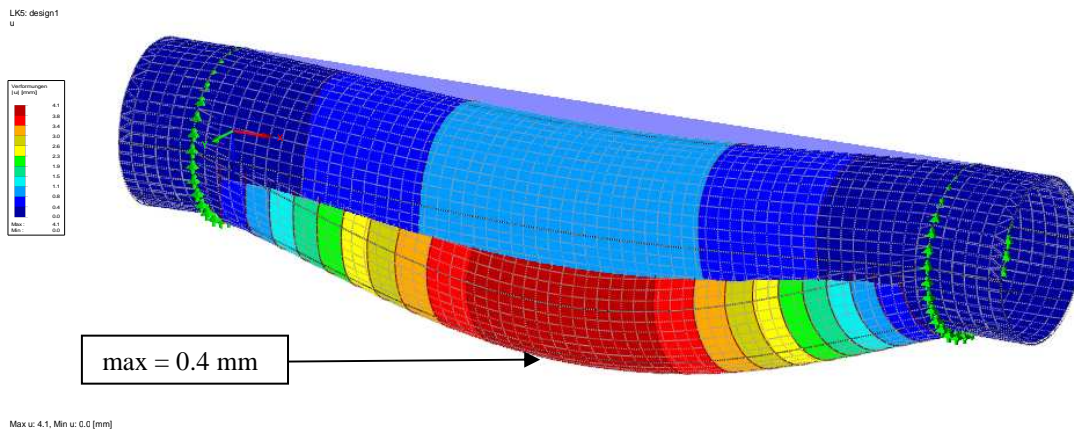
Ο σχεδιασμός των σωληνώσεων γίνεται συνήθως με τη χρήση της θεωρίας των ισοδυνάμων δοκών, με τον πρόσθετο έλεγχο της εσωτερικής πίεσης λειτουργίας. Η αμεσότητα και ευκολία της μεθόδου αυτής οδήγησε στην καθιέρωσή της και σε αγωγούς μεγαλύτερων διαστάσεων διατομής. Οι φορείς αυτοί αντιστοιχούν σε βιομηχανικούς αεραγωγούς ή αγωγούς νερού διαμέτρων που κυμαίνονται συνήθως από 2 έως 6 μέτρα, ενώ σε εγκαταστάσεις αποθείωσης καυσαερίων η διάμετρος μπορεί να υπερβαίνει και τα 8 μέτρα. Είναι προφανές ότι φορείς αυτών των διαστάσεων αντιστοιχούν περισσότερο σε κελύφη παρά σε δοκούς. Η σχέση διαμέτρου προς πάχος σε συνδυασμό με τα συνήθη ανοίγματα μεταξύ στηρίξεων παραπέμπουν σε κελύφη με αυξημένη ευαισθησία σε φαινόμενα τοπικής ή συνολικής αστάθειας.

Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται και αναλύονται τα συνήθη προβλήματα που ανακύπτουν κατά τη χρήση θεωρίας δοκών για το σχεδιασμό αγωγών μεγάλης διαμέτρου. Επισημαίνεται ότι, ιδιαίτερα στην περίπτωση των βιομηχανικών αεραγωγών, οι υψηλές συνήθως θερμοκρασίες λειτουργίας (από 100°C έως και 300°C) οδηγούν σε σημαντικά

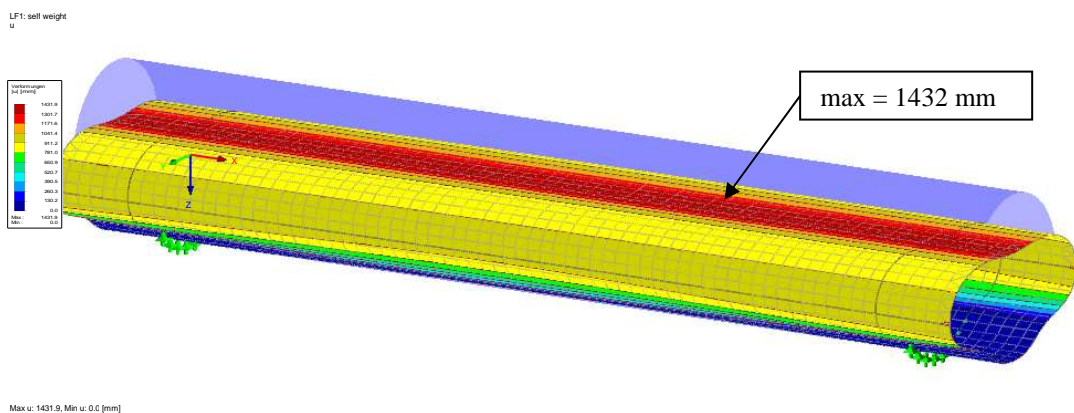
απομειωμένες επιτρεπόμενες τάσεις και απαιτούν αυξημένη ευαισθησία στην ακρίβεια των υπολογισμών.

3. ΤΡΟΠΟΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

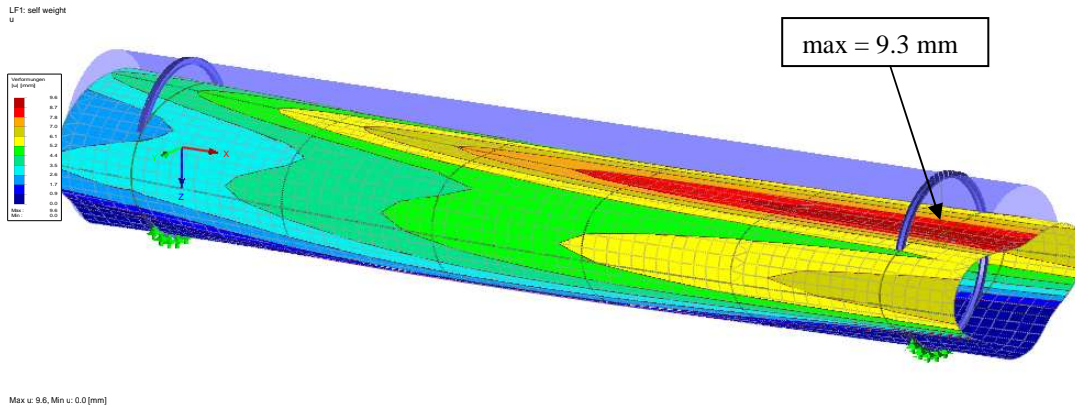
Στις συνήθεις σωληνώσεις (δηλαδή στις σωληνώσεις μικρής διαμέτρου), ο τρόπος στήριξης ανταποκρίνεται στις παραδοχές της θεωρίας των δοκών, καθότι στηρίζεται η πλήρης περιφέρεια του σωλήνα. Σε αγωγούς μεγάλης διαμέτρου, η στήριξη της πλήρους περιφέρειας δεν είναι πάντοτε πρακτικά δυνατή και συνήθως επιλέγεται μερική στήριξη της περιφέρειας σε μορφή «σέλας» (saddle). Η περιορισμένη δέσμευση της περιφέρειας οδηγεί σε απώλεια ευστάθειας για την περίπτωση λεπτοτοιχών αγωγών μεγάλης διαμέτρου και απαιτείται η παροχή πρόσθετης αυξημένης δυσκαμψίας σε όλη την περιφέρεια. Στα ακόλουθα σχεδιαγράμματα απεικονίζονται οι διαφοροποιήσεις των παραμορφώσεων στην περίπτωση περιορισμένης στήριξης της περιφέρειας, καθώς και η σταθεροποιητική επίδραση της αυξημένης δυσκαμψίας στην περιοχή της στήριξης. Οι εικονιζόμενες τιμές αντιστοιχούν σε παραμορφώσεις αγωγού διαμέτρου 6.0 μέτρων, πάχους 5 χιλιοστών και ανοίγματος 30 μέτρων υπό φόρτιση ιδίου βάρους.



Σχ. 1 Απεικόνιση παραμορφώσεων αγωγού με στήριξη σε όλη την περιφέρεια

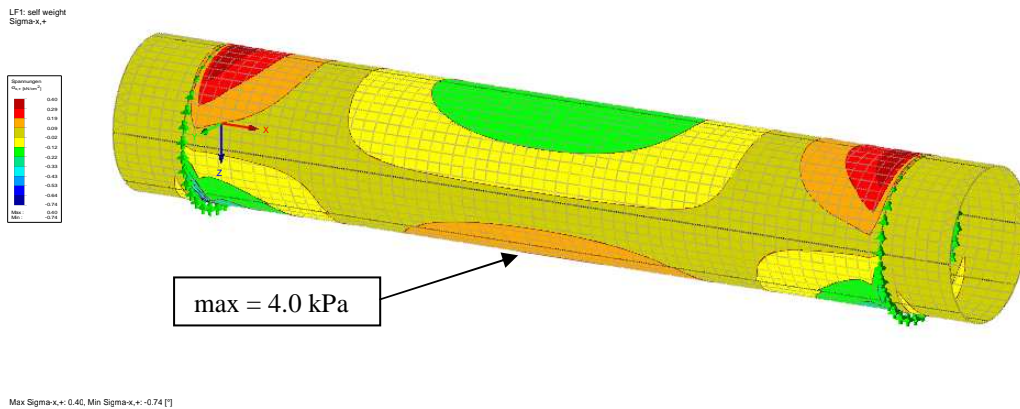


Σχ. 2 Απεικόνιση παραμορφώσεων αγωγού χωρίς ενίσχυση με τμηματική στήριξη της περιφέρειας

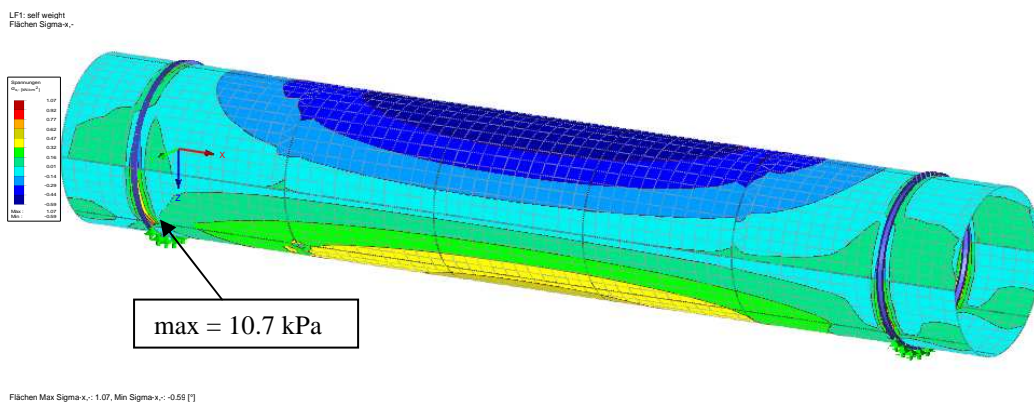


Σχ. 3 Απεικόνιση παραμορφώσεων ενισχυμένου αγωγού με τμηματική στήριξη της περιφέρειας

Επιπλέον, αναπτύσσονται σημαντικές καμπτικές τάσεις στις περιοχές της διακοπής της στήριξης, όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχεδιαγράμματα.



Σχ. 4 Απεικόνιση καμπτικών τάσεων με πλήρη στήριξη περιφέρειας

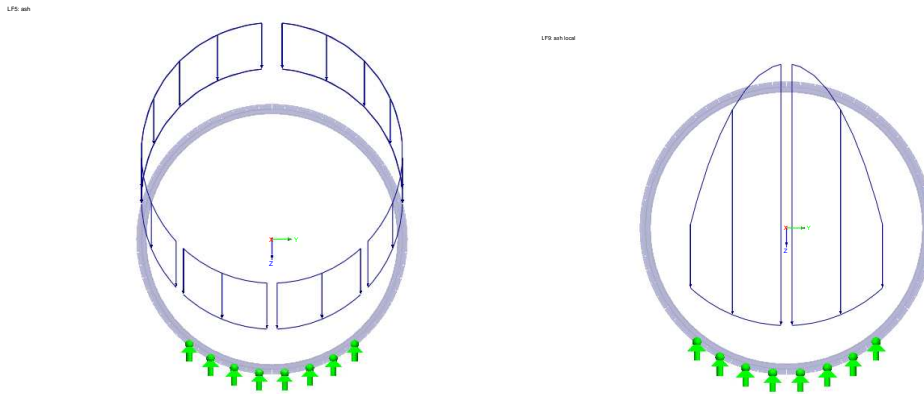


Σχ. 5 Απεικόνιση καμπτικών τάσεων με τμηματική στήριξη περιφέρειας

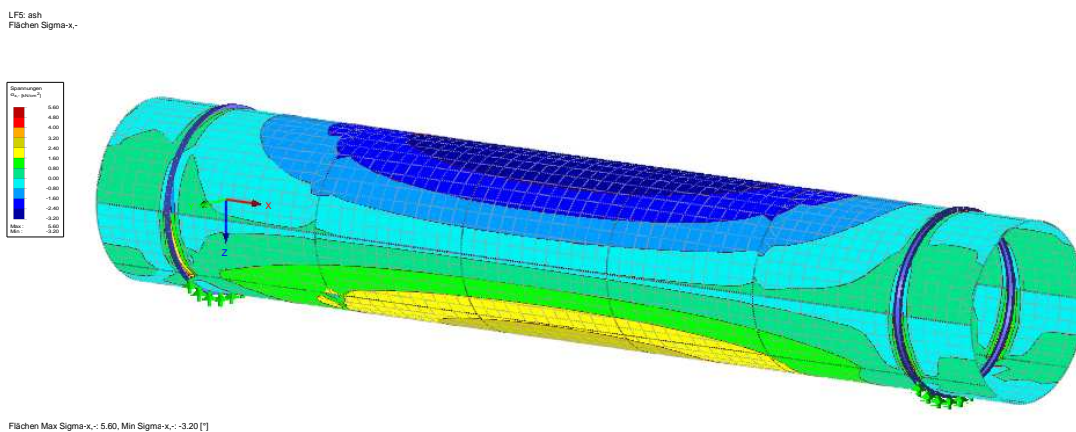
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η χρήση της θεωρίας των δοκών για τον υπολογισμό λεπτοτοιχών αγωγών μεγάλης διαμέτρου οδηγεί σε σημαντική υποεκτίμηση τοπικών φαινομένων, καθοριστικών για την επάρκεια του φορέα.

4. ΤΡΟΠΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΦΟΡΤΙΩΝ

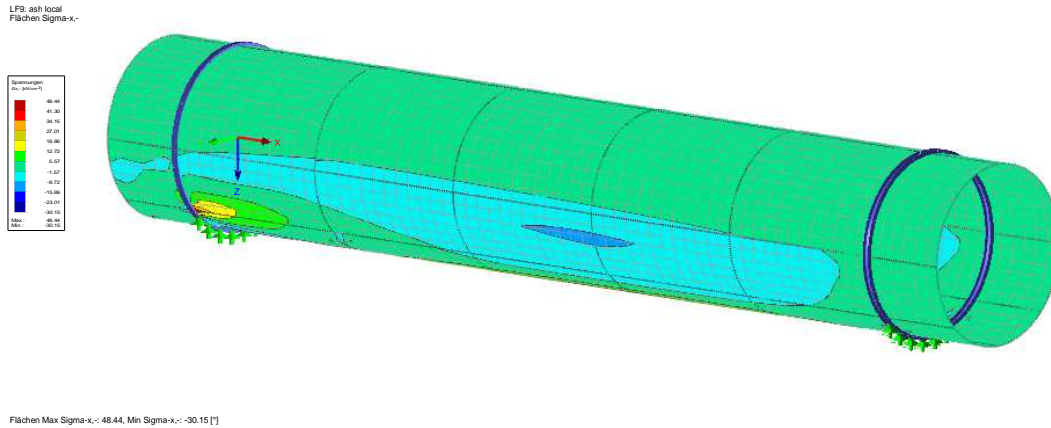
Στις συνήθεις σωληνώσεις ο τρόπος εφαρμογής των φορτίων αφορά σε ολόκληρη τη διατομή και, συνεπώς, ανταποκρίνεται στις παραδοχές της θεωρίας των δοκών. Στους αγωγούς μεγάλης διαμέτρου μόνο τα φορτία που αντιστοιχούν σε ίδιο βάρος, επενδύσεις, θερμοκρασία και πίεση λειτουργίας αντιστοιχούν σε ολόκληρη τη διατομή. Αντιθέτως, φορτίσεις όπως άνεμος, χιόνι και εσωτερικά φορτία λειτουργίας (π.χ. βάρος νερού ή βάρος τέφρας) ασκούνται σε τμήμα της διατομής. Η τοπική εφαρμογή των φορτίων αυτών οδηγεί σε ανάπτυξη καμπτικών τάσεων, οι οποίες είναι συχνά καθοριστικές για το σχεδιασμό του φορέα, λόγω του γεγονότος ότι τα φορτία αυτά έχουν συνήθως τιμές υψηλότερες από τα μόνιμα φορτία. Στα ακόλουθα σχεδιαγράμματα απεικονίζεται η διαφοροποίηση των τάσεων ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του φορτίου. Οι τιμές που απικονίζονται αντιστοιχούν σε φόρτιση συγκέντρωσης τέφρας 40 kN/m κατά μήκος του αγωγού.



Σχ. 6 Απεικόνιση ομοιόμορφης και τοπικής εφαρμογής φορτίου



Σχ. 7 Απεικόνιση καμπτικών τάσεων υπό αξονοσυμμετρική φόρτιση ($max=56 \text{ MPa}$)

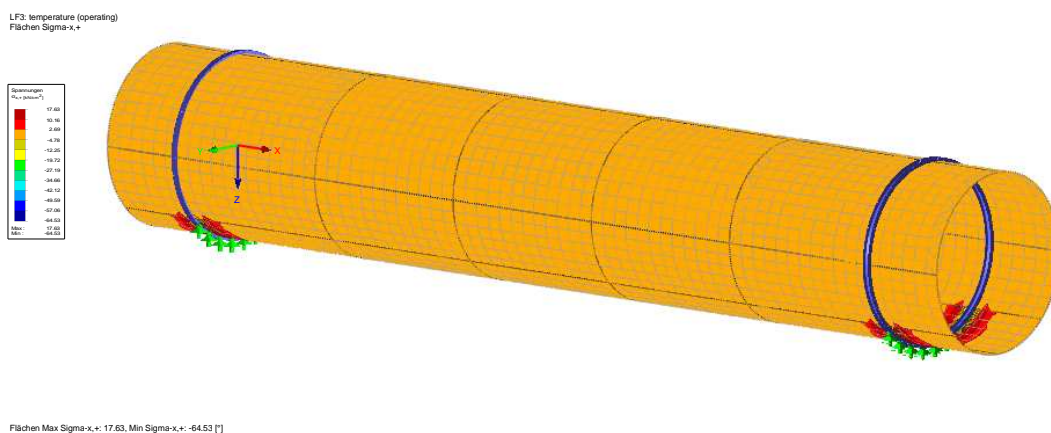


Σχ. 8 Απεικόνιση καμπτικών τάσεων υπό τοπική φόρτιση ($max=484 \text{ MPa}$)

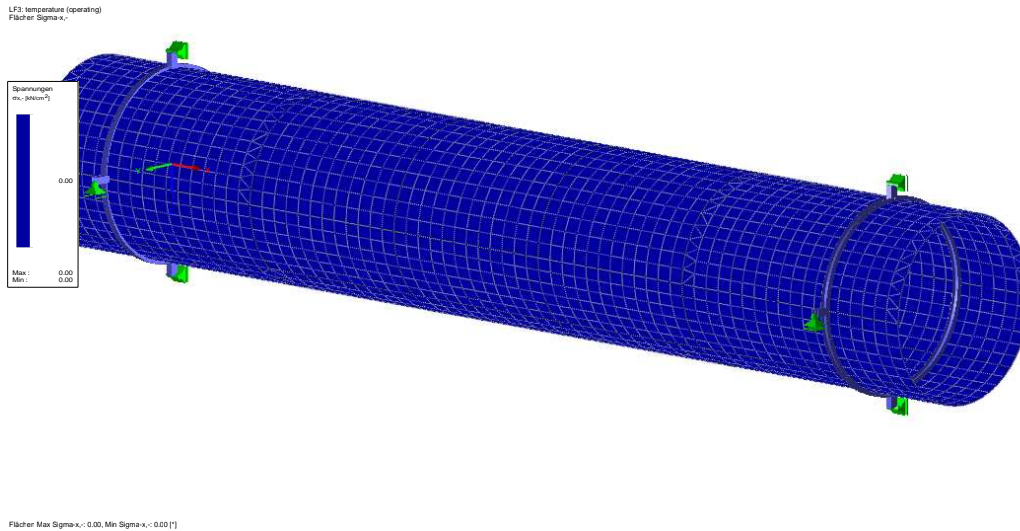
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η χρήση της θεωρίας των δοκών για τον υπολογισμό λεπτοτοιχών αγωγών μεγάλης διαμέτρου οδηγεί σε σημαντική υποεκτίμηση τοπικών φαινομένων, καθοριστικών για την επάρκεια του φορέα.

5. ΦΟΡΤΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Οι αεραγωγοί χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μεταφορά καυσαερίων και ατμού υπό υψηλές θερμοκρασίες (από 100°C έως και 300°C). Οι υψηλές αυτές τιμές έχουν οδηγήσει στην πρακτική να επιλέγονται ισοστατικοί φορείς και να μην διεξάγονται υπολογισμοί υπό θερμικά φορτία, θεωρώντας ότι δεν υφίστανται τάσεις καταναγκασμού. Αυτό ισχύει όταν το σύστημα στήριξης ικανοποιεί τις απαιτήσεις αυτές και στις τρεις διαστάσεις και όχι μόνο στη διεύθυνση του άξονα του αγωγού, όπως θεωρείται συνήθως. Συγκεκριμένα, η συνήθης στήριξη τύπου «σέλας» (saddle) δεσμεύει τη συμμετρική διαστολή της διατομής και εισάγει καμπτικές τάσεις καταναγκασμού υπό θερμικά φορτία. Όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή, οι τάσεις αυτές οδηγούν σε αστοχία του φορέα. Απαιτείται συνεπώς το σύστημα στήριξης του αγωγού να παρέχει ισοστατικότητα και στις τρεις διευθύνσεις. Στα ακόλουθα σχεδιαγράμματα απεικονίζονται οι υψηλές τάσεις που εισάγονται από σύστημα στήριξης τύπου «σέλας» υπό θερμικό φορτίο 200°C καθώς και ένα προτιμότερο ισοστατικό σύστημα.



Σχ. 9 Απεικόνιση καμπτικών τάσεων υπό θερμική φόρτιση ($max=176 \text{ MPa}$)

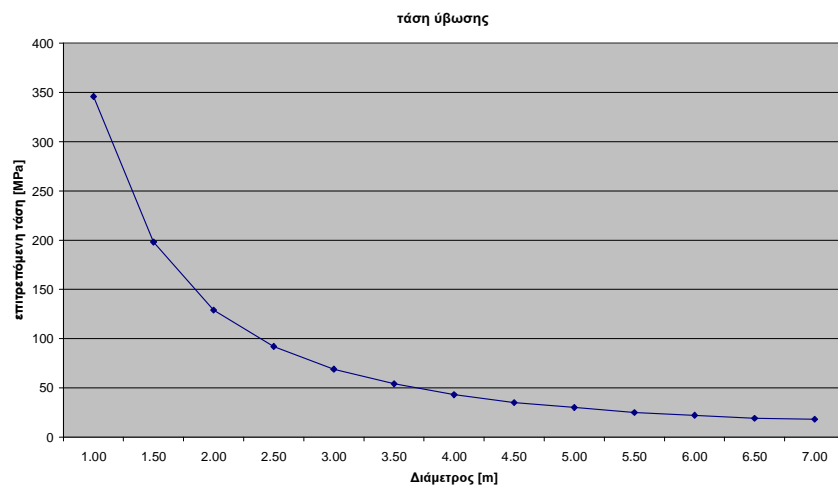


Σχ. 10 Απεικόνιση θερμικών καμπτικών τάσεων με ισοστατική στήριξη

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η επιλογή του συστήματος στήριξης είναι σημαντική στην περίπτωση ύπαρξης υψηλών θερμικών φορτίων και συνιστάται να διεξάγεται υπολογιστικός έλεγχος για να διαπιστωθεί ότι η θερμική απόκριση είναι ικανοποιητική.

6. ΥΒΩΣΗ

Οι λεπτότοιχοι αγωγοί έχουν ιδιαίτερη ευαισθησία σε φαινόμενα αστάθειας, τα οποία περιλαμβάνουν συνολικό λυγισμό του φορέα αλλά και τοπική ύβωση. Ο υπολογισμός των καθοριστικών τάσεων διεξάγεται συνήθως με βάση τους Αμερικανικούς κανονισμούς (π.χ. API Bulletin 2U: Stability Design of Cylindrical Shells). Με δεδομένο ότι οι συντελεστές ασφαλείας είναι συνήθως της τάξης του 2.0, οι επιτρεπόμενες θλιπτικές τάσεις περιορίζονται σε τιμές σημαντικά χαμηλότερες των αντιστοίχων εφελκυστικών. Γενικά, οι τάσεις λυγισμού μειώνονται αισθητά με αύξηση της διαμέτρου, όπως φαίνεται από το ακόλουθο σχεδιάγραμμα, το οποίο συνετάχθη σύμφωνα με τον Κανονισμό API Bulletin 2U και βασίζεται σε ενιαίες παραδοχές σχετικά με το επίπεδο φορτίσεων, τη διάταξη των νευρώσεων, κ.λ.



Σχ. 10 Επιτρεπόμενες θλιπτικές μεμβρανικές τάσεις

Για το λόγο αυτό, συνιστάται να αποφεύγονται μορφές στηρίξεων οι οποίες οδηγούν σε καθολικές θλιπτικές τάσεις.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι λεπτότοιχοι αγωγοί μεγάλης διαμέτρου δεν μπορούν να υπολογίζονται με βάση τη θεωρία των δοκών, καθότι υποεκτιμώνται σημαντικές καμπτικές τάσεις τις οποίες μπορεί να εισάγει ο τρόπος στήριξης και εφαρμογής των φορτίων. Στην περίπτωση ύπαρξης θερμικών φορτίων, πρέπει να επιλέγεται ισοστατικό σύστημα στηρίξεων, το οποίο να αποκλείει την ανάπτυξη τάσεων καταναγκασμού. Τέλος, πρέπει να περιορίζονται οι καθολικές θλιπτικές τάσεις, λόγω της ιδιαίτερης ευαισθησίας των φορέων σε φαινόμενα αστάθειας.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE “Bulletin on Stability Design of Cylindrical Shells”, *API BULLETIN 2U*, 2000.

DESIGN OF LARGE DIAMETER THIN SHELL DUCTS

Michael Angelides
Structural Engineer
AMTE Consulting Engineers
Athens, Greece
e-mail: amte@otenet.gr

SUMMARY

The use of metallic large diameter (e.g. 2 to 6 meters) ducts is common in industrial plants. Traditionally, the design of these structures has been carried out through the use of the theory of equivalent beams, as is the case for common piping. These structures, however, differentiate themselves from common piping in the following areas, a fact which has led to failures:

The ratio of diameter to span is significantly larger, the realization of the support conditions introduces non-symmetrical issues and affects the structural response (since it is not usually realistically possible to support the whole circumference) and compressive stresses may lead to instabilities which are often determining in the design.

The above issues and their effect on the design of such structures and their supports are analyzed in the presentation.