

**ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΔΟΜΙΚΗ
ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΑΓΩΓΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ****Σ. Α. ΚΑΡΑΜΑΝΟΣ, Ε. ΔΑΜΑ, Ε. ΓΙΑΚΟΥΜΑΤΟΣ**

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος 38334

e-mail: skara@uth.gr**A. M. GRESNIGT**

Faculty of Civil Engineering and Geosciences

Delft Univ. of Technology, Delft 2600 GA, The Netherlands

e-mail : a.m.gresnigt@citg.tudelft.nl**1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

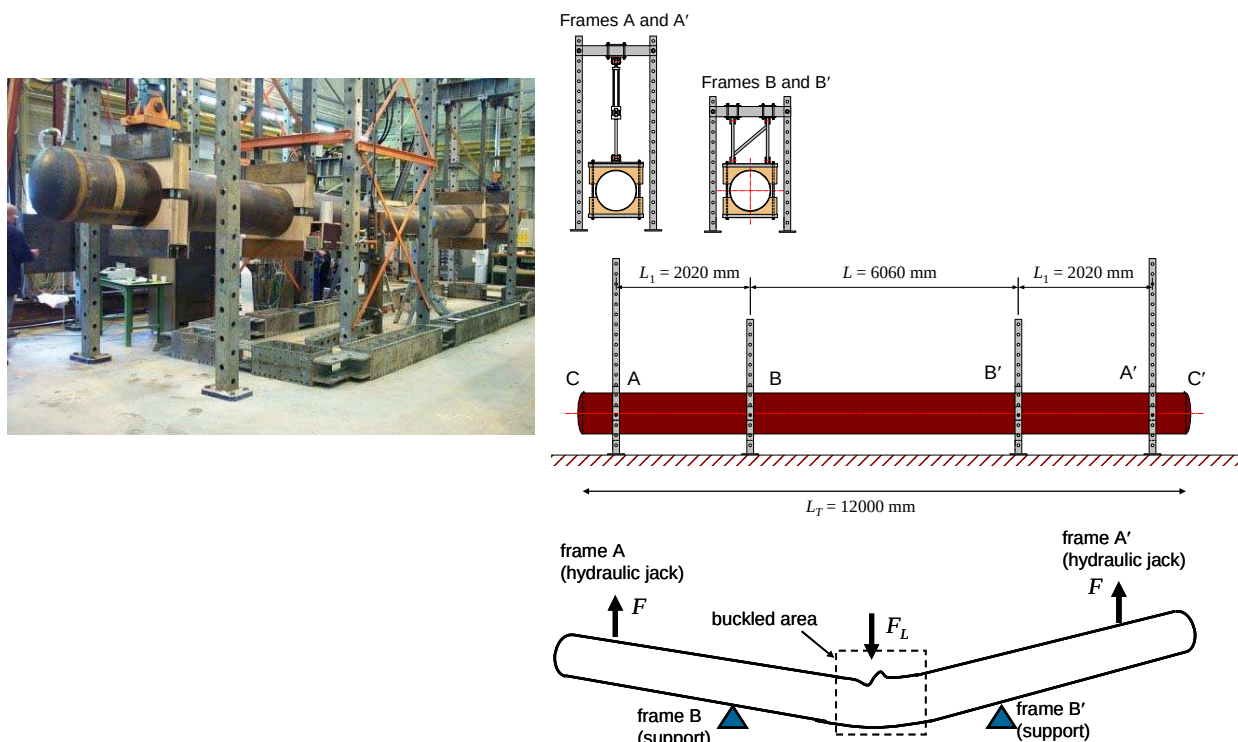
Η εργασία περιγράφει πειραματική και αναλυτική έρευνα ώστε να εκτιμηθεί η δομική αντοχή αγωγών που έχουν υποστεί τοπικό λυγισμό (buckle) εστιάζει δε στην κόπωση (fatigue), καθώς και στην διάρρηξη τοιχώματος λόγω εσωτερικής πίεσης (burst), μέσω τριών πειραμάτων μεγάλης κλίμακας. Η προσομοίωση των πειραμάτων και υπολογισμός των αντίστοιχων μέγιστων παραμορφώσεων στην περιοχή της ύβωσης, επιτρέπει την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής σε κυκλική αστοχία μέσω μίας απλοποιημένης ανάλυσης κόπωσης)

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία εστιάζει στις επιπτώσεις της παρουσίας τοπικών ζημιών στο τοίχωμα υπόγειων μεταλλικών αγωγών λόγω τοπικού λυγισμού (ή κύρτωσης, ή ύβωσης). Η βασική αιτία τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα είναι υπερβολική κάμψη των αγωγών, λόγω διαφορικών καθιζήσεων. Η περιοχή της ύβωσης αποτελεί μία πολύ ευαίσθητη περιοχή λόγω της ανάπτυξης σημαντικών συγκεντρώσεων τάσης, οι οποίες, λόγω επαναλαμβανόμενων φορτίσεων κατά τη λειτουργία του αγωγού (θερμοκρασία και πίεση), υπό κυκλική φόρτιση ενδέχεται να προκαλέσουν κόπωση. Η εργασία αναφέρεται σε πειραματική και αναλυτική διερεύνηση του ανωτέρω φαινομένου, με σκοπό την εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας και την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής. Εκτελέστηκαν τρία πλήρους-κλίμακας πειράματα, σε σωληνωτά δοκίμια διαμέτρου 24 ιντσών. Επίσης τα πειράματα προσομοιώθηκαν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και έγινε πρόβλεψη της αντοχής τους σε κόπωση με τους τύπους Coffin-Manson/Basquin και Miner.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Η πειραματική διερεύνηση περιλαμβάνει τρία μεγάλης κλίμακας πειράματα σε 12-μετρους σωλήνες εξωτερικής διαμέτρου 24 ιντσών (610 mm) και ονομαστικού πάχους 7.9 mm. Το πραγματικό πάχος μετρήθηκε μεταξύ 7.9 and 8.1 mm. Το υλικό είναι API 5L grade B, με τάσεις διαρροής και θραύσης, καθώς μήκυνση θραύσης ίσες με $\sigma_y=313$ MPa, $\sigma_u=492$ MPa, και 40% αντίστοιχα. Το υλικό είναι όλκιμο, με ένα πλαστικό «πλατώ» αμέσως μετά τη διαρροή μέχρι ανηγμένη παραμόρφωση 1.5%.



Εικόνα 1. Πειραματική διάταξη για τα πειράματα μεγάλης κλίμακας και σχηματική απεικόνιση του πρώτου σταδίου του πειράματος

Η εικόνα 1 δείχνει την πειραματική διάταξη κάμψης 4 σημείων, όπου καθορίζεται η κατακόρυφη μετατόπιση u των υδραυλικών κυλίνδρων στα πλαίσια A και A', ενώ τα πλαίσια B and B' εμποδίζουν την κατακόρυφη μετακίνηση. Οι κύλινδροι κινούνται και προς τις δύο διευθύνσεις (πάνω και κάτω) για επιβολή κυκλικής φόρτισης. Στο πρώτο στάδιο, και τα τρία σωληνωτά δοκίμια κάμπτονται έως ότου προκληθεί τοπικός λυγισμός στην κεντρική διατομή. Στη συνέχεια, η κάμψη συνεχίζεται μέχρι ένα επιθυμητό σημείο. Μετά τη δημιουργία ύβωσης και την αποφόρτιση, τοποθετήθηκαν μηνυσιόμετρα σε κατάλληλα σημεία. Στη συνέχεια, μία προδιαγεγραμμένη αλληλουχία φόρτισης ασκήθηκε σε κάθε δοκίμιο. Ειδικότερα,

(α) Στο δοκίμιο 1 (εικόνα 2a, 2b), διατηρώντας σταθερή τη θέση των κυλίνδρων, η εσωτερική πίεση αυξήθηκε στο 1 bar (0.1 MPa). Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερή την πίεση, ασκήθηκε κυκλική φόρτιση κάμψης, με κατάλληλες εναλλασσόμενες μετατοπίσεις Δu των κυλίνδρων. Αρχικά επιβλήθηκαν 102 κύκλοι μεταξύ +30 mm και -20 mm. Στη συνέχεια, ασκήθηκαν δύο κύκλοι μεταξύ +45 mm και -30 mm ($\Delta u = 75$ mm). Τέλος, υποβλήθηκαν 98 κύκλοι φόρτισης μεταξύ +40 mm και -25 mm, μέχρι την αστοχία.

(β) Στο δεύτερο δοκίμιο (εικόνα 2c), μετά την τοποθέτηση των μηνυσιομέτρων, κρατώντας σταθερή τη θέση των κυλίνδρων, επιβλήθηκε πίεση 0.1 MPa (1 bar) και στην συνέχεια αφαιρέθηκε. Στη συνέχεια 2 καμπτικοί κύκλοι επιβλήθηκαν με μετακινήσεις των

κυλίνδρων μεταξύ +20 mm και -10 mm ($\Delta u = 30$ mm) υπό μηδενική πίεση, και 2 ίδιοι καμπτικοί κύκλοι με μετακινήσεις μεταξύ +20 mm και -10 mm ($\Delta u = 30$ mm) για σταθερή πίεση 0.1 MPa. Τέλος, επιβλήθηκαν κύκλοι πίεσης μεταξύ 0.05 MPa και 1.0 MPa. Αστοχία κόπωσης προήλθε μετά από 2658 κύκλους πίεσης. Η μέγιστη τιμή του εύρους της παραμόρφωσης μετρήθηκε ίσο με 0.15%, η δε ρωγμή ήταν πλησίον του σημείου της μέγιστης καμπυλότητας, με διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα του σωλήνα.

(γ) Στο τρίτο δοκίμιο (εικόνα 3a), πέντε μηχανοσυστοιχίες τύπου «ροζέτας» τοποθετήθηκαν στις θέσεις όπου παρουσιάστηκαν αστοχίες κόπωσης στο δεύτερο δοκίμιο. Οι «ροζέτες» μέτρησαν παραμορφώσεις κατά την αξονική, την περιμετρική και την κατά 45° λοξή διεύθυνση. Η αλληλουχία φόρτισης ήταν:

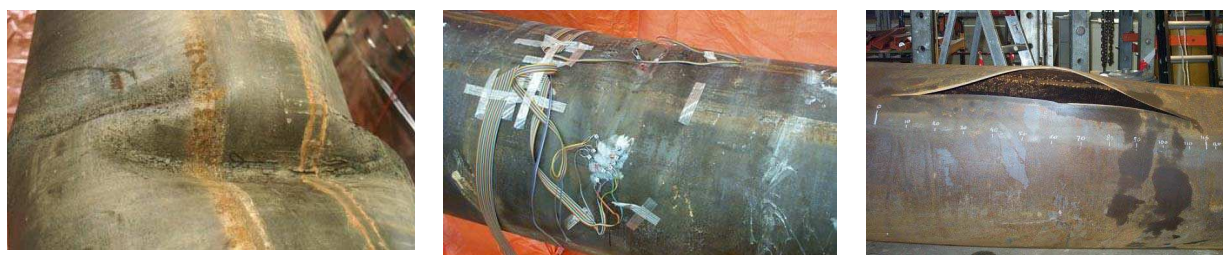
1. Κυκλική φόρτιση πίεσης, μέχρι περίπου το 20% της αναμενόμενης (με βάση το δεύτερο πείραμα) διάρκειας ζωής του σωλήνα. Συγκεκριμένα 500 κύκλοι πίεσης ασκήθηκαν μεταξύ 0.05 and 1.0 MPa διατηρώντας σταθερή τη θέση των υδραυλικών κυλίνδρων.

2. Στη συνέχεια αυξήθηκε η μετατόπιση των κυλίνδρων κατά 50 mm.

3. Τέλος, ασκήθηκε μονοτονικά αυξανόμενη εσωτερική πίεση. Οι πτυχώσεις της ύβωσης βαθμιαία ελαχιστοποιούνταν (Εικόνα 3b) και τελικά ο αγωγός αστόχησε λόγω «διάρρηξης» (burst) του τοιχώματος (Εικόνα 3c) σε μία πίεση 113 bar (11.3 MPa).



Εικόνα 2. (2a) Ύβωση στο δοκίμιο 1 προ της επιβολής κόπωσης και σημεία τοποθέτησης μηχανοσυστοιχιών. (2b) αστοχία δοκιμίου 1 λόγω κόπωσης. (2c) Ύβωση στο δοκίμιο 2, πριν την επιβολή κόπωσης και διάταξη μηχανοσυστοιχιών. Η αστοχία παρατηρήθηκε πολύ κοντά στο μηχανοσυστοιχία e4.



Εικόνα 3. (3a) Ύβωση στο δοκίμιο 3 μετά την επιβολή της κυκλικής φόρτισης. (3b) Οι πτυχώσεις της ύβωσης σχεδόν εξαφανίζονται με την μονοτονική επιβολή πίεσης. (3c) Αστοχία «διάρρηξης τοιχώματος» στο δοκίμιο 3.

Οι μετρήσεις παραμόρφωσης στα δοκίμια έδειξαν πως στις πτυχώσεις της ύβωσης υπάρχουν σημαντικές συγκεντρώσεις τάσεων. Επιπλέον, η περιοχή της ύβωσης είναι πλαστικοποιημένη, και λειτουργεί ως μία περιοχή πλαστικής άρθρωσης, ώστε σχεδόν όλη η καμπτική παραμόρφωση να εστιάζεται στην περιοχή αυτή.

Στην δεύτερη στήλη του Πίνακα 1 δίδεται το εύρος της διαμήκου μετατόπισης $\Delta\epsilon_x$ στις θέσης μέτρησης (Εικόνα 2a) για τον πρώτο κύκλο φόρτισης μεταξύ +30 mm and -20 mm. Η τέταρτη στήλη αναφέρεται στις αντίστοιχες μετρήσεις για +45 mm and -30 mm, ενώ η έκτη στήλη στις μετρήσεις για φόρτιση μεταξύ +40 mm και -25 mm. Η ρωγμή της κόπωσης παρουσιάστηκε στην άκρη της πτύχωσης. Από τον πίνακα 1, η μέγιστη τιμή του εύρους της διαμήκου παραμόρφωσης που μετρήθηκε στους κύκλους ήταν 0.95% και 2.1% για $\Delta u = 50$ mm και $\Delta u = 75$ mm αντίστοιχα (strain gage e2).

Στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 2, παρουσιάζονται οι τιμές του εύρους παραμόρφωσης $\Delta\epsilon_x$ στην διαμήκη διεύθυνση, για το δοκίμιο 2, στις θέσεις των μηχανομετρήσεων. Η βασική παρατήρηση από τις τιμές στους Πίνακες 1 και 2 είναι πως η περιοχή της ύβωσης έχει σημαντικές συγκεντρώσεις παραμόρφωσης, και αυτό δικαιολογεί πως η αστοχία λόγω κόπωσης θα παρουσιαστεί στην περιοχή των πτυχώσεων.

Στο τρίτο πείραμα, η μέγιστη τιμή εύρους περιμετρικής παραμόρφωσης ήταν 5.36×10^{-3} στους δύο πρώτους κύκλους πίεσης μεταξύ 0.05 and 1.0 MPa. Από μετρήσεις σε αρκετά μεταγενέστερους κύκλους η αντίστοιχη τιμή ήταν 4.7×10^{-3} . Η μέγιστη πίεση «διάρρηξης του τοιχώματος» ήταν 11.3 MPa και αντιστοιχεί σε μία ονομαστική τάση $\sigma_\theta = pD/2t$ ίση με 420 MPa, πολύ υψηλότερη της τάσης διαρροής ($\sigma_y = 313$ MPa), φανερώνοντας μία σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν την αστοχία. Επίσης, η αστοχία προκλήθηκε σε σημείο περίπου 1.5 μέτρο μακριά από την περιοχή της ύβωσης. Το βασικό συμπέρασμα είναι πως, όταν το υλικό είναι αρκετά όλκιμο, η παρουσία τοπικού λυγισμού και η επιβολή σημαντικού αριθμού κύκλων κόπωσης σε πίεση, δεν επηρεάζουν την αντοχή σε μονοτονική αύξηση πίεσης [1].

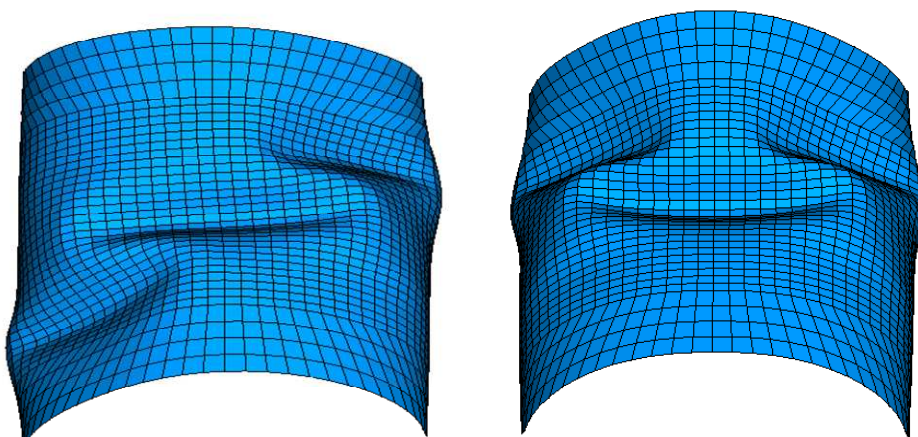
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Ο σωλήνας προσομοιώθηκε με τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης. Η ανάλυση λαμβάνει υπόψη μεγάλες παραμορφώσεις και μετατοπίσεις, καθώς και ανελαστική συμπεριφορά μέσω ενός μοντέλου πλαστικότητας τύπου J_2 von Mises με ιστροπική κράτυνση για μεγάλες παραμορφώσεις. Θεωρήθηκε μία σταθερή τιμή πάχους, ίση με 8.03 mm (μέση τιμή των μετρήσεων). Λόγω της μη-συμμετρίας των δοκιμών, προσομοιώθηκε το συνολικό κυλινδρικό δοκίμιο χωρίς συνθήκες συμμετρίας. Το πλέγμα των στοιχείων ήταν πυκνό στην περιοχή της ύβωσης και πιο αραιό στον υπόλοιπο σωλήνα.

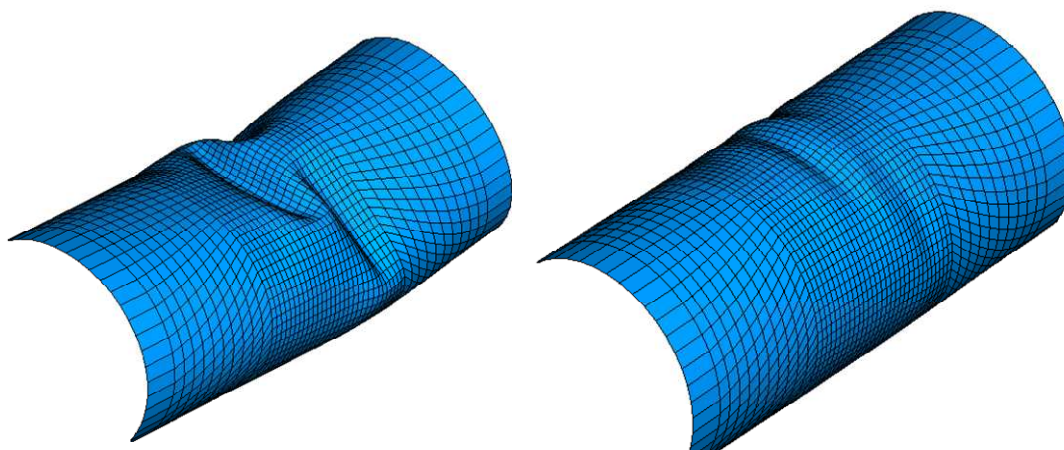
Με τα ανωτέρω υπολογιστικά εργαλεία, προσομοιώθηκε η πειραματική διαδικασία και υπολογίστηκαν οι παραμορφώσεις στην κρίσιμη περιοχή της ύβωσης. Στις διατομές A, B, A', B', στις δύο ακραίες διατομές του σωλήνα (Εικόνα 1), θεωρούνται «κόμβοι αναφοράς» (“reference nodes”) και εφαρμόστηκαν κινηματικές συνθήκες σύζευξης των κόμβων αυτών με τους κόμβους των αντίστοιχων διατομών (“kinematic coupling”). Επίσης, για την καλύτερη σύγκριση των πειραματικών και των αριθμητικών αποτελεσμάτων, λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της τοπικής παραμόρφωσης των ξύλινων αρπαγών στα σημεία A, A', B, B'. Απλοί υπολογισμοί και σύγκριση με τα πειράματα δείχνουν πως η τοπική ευκαμψία των ξύλινων αρπαγών είναι υπεύθυνη για περίπου το 1/3 της συνολικής μετατόπισης των σωλήνα. Επομένως, οι επιβαλλόμενες τιμές μετατόπισης στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στα σημεία A, A' θεωρείται ίση με το 66.7% των αντίστοιχων πειραματικών τιμών.

Με την παραπάνω μεθοδολογία προσομοιώθηκαν τα πειράματα των δοκιμών 1, 2 και 3. Αρχικά τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη 4 σημείων, με επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στους κόμβους αναφοράς στα A and A', και κρατώντας ακίνητους τους κόμβους αναφοράς B and B'. Προσομοιώθηκε επίσης η κατακόρυφη δύναμη F_L που επιβλήθηκε στο τοίχωμα στο μέσον του σωλήνα, για την δημιουργία της ύβωσης (εικόνα 4). Μετά τη δημιουργία της ύβωσης, σε κάθε

δοκίμιο ακολουθήθηκε αλληλουχία φόρτισης παρόμοια με αυτή που επιβλήθηκε πειραματικά. Η τρίτη στήλη του Πίνακα 1 συνοψίζει τις αριθμητικές τιμές $\Delta \varepsilon_x$ στα σημεία των μηγνυσιομέτρων (εικόνα 2a) για τον πρώτο κύκλο φόρτισης, όταν τα A και A' μετατοπίζονται κατά +20 mm και -13.3 mm ($\Delta u_r = 33.3$ mm), που αντιστοιχεί σε μετατόπιση των εμβόλων του πειράματος κατά $\Delta u = 50$ mm. Για τον υπολογισμό αυτό, λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου με τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή. Επίσης, θεωρήθηκε ένας σημαντικός αριθμός από σημεία, ώστε να βρεθεί η θέση όπου το εύρος της παραμόρφωσης είναι μέγιστο.



Εικόνα 4. Μορφές αστοχίας λόγω ύβωσης, με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων, δεξιά, δοκίμια 1 και 2; αριστερά, δοκίμιο 3.



Εικόνα 5. Δοκίμιο 3, αριστερά, προ της επιβολής μονοτονικής πίεσης και, δεξιά, μετά την επιβολή της πίεσης, κοντά στην αστοχία «διάρρηξης τοιχώματος».

Οι τιμές της τρίτης στήλης του Πίνακα 1 είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις πειραματικές τιμές της δεύτερης στήλης. Η πέμπτη στήλη δείχνει τις τιμές της παραμόρφωσης που υπολογίστηκαν για τον πρώτο κύκλο της φόρτισης με μετακίνηση των A και A' μεταξύ +30 mm και -20 mm, ($\Delta u_r = 50$ mm), που αντιστοιχεί σε μετατόπιση των εμβόλων του πειράματος κατά $\Delta u = 75$ mm. Η θέση της ρωγμής προβλέφθηκε επ' ακριβώς με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, η θέση της μέγιστης τιμής του εύρους διαμήκους παραμόρφωσης $\Delta \varepsilon_{x,max}$ ήταν η άκρη της πτύχωσης της ύβωσης, εκεί ακριβώς όπου

παρατηρήθηκε και στο πείραμα (Εικόνα 2b). Η τιμή αυτή ήταν 25.3×10^{-3} για τον δεύτερο κύκλο φόρτισης του δοκιμίου 1 με $\Delta u = 75 \text{ mm}$. Η αντίστοιχη τιμή της $\Delta \varepsilon_{\theta}$ ήταν 5.01×10^{-3} δηλαδή σημαντικά μικρότερη, και αυτό επιβεβαιώνει την διεύθυνση της ρωγμής (Εικόνα 2b). Στον Πίνακα 2, οι υπολογιστικές τιμές $\Delta \varepsilon_x$ για τους αρχικούς καμπτικούς κύκλους είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Η μέγιστη τιμή του εύρους της παραμόρφωσης για τους κύκλους της πίεσης ήταν $\Delta \varepsilon_{\theta, \max} = 2.12 \times 10^{-3}$ και η θέση του ήταν στην περιοχή όπου και πειραματικά αστόχησε το σωλήνας. Η αντίστοιχη τιμή της αξονικής παραμόρφωσης ήταν $\Delta \varepsilon_x = -0.84 \times 10^{-3}$, δηλαδή περίπου 40% της περιμετρικής. Τέλος η αριθμητική προσομοίωση του δοκιμίου 3 έδειξε πως οι πτυχώσεις μειώνονται σε μέγεθος και σε μεγάλες τιμές της πίεσης έχουν σχεδόν εξαφανιστεί (εικόνα 5). Η κατανομή της πλαστικής παραμόρφωσης γίνεται βαθμιαία πιο ομοιόμορφη, ώστε η διάρρηξη του τοιχώματος να μην συμβαίνει κατ' ανάγκη στην περιοχή της ύβωσης.

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ

Χρησιμοποιήθηκε ο τύπος των Basquin και Coffin-Manson [2], που συνδέει το επιβαλλόμενο εύρος παραμόρφωσης $\Delta \varepsilon$ με τον αριθμό κύκλων ως την αστοχία N

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \quad (1)$$

όπου σ'_f λαμβάνεται ως η οριακή αντοχή του υλικού (εδώ 492 MPa), ε'_f λαμβάνεται ως η οριακή μήκυνση του υλικού (εδώ 40%), και οι εκθέτες b και c θεωρούνται ίσοι με -0.18 και -0.7 αντίστοιχα [3]. Οι προβλέψεις της (1) εκφράζονται σε σχέση με το συντελεστή βλάβης λόγω κόπωσης D_F , από τον τύπο του Miner:

$$D_F = \sum_{i=1}^{NP} \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

όπου N_i είναι ο αριθμός των κύκλων μέχρι την αστοχία για ένα συγκεκριμένο τύπο φόρτισης (σταθερού εύρους) (i), NP είναι ο συνολικός αριθμός των τύπων φόρτισης που περιέχονται στο υπόψη φάσμα φόρτισης, n είναι ο αριθμός των επιβαλλόμενων κύκλων φόρτισης για τον τύπο (i) στην υπόψη κατασκευή.

Στο δοκίμιο 1, έχουμε $NP = 3$: 102 κύκλοι με $\Delta u = 50 \text{ mm}$, 2 κύκλοι με $\Delta u = 75 \text{ mm}$ και 98 κύκλοι με $\Delta u = 65 \text{ mm}$ μέχρι την αστοχία. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων έδειξε πως οι αντίστοιχες αξονικές παραμορφώσεις $\Delta \varepsilon_x$ είναι 10.9×10^{-3} , 25.3×10^{-3} and 15.5×10^{-3} για Δu ίσο με 50 mm, 75 mm και 65mm αντίστοιχα. Για αυτές τις τιμές παραμόρφωσης, η εφαρμογή της (1) δίνει τιμές κύκλων κόπωσης N_i ίσες με 287, 78 and 164 αντίστοιχα (Πίνακας 3). Επομένως, ο τύπος του Miner (2) δίνει

$$D_F = \frac{102}{287} + \frac{2}{78} + \frac{98}{164} = 0.98 \quad (3)$$

	$\Delta u = 50 \text{ mm}$		$\Delta u = 75 \text{ mm}$		$\Delta u = 65 \text{ mm}$	
Σημείο μέτρησης	$\Delta \varepsilon_x$ Exp. $\times 10^{-3}$	$\Delta \varepsilon_x$ FEM $\times 10^{-3}$	$\Delta \varepsilon_x$ Exp. $\times 10^{-3}$	$\Delta \varepsilon_x$ FEM $\times 10^{-3}$	$\Delta \varepsilon_x$ Exp. $\times 10^{-3}$	$\Delta \varepsilon_x$ FEM $\times 10^{-3}$
e1	6.1	6.5	14.1	9.9	11.8	7.3
e2	9.5	9.3	21.0	14.4	-	10.9
e3	9.4	9.3	19.0	14.4	-	10.9
e4	7.3	7.1	18.5	10.9	-	7.6
e5	5.8	5.4	14.5	8.6	12.0	6.6
Μέγιστη $\Delta \varepsilon_x$	-	10.9	-	25.3	-	15.5

Πίνακας 1. Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα για το εύρος της παραμόρφωσης λόγω κυκλικής καμπτικής φόρτισης (πρώτος κύκλος φόρτισης).

Θέση μέτρησης	$\Delta \varepsilon_x$ Exp. ($\times 10^{-3}$)	$\Delta \varepsilon_x$ FEM. ($\times 10^{-3}$)
e1	5.6	6.1
e2	2.4	3.6
e3	2.1	3.5
e4	3.4	3.6
e5	5.9	6.1
Μέγιστη $\Delta \varepsilon_x$	-	8.9

Πίνακας 2. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και πειραματικών δεδομένων για τις τιμές εύρους παραμόρφωσης για κυκλική καμπτική φόρτιση ($\Delta u = 30 \text{ mm}$) στο δοκίμιο 2 (πρώτος κύκλος φόρτισης).

Μία πιο συνεπής πρόβλεψη οφείλει να περιλαμβάνει και τις υπόλοιπες συνιστώσες του τανυστή των παραμορφώσεων, την περιμετρική ορθή παραμόρφωση και την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta \varepsilon_\theta$ και $\Delta \varepsilon_{x\theta}$ αντίστοιχα). Αυτό γίνεται μέσω της θεώρησης της ισοδύναμης διαφορικής παραμόρφωσης $\Delta \varepsilon_q$:

$$\Delta \varepsilon_q = \sqrt{(\Delta \varepsilon_x)^2 + (\Delta \varepsilon_\theta)^2 - \Delta \varepsilon_x \Delta \varepsilon_\theta + 3(\Delta \varepsilon_{x\theta})^2} \quad (4)$$

αντί της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης $\Delta \varepsilon_x$. Για το δοκίμιο 1, οι τιμές των $\Delta \varepsilon_\theta$, $\Delta \varepsilon_q$ δίνονται στον πίνακα 3. Εφαρμογή των (1) και (2) δίνει:

$$D_F = \frac{102}{245} + \frac{2}{65} + \frac{98}{139} = 1.15 \quad (5)$$

Οι ανωτέρω δύο τιμές του D_F δείχνουν πως για το συγκεκριμένο δοκίμιο χρησιμοποιώντας είτε την μέγιστη $\Delta \varepsilon_x$ είτε την μέγιστη $\Delta \varepsilon_q$, έχουμε μία πολύ καλή πρόβλεψη του πειραματικού αποτελέσματος για το δοκίμιο 1. Για το δεύτερο δοκίμιο, μόνον οι κύκλοι της πίεσης λαμβάνονται υπόψη ($NP = 1$). Οι υπολογισμοί πεπερασμένων στοιχείων δείχνουν πως

για μεταβολή της πίεσης μεταξύ 0.05 MPa και 1 MPa, η μέγιστη τιμή του εύρους της περιμετρικής παραμόρφωσης $\Delta\epsilon_{\theta, \max}$ είναι ίση με 2.12×10^{-3} . Με την τιμή αυτή, και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1), προβλέπεται μία διάρκεια ζωής 5190 κύκλων, που αντιστοιχεί σε μία τιμή του συντελεστή κόπωσης D_F ίση με $2658/5197=0.51$, και είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την πραγματική αντοχή σε κόπωση. Η πρόβλεψη αυτή μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά αν ληφθεί υπόψη η πολυ-αξονικότητα της εντατικής κατάστασης, χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση $\Delta\epsilon_q$, όπως αυτή ορίζεται στην εξίσωση (4). Στην προκείμενη περίπτωση, οι τιμές των $\Delta\epsilon_x$ και $\Delta\epsilon_{x\theta}$ έχουν υπολογιστεί ίσες με -0.84×10^{-3} και 0.77×10^{-3} αντίστοιχα, καταλήγοντας σε $\Delta\epsilon_q = 2.96 \times 10^{-3}$. Από την εξίσωση (1), αυτή αντιστοιχεί σε μία διάρκεια ζωής ίση με 2682 κύκλους, που αποτελεί μία πολύ καλύτερη πρόβλεψη ($D_F = 2658/2682=0.99$).

Δu (mm)	n_i	$\Delta\epsilon_x$ ($\times 10^{-3}$)	N_i λόγω $\Delta\epsilon_x$	$\Delta\epsilon_{\theta}$ ($\times 10^{-3}$)	$\Delta\epsilon_{x\theta}$ ($\times 10^{-3}$)	$\Delta\epsilon_q$ ($\times 10^{-3}$)	N_i λόγω $\Delta\epsilon_q$
30	102	10.9	287	-1.7	1.2	12.0	245
75	2	25.3	78	-5.0	2.8	28.5	65
65	98	15.5	164	-2.7	1.7	17.3	139

Πίνακας 3. Αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και αντίστοιχες διάρκειες ζωής για το πρώτο δοκίμιο.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Gresnigt, A.M., Foeken R.J. van, Chen S.L., (1996), “Effect of Local Buckling on Burst Pressure.” *Proceedings, 6th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE)*. Los Angeles, CA, Vol. II. pp. 80-88.
- [2] Suresh, S. (1998), *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [3] Dowling, N. E. (1993), *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice-Hall International, Englewood Cliffs, NJ.

FAILURE OF LOCALLY BUCKLED PIPELINES

S. A. Karamanos¹, E. Dama, E. Giakoumatos

Department of Mechanical & Industrial Engineering
University of Thessaly, Volos 38334, Greece

¹email: skara@uth.gr

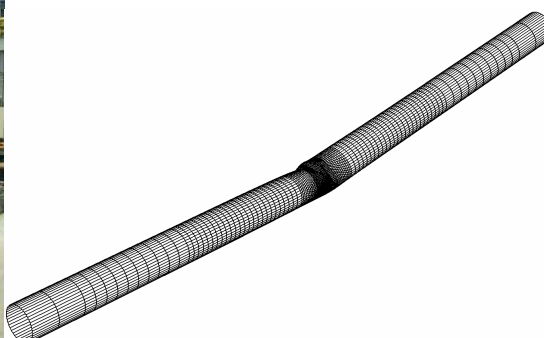
A. M. Gresnigt²

Faculty of Civil Engineering and Geosciences
Delft University of Technology, Delft GA 26000, The Netherlands

²email: a.m.gresnigt@citg.tudelft.nl

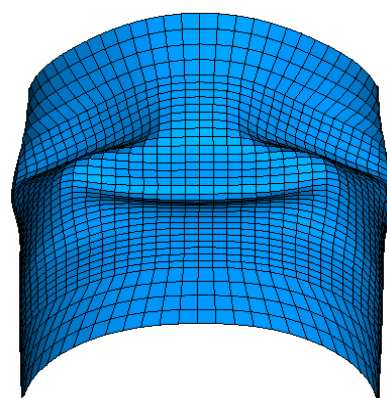
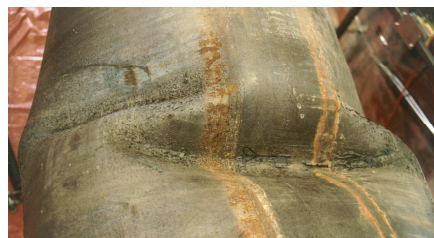
ABSTRACT

Pipelines may exhibit structural failure because of damage due to external interference (mechanical damage) or corrosion. In particular, local buckles in the form of sharp dents on the pipeline wall, caused by excessive imposed bending, are associated with significant stress and strain concentrations at the dented area, and constitute a possible threat for the structural integrity of pipelines. The present work describes experimental and numerical research conducted to examine the influence of local buckles on the fatigue strength and on the burst capacity of steel pipelines.



The study described in the present paper examines the structural integrity of steel pipelines with sharp (kinked) dents in the form of local buckles due to excessive pipeline bending. In particular, the paper investigates the reduction of structural capacity in buckled steel pipelines, subjected to bending loads and internal pressure, towards estimating the remaining operating life and strength. In the presence of buckles, the pipeline can still fulfill its transportation function, provided that the steel material is adequately ductile and no cracks occur. However,

the buckled area is associated with significant strain concentrations and, in the case of repeated loading (e.g. variations of internal pressure or temperature), cracks may develop, leading to fatigue failure. Furthermore, because of the high strain concentrations at the buckled area, burst capacity of pressurized buckled pipes may also be affected. It is noted that the present work has been motivated by the detection of local buckles in a 24-inch pipeline crossing a river near Rotterdam, The Netherlands, as a result of imposed bending due to uneven soil settlement.



The present paper is aimed primarily at investigating the fatigue failure of buckled pipes, using experimental testing, and finite element simulation. Furthermore, the burst capacity of buckled pipelines is also examined and discussed. The experimental investigation consists of three full-scale 24-inch buckled pipe specimens, tested under several loading conditions. Two specimens are tested under repeated loading (bending and pressure) and the third specimen, after the application of a considerable number of pressure cycles, is subjected to monotonically increased pressure until burst. Finite element simulations are also carried out using nonlinear elastic-plastic shell elements. The numerical analyses enable the calculation of local strain variations at critical locations, so that the experimental measurements are verified and explained. In addition, using the finite element tools, an extensive parametric study is conducted to examine the influence of several parameters, namely the depth and the type of the buckle, the pipe diameter-to-thickness ratio, and the effect of biaxial stress state due to the presence of pressure. The numerical results are presented in the form of strain concentration factors (SNCF). The paper emphasizes on the local effects due to the presence of buckles, towards a more reliable “fitness-for-purpose” assessment of buckled pipelines.