



## ΔΡΑΣΗ: «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

### ΤΙΤΛΟΣ:

«Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών  
για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών»

4916-ENSSTRAM

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Καθ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ**

### ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (Ε.Ε.) 7

*Βιβλιογραφική επισκόπηση υπόγειων αγωγών*

### ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 7.1:

*Τεχνική έκθεση βιβλιογραφικής επισκόπησης υπόγειων αγωγών*

2014



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης







NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

9 Iroon Polytechniou Str., GR-15780, Zografou, Greece

## PROJECT: «ARISTEIA II»

TITLE:

«Novel design concepts for ENERGY related Steel  
STRUCTURES using Advanced Materials»

4916-ENSSTRAM

Research Coordinator: Prof. C. GANTES

WORK PACKAGE (W.P.) 7

*Literature survey for underground pipes*

DELIVERABLE 7.1:

*Technical report of the literature survey for underground pipes*

2014



European Union  
European Social Fund



MINISTRY OF EDUCATION & RELIGIOUS AFFAIRS, CULTURE & SPORTS  
MANAGING AUTHORITY

Co-financed by Greece and the European Union



EUROPEAN SOCIAL FUND



## Summary

---

### I. General

This literature survey deals with new construction methodologies for underground pipelines in areas where large Permanent Ground Displacement (PGD) are expected, as is the case with displacements imposed by the activation of seismic faults. Despite the fact that PGD constitutes the most common cause of failure for underground pipes, the existing “conventional” methodologies do not suffice, since their beneficial effect either depletes for relatively small PGDs up to one or two diameters (e.g. replacement of steel type, soil-pipe friction reduction, ditch widening, increase of pipe wall thickness), or their cost increases disproportionately when applied for larger PGDs (e.g. construction of external culvert).

While searching for alternative methodologies that allow the safe and economic design of pipelines under large PGD, the following categories of solutions have been found and evaluated:

- Use of **flexible joints** so as to localize the greater part of the applied strains on them, rather than on the rest of the pipe.
- Use of **polymer plastic materials (plastic or composite pipes)**, that will be able to safely withstand larger strains.
- Use of **ultra-flexible pipes**, which will have the ability to follow closely the ground movement without rupture, thus minimizing extension and compression strains on the remaining steel parts of the pipeline.

The main assumptions and conclusions obtained from the literature survey are summarized below.

### II. Evaluation criteria for the alternative construction methodologies

The use of alternative configurations or pipe materials for the design of underground pipes under large PGD, is both an economical and technical problem. The main evaluation criteria for the feasibility of the various alternative methodologies can be categorized as:

**i) Design criteria.**\_ In order to constitute an acceptable construction method in areas of large PGD, the new configuration or pipe material should:

- Have **the ability to safely transfer natural gas and oil under high pressures (~8.0-10.0MPa)**, since those are the usual pressures that are being used for transmission systems.
- Sustain the effects of the fault activation, while **significantly reducing the extension and compression strains developing to the rest of the pipeline.**

It should be noted that, among the “conventional” design methodologies, only the construction of an external culvert can satisfy adequately these criteria, although increasing significantly the construction cost.

**ii) Construction criteria.**\_ Another important aspect for the evaluation of the alternative methodologies is their applicability in the field, and more specifically:

- **How much time is required and how difficult it is to construct the necessary parts of the alternative design or to place them** (if they come pre-constructed) in the field.
- **How complicated and safe it is to connect the new parts with the rest of the pipe**, beyond the active fault area.

**iii) Procurement criteria.**\_ The last category of criteria that was evaluated is the commercial availability of the alternative configurations or materials and more specifically:

- **Whether they are available at the common pipe diameters** which are used for the transportation of natural gas and oil (D=18” - 40”).
- Whether the alternative configurations or materials **are currently commercially available or if they can be readily constructed and acquired on order.**
- **What is the cost of the alternative design**, in comparison to the cost of the standard steel pipe design.

### **III. Evaluation of the alternative configurations and pipe materials**

Taking into account the aforementioned criteria, a comparative evaluation has been conducted for the various examined design methodologies of underground pipes

imposed to large PGD. The main findings and conclusions are summarized in Table I and are briefly discussed below:

#### **“Conventional” methodologies:**

**Construction of external concrete culvert.**\_ This solution is currently the only design methodology that is applicable in the case of very large PGDs (i.e. larger than 1.5-2.0D). The methodology satisfies all aforementioned criteria, but it’s main disadvantage is that it requires the construction of a concrete culvert, which may become significant in size, depending on the pipe diameter, the expected PGD value and the uncertainty of the actual fault crossing. Thus, the resulting cost and construction difficulties may be disproportional to the anticipated benefits.

#### **Installation of flexible joints:**

**“Bellows” type flexible joints.**\_ Today, there are commercially available “bellows” type flexible joints that satisfy most requirements of pipe diameter and internal working pressure capacity, thus being applicable for mid/high-pressure natural gas or oil transportation lines. These joints have large flexibility in axial, lateral or angular distortion, thus, when properly placed, they can significantly reduce the strains developing in the rest of the pipe. Installation of these joints is fairly easy, with simple welding of the joints with the rest parts of the pipe. Furthermore they constitute a relatively inexpensive solution, with a cost that slightly exceeds this of the simple steel pipes.

**Simple slide joints.**\_ Similar conclusions can be expressed for the simple slide joints, regarding the availability, the construction convenience and the cost. Those joints, if properly designed and placed, can undertake the applied axial displacements of the pipe, thus reducing the extension and compression strains that develop in the neighboring parts of the pipe. Nevertheless, their effect is expected to be less than this of “bellows” type joints due to fact that these joints cannot reduce the developing bending strains. In addition, if not placed at the proper positions along the pipe, they may increase, rather than reduce, the developing axial strains (O’Rourke & Liu 1994, 2012).

#### **Replacement of the pipe material:**

**Plastic pipes (PVC, HDPE, etc.).**\_ Plastic pipes are in general more flexible in comparison with steel pipes, have sufficient ductility, and exhibit very good performance in areas of large PGDs, as has been proven experimentally (e.g. Ha et al. 2008a, 2008b, 2010, Abdoun et al. 2008, 2009). Nevertheless, plastic pipes cannot be used as an alternative methodology for the construction of mid/high pressure natural gas or oil pipelines, due to the associated relatively low tensile strength.

**Fiber Reinforced Pipes (FRP).**\_ Fiber reinforced materials may exhibit very large strength values along the fibers while pipes of every size and of any internal working pressure can be constructed. The basic drawback of such pipes is that their response is brittle in mid and large strains (~1.5-3.5%). In addition, the joints between the pipe parts and their connection to the steel sections of the main pipe may form weak links.

**Composite Reinforced Line Pipes (CRLP).**\_ CRL pipes are common steel pipes that have been strengthened externally by a layer of fiber reinforced polymer material (FRPs). Due to their increased pipe wall thickness, they exhibit better behavior than steel pipes regarding the hoop stresses from internal pressure and buckling resistance. This solution is recommended for the strengthening of existing pipelines, but it is considered an expensive and complex solution, with small beneficial effect, for problems of large permanent deformations.

**Steel strip laminated pipes (SSLP).**\_ SSL pipes are essentially multiple layered FRP pipes with the addition of helical steel reinforcement. They are commercially available at the desirable diameters and internal working pressures. Nevertheless, despite the lack of analytical data concerning their mechanical response, it is considered that the intensely brittle behavior of the FRP material is prohibitive for their use under large PGDs.

**Steel reinforced plastic pipes.**\_ Despite the fact that this category of pipes has been developed in order to enhance the mechanical characteristics of simple plastic pipes, their capacity to sustain middle or high internal pressures remains low.

**Ultra-flexible "Onshore" pipes.**\_ The ultra-flexible "onshore" pipes can easily follow the ground displacements due to the fault rupture, thus applying minimal strains to the rest of the pipe. Their internal working pressure capability is also adequate for high-pressure pipelines, while their installation and transportation to the field is very fast and easy. The main problem of this type of pipes is that the commercially available pipe diameters are very small ( $D < 6''$ ), which is prohibitive for their use in connection with common oil and natural gas transportation pipelines ( $D = 18'' - 40''$ ).

**Ultra-flexible "Offshore" pipes.**\_ This pipe category has the same advantages with the previous one and, at the same time, the available range of diameters is quite large ( $D < 20''$ ). Still, they are mainly used for offshore applications and they are considered too expensive for the purpose of this study.



**Table I: Evaluation of alternative methodologies for the design of underground pipelines under large permanent ground displacements**

A/A	ALTERNATIVE DESIGN METHOD	DESIGN DEMANDS			CONSTRUCTION CRITERIA		SUPPLY CRITERIA		
		P <sub>INT</sub>	EXTENSION EFFECT	COMPRES. EFFECT	FIELD CONSTRUCTION	CONNECTION WITH PIPE	D <sub>max</sub>	AVAILABILITY	COST*
1	"Sacrificial" external culverts	OK	LARGE	LARGE	DIFFICULT**	N/A	NO LIMIT	LARGE	LARGE**
2	Flexible joints "Bellows"	OK	LARGE	LARGE	EASY	EASY	>40"	REASONABLE	MID
3	Flexible slip joints	OK	MID	SMALL	EASY	EASY		REASONABLE	MID
4	Plastic pipes (HDPE, PVC, etc.)	LOW	MID	MID	EASY	MID	NO LIMIT	LARGE	MINIMAL
5	Complex Pipes FRP	OK	?***	?***	EASY	MID	NO LIMIT	LARGE	MID
6	Complex Pipes CRL	OK	MID	LARGE	DIFFICULT	EASY	NO LIMIT	REASONABLE	LARGE
7	Complex Pipes SSL	OK	?***	?***	EASY	EASY	>40"	REASONABLE	LARGE
8	Steel reinforced plastic pipes	LOW	MID	MID	EASY	MID	>40"	REASONABLE	MID
9	Ultra-flexible "Onshore" pipes	OK	LARGE	LARGE	EASY	EASY	<6"	MINIMAL	LARGE
10	Ultra-flexible "Offshore" pipes	OK	LARGE	LARGE	EASY	EASY	<20"	MINIMAL	HIGH

\* The cost has been characterised as minimal, reasonable, large and high when it is smaller, almost equal, larger or very larger from the cost of simple steel pipe, respectively.

\*\* The cost and construction difficulties increase with the culvert diameter and the predictable fault displacement.

\*\*\* The pipes constructed from FRP materials may present larger strength values from steel, but their intense brittle behavior when reaching the yield limit is considered inadequate for use in problems of applied deformation such as the one examined.

#### IV. Conclusions & Proposals

Taking into account the previous comments, it is concluded that **the use of flexible joints along the pipeline** in areas of large expected PGDs, **constitute the most eligible (technically and economically) alternative methodology**, from those examined for the design of the underground pipelines at active fault crossings, **both for the scope of this research project and for the future application of the methodology in designs of this type.**

Hence, in order to evaluate the commercially available flexible joints and to purchase the required joints for the experiments that will be carried out under Work Package 9 of this research project, offers have been requested from HKS Company group, US Bellows Inc., BOA Group και Eagleburgmann Group, that construct such flexible joints.



## Περιεχόμενα

---

Περιεχόμενα .....	1
<b>1. Εισαγωγή .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Σχεδιασμός Υπόγειων Αγωγών υπό Μόνιμες Εδαφικές Μετακινήσεις.....</b>	<b>5</b>
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Επιβαλλόμενες και επιτρεπόμενες τάσεις και παραμορφώσεις.....	6
2.3 Συμβατικές μεθοδολογίες αντιμετώπισης εδαφικών μετατοπίσεων .....	7
2.4 Συμπεράσματα .....	10
<b>3. Εύκαμπτοι Κόμβοι .....</b>	<b>13</b>
3.1 Εισαγωγή.....	13
3.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	14
3.3 Εμπορικά Διαθέσιμοι Εύκαμπτοι Κόμβοι .....	18
3.3.1 Απλοί κόμβοι ολισθησης ( <i>Slip expansion joints</i> ).....	18
3.3.2 Κόμβοι τύπου «σφαίρας» με -ή χωρίς- ικανότητα επιμήκυνσης ( <i>Expansion/Ball joints</i> ).....	19
3.3.3 Εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows».....	20

3.3.4	Σύνθετοι κόμβοι .....	22
<b>4.</b>	<b>Αγωγοί Πολυμερών και Σύνθετοι Αγωγοί.....</b>	<b>23</b>
4.1	Εισαγωγή.....	23
4.2	Πλαστικοί Αγωγοί (PVC, HDPE, PVDF, κτλ.).....	26
4.3	Σύνθετοι Αγωγοί .....	29
4.3.1	Αγωγοί με ινώδη όπλιση ( <i>Fiber Reinforced Pipes</i> ) .....	30
4.3.2	Αγωγοί σύνθετης διατομής ( <i>CRLP, SSLP, κτλ.</i> ).....	34
<b>5.</b>	<b>Υπέρ-Εύκαμπτοι Αγωγοί .....</b>	<b>38</b>
5.1	Εισαγωγή.....	38
5.2	Υπέρ-Εύκαμπτοι Αγωγοί τύπου «Ανοιχτής Θάλασσας».....	38
5.3	Υπέρ-Εύκαμπτοι Αγωγοί τύπου «Ξηράς».....	42
<b>6.</b>	<b>Εκτενής Περίληψη - Συμπεράσματα.....</b>	<b>44</b>
6.1	Γενικά.....	44
6.2	Κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών μεθοδολογιών .....	45
6.3	Αξιολόγηση εναλλακτικών μεθοδολογιών και υλικών κατασκευής.....	46
6.4	Συμπεράσματα & Προτάσεις.....	49
	<b>Βιβλιογραφικές Αναφορές.....</b>	<b>51</b>

## Εισαγωγή

---

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί παραδοτέο του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο:

### ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

#### Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)

που πραγματοποιείται κάτω από το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις δράσεις που προδιαγράφονται στην **Ενότητα Εργασίας Ε.Ε. 7**, με τίτλο:

#### *«Βιβλιογραφική επισκόπηση υπόγειων αγωγών»*

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 7**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

*«Θα γίνει εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση καλύπτοντας θέματα σχετικά με το σχεδιασμό υπόγειων αγωγών υπό μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις (π.χ. κατολισθήσεις ή ενεργοποίηση σεισμικών ρηγμάτων), τη χρήση εύκαμπτων κόμβων σε υπόγειους αγωγούς και τους κόμβους από πολυμερή υλικά. Όπως και στην ΕΕ1, θα αναζητηθούν οι τελευταίες εξελίξεις σε αριθμητικές και πειραματικές μεθόδους για συναφή προβλήματα».*

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται αναλυτικά το υπό εξέταση πρόβλημα και οι υπάρχουσες συμβατικές μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση του.

Στο **Κεφάλαιο 3** διερευνάται η δυνατότητα παρεμβολής εύκαμπτων κόμβων στην περιοχή που αναμένονται μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις για τη συγκέντρωση σε αυτούς των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων και στροφών.

Στο **Κεφάλαιο 4** εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών υλικών για την κατασκευή του αγωγού, όπως τα πολυμερή ή τα σύνθετα υλικά, προκειμένου να επιτευχθεί βελτιωμένη συμπεριφορά του αγωγού.

Στο **Κεφάλαιο 5** μελετάται η δυνατότητα αντικατάστασης του αγωγού στην περιοχή ενδιαφέροντος με υπέρ-εύκαμπτους αγωγούς, οι οποίοι μπορούν να ακολουθήσουν τις εδαφικές μετακινήσεις χωρίς να αναπτύσσονται πρόσθετες παραμορφώσεις.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της παρούσας βιβλιογραφικής αναδρομής.

Οι εργασίες που περιγράφονται έχουν πραγματοποιηθεί με τη συνεισφορά των παρακάτω μελών της **Ερευνητικής Ομάδας**:

- Γεώργιος Μπουκοβάλας, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αλέξανδρος Βαλαμής, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Χαράλαμπος Γαντές, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Στυλιανός Βερνάρδος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αριστομένης Τσαντίλης, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Γρηγορία-Πολυξένη Ζαράκη, Πολιτικός Μηχανικός Δομικών Έργων

## Σχεδιασμός Υπόγειων Αγωγών υπό Μόνιμες Εδαφικές Μετακινήσεις

---

### 2.1 Γενικά

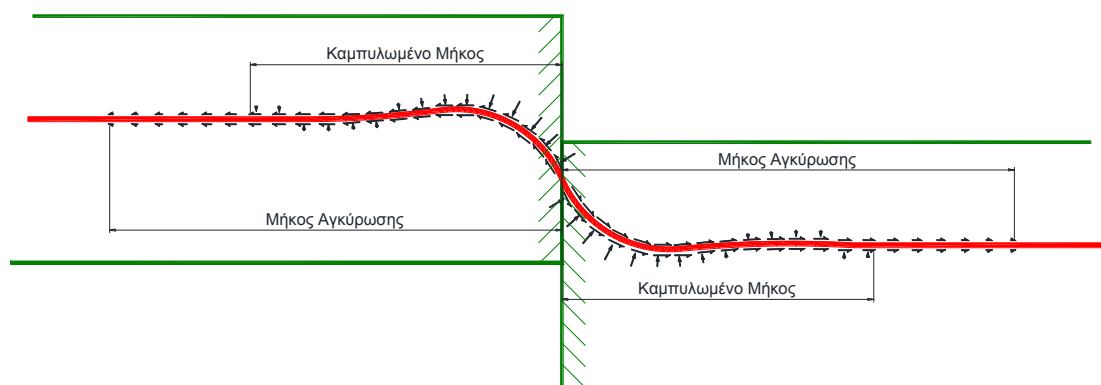
Οι σεισμικά επιβαλλόμενες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, όπως αυτές που προκαλούνται από τη διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων, την οριζόντια εξάπλωση ρευστοποιημένων εδαφών ή τις κατολισθήσεις (κυκλικές ή επίπεδες εδαφικές αστοχίες), αποτελούν ίσως τον πιο σοβαρό κίνδυνο που αντιμετωπίζουν οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι αγωγοί είναι κατασκευές πολύ μεγάλου μήκους και κατά συνέπεια, είναι σχεδόν αδύνατο η χάραξη τους να μη διασχίζει ρηξιγενείς ζώνες ενεργών ρηγμάτων ή περιοχές με πιθανές εδαφικές αστοχίες (κατολισθήσεις, οριζόντια εξάπλωση). Επιπλέον, οι εν λόγω μετατοπίσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μετακινήσεις λόγω απλά της σεισμικής δόνησης, χωρίς αστοχία του εδάφους.

Από τις διάφορες αιτίες μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων, η παρούσα βιβλιογραφική έρευνα θα επικεντρωθεί στο σχεδιασμό υπόγειων αγωγών έναντι μετατοπίσεων που οφείλονται σε διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων, διότι είναι οι μοναδικές που δεν μπορούν να αποφευχθούν αντιμετωπίζοντας τις ίδιες τις αιτίες της αστοχίας (π.χ. με τοπική βελτίωση ή ενίσχυση των εδαφών, εφαρμογή δικτύου αποστράγγισης, εφαρμογή μεθόδου αντιστήριξης, κτλ), αλλά πρέπει να αναληφθούν από τον σχεδιασμό του ίδιου του αγωγού.

Πρέπει να σημειωθεί εκ προοιμίου ότι το σύνολο των δικτύων μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου (υψηλής πίεσης) και η πλειοψηφία των δικτύων διανομής (μέσης πίεσης) κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα και κατά συνέπεια, όλες οι υπάρχουσες μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό υπόγειων αγωγών υπό μόνιμες μετατοπίσεις, αναφέρονται σχεδόν αποκλειστικά σε αυτό το υλικό κατασκευής.

## 2.2 Επιβαλλόμενες και επιτρεπόμενες τάσεις και παραμορφώσεις

Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1 οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που επιβάλλονται στον αγωγό, κατά τη διάρρηξη ενός ρήγματος οριζόντιας διάρρηξης (strike-slip). Όπως γίνεται αντιληπτό, ο αγωγός καμπυλώνεται προκειμένου να ακολουθήσει την μετακίνηση του εδάφους, με αποτέλεσμα να ασκούνται σε αυτόν εγκάρσιες δυνάμεις από το περιβάλλον υλικό επίχωσης της τάφρου (επιβαλλόμενες επί του "καμπυλωμένου μήκους"), ενώ ταυτόχρονα επιμηκύνεται, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής στη διεπιφάνεια αγωγού και εδάφους (επιβαλλόμενες επί του "μήκους αγκύρωσης"). Ο συνδυασμός των δυνάμεων αυτών επιβάλλει στο περιμετρικό τοίχωμα του αγωγού θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις, και κατά συνέπεια παραμορφώσεις.



**Σχήμα 2.1:** Επιβαλλόμενες δυνάμεις στον αγωγό κατά τη διάρρηξη ρήγματος οριζόντιας κατεύθυνσης.

Δεδομένου ότι ο σεισμός επιβάλλει μετατοπίσεις και όχι δυνάμεις στους αγωγούς, γίνεται κατανοητό ότι η σεισμική καταπόνηση του αγωγού αποτελεί πρόβλημα *Ελεγχόμενης Παραμόρφωσης* και όχι *Ελεγχόμενης Τάσης*. Είναι επομένως αποδεκτό, σε περιπτώσεις σημαντικών εδαφικών μετατοπίσεων όπως αυτές που επιβάλλονται λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων, οι τάσεις του αγωγού να μπορούν να υπερβούν το όριο διαρροής, στο βαθμό που οι αντίστοιχες παραμορφώσεις παραμένουν εντός των επιτρεπόμενων ορίων, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

**Όριο εφελκυστικής παραμόρφωσης αστοχίας.** Ο χάλυβας κατασκευής των αγωγών είναι δυνατόν να υποστεί έως και **2% εφελκυστικές παραμορφώσεις χωρίς** να υποστεί θραύση. Για παράδειγμα, η επιτρεπόμενη εφελκυστική παραμόρφωση που προδιαγράφεται από τον Ευρωπαϊκό Αντισεισμικό Κανονισμό EC-8 για υπόγειους αγωγούς είναι 5%, και αντιστοιχεί σε τάσεις λίγο μόνον μεγαλύτερες της επιτρεπόμενης τάσης του υλικού στη μέγιστη θερμοκρασία ( $S_B$ ).

Το όριο αυτό δε θεωρείται όμως αποδεκτό για τμήματα αγωγών με επιτόπου περιμετρικές συγκολλήσεις, λόγω των πιθανών μεταβολών που προκαλεί η συγκόλληση στη δομή και στις ιδιότητες του χάλυβα. Έτσι, **στις θέσεις περιμετρικής**



**συγκόλλησης η επιτρεπόμενη εφελκυστική παραμόρφωση μπορεί να μειωθεί έως και την τιμή  $\varepsilon_{all,t}=0.5\%$** , η οποία σύμφωνα με τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων Ramberg & Osgood για τους συνήθεις χάλυβες των αγωγών αντιστοιχεί σε επιτρεπόμενη εφελκυστική τάση ίση προς  $0.92S_h$  περίπου.

**Όριο θλιπτικής παραμόρφωσης αστοχίας.**— Οι κύριες μορφές θλιπτικής αστοχίας ενός αγωγού είναι δύο: ο αγωγός μπορεί να λυγίσει ως δοκός και να αναδυθεί στην επιφάνεια του υλικού επίχωσης (γενικός, καθολικός λυγισμός – global buckling), ή να λυγίσει ως κέλυφος με τοπική «ρυτίδωση» (κοινώς τσαλάκωμα) του τοιχώματος του (τοπικός λυγισμός – local buckling).

Η δεύτερη μορφή αστοχίας είναι η πλέον επικίνδυνη, δεδομένου ότι μπορεί να οδηγήσει σε ρηγμάτωση του χάλυβα, και ως εκ τούτου καθορίζει συνήθως τη μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική παραμόρφωση του αγωγού. Προσεγγιστικά, η οριακή θλιπτική παραμόρφωση έναντι ελαστο-πλαστικού λυγισμού του τοιχώματος του αγωγού, μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της εξωτερικής διαμέτρου του (D) και του πάχους του τοιχώματος (t) από τη σχέση της ALA-ASCE (2001), συντηρητικά εφαρμοζόμενη για μηδενική εσωτερική πίεση:

$$\varepsilon_{all,c} (\%) = 0.84 - 0.0035 \frac{D}{t} \quad 2.1$$

Εναλλακτικά, σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα EC-8 (EN-1998.04) για υπόγειους αγωγούς, η οριακή αυτή παραμόρφωση μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση:

$$\varepsilon_{all,c} (\%) = 40.0 \frac{t}{D} < 5.0\% \quad 2.2$$

Με βάση τις σχέσεις 2.1 και 2.2 προκύπτει ότι, για τις συνήθεις διατομές χαλύβδινων αγωγών που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά καυσίμων ( $D=40 - 110\text{cm}$  &  $t=8.0 - 25.0\text{mm}$ ), **οι επιτρεπόμενες θλιπτικές παραμορφώσεις κυμαίνονται από 0.40% έως 1.00%**.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ το προαναφερθέν όριο εφελκυστικών παραμορφώσεων του  $\varepsilon_{all,t}=0.5\%$  μπορεί να αυξηθεί με κατάλληλη βελτίωση των μεθόδων επιτόπου κατασκευής και ελέγχου της συγκόλλησης, δεν ισχύει το ίδιο για το όριο θλιπτικών παραμορφώσεων λόγω λυγισμού, το οποίο δε μεταβάλλεται.

### 2.3 Συμβατικές μεθοδολογίες αντιμετώπισης εδαφικών μετατοπίσεων

Οι συνήθεις «συμβατικές» μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το αν ο κύριος μηχανισμός με τον οποίο προσπαθούν να περιορίσουν την επιβαλλόμενη παραμόρφωση στον αγωγό, αποσκοπεί στην απομείωση της τριβής μεταξύ εδάφους και αγωγού, στην ενίσχυση του αγωγού ή

στην απομείωση/μηδενισμό των επιβαλλόμενων περιορισμών σε εγκάρσιες μετατοπίσεις του αγωγού στην περιοχή της διάρρηξης.

**Απομείωση των δυνάμεων τριβής στη διεπιφάνεια εδάφους και αγωγού.**\_ Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η συμμετοχή μεγαλύτερου τμήματος του αγωγού στη σχετική ολίσθηση και κατά συνέπεια περιορίζεται η επιβαλλόμενη ανηγμένη παραμόρφωση ανά μέτρο μήκους του αγωγού. Οι συνήθεις μεθοδολογίες για την απομείωση της αναπτυσσόμενης τριβής μεταξύ εδάφους και αγωγού, περιλαμβάνουν:

- Την χρήση ειδικών επιστρώσεων στον αγωγό ή την κάλυψη του αγωγού εξωτερικά με ειδικά γεω-υφάσματα, τα οποία εμφανίζουν μικρό συντελεστή τριβής με την επιφάνεια του αγωγού.
- Την τοποθέτηση του αγωγού σε μικρότερο βάθος από ότι συνήθως ή τη χρήση ελαφροβαρών υλικών (π.χ. ελαφρόπετρα) για την πλήρωση της τάφρου, προκειμένου να μειωθούν οι επιβαλλόμενες γεωστατικές τάσεις στον αγωγό και κατά συνέπεια να μειωθεί η τριβή επίχωσης-αγωγού. Η μέθοδος αυτή είναι πιο αποτελεσματική από την προηγούμενη, επειδή ταυτόχρονα μειώνει και την αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους του αγωγού (η οποία είναι συνάρτηση των γεωστατικών τάσεων), και κατά συνέπεια τις επιβαλλόμενες εγκάρσιες δυνάμεις κατά την αστοχία του ρήγματος.

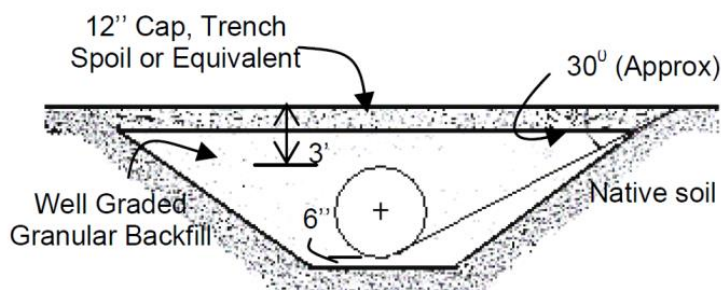
**Αύξηση της αντοχής του αγωγού.**\_ Με την αύξηση της αντοχής του αγωγού περιορίζεται η αναπτυσσόμενη ανηγμένη παραμόρφωση στο τοίχωμα του, για τις ίδιες επιβαλλόμενες μετακινήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει:

- Την αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού και κατά συνέπεια της ροπής αντίστασης της διατομής και των αντίστοιχων καμπτικών παραμορφώσεων.
- Την αλλαγή του είδους του ανοξειδωτου χάλυβα που χρησιμοποιείται, π.χ. από API 5L grade X65 σε grade X70, κτλ. Το μέτρο αυτό, έχει βέβαια μικρή σχετικά αποτελεσματικότητα δεδομένου του χαρακτήρα των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων (δηλ. επιβαλλόμενες μετατοπίσεις και όχι δυνάμεις).

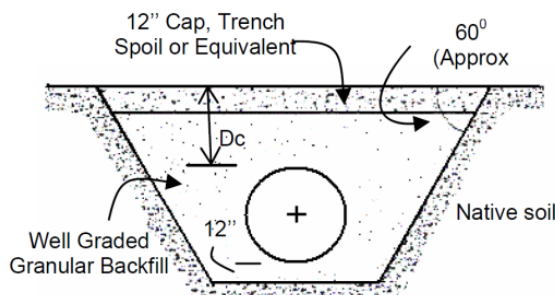
**Απομείωση/μηδενισμός των περιορισμών εγκάρσιας μετακίνησης του αγωγού.**\_ Οι μεθοδολογίες που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία αποσκοπούν στον περιορισμό της αλληλεπίδρασης του αγωγού με το υλικό επίχωσης, έναντι εγκάρσιων (κατακόρυφων ή οριζόντιων) μετατοπίσεων, με αποτέλεσμα να περιοριστούν και οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Οι συνήθεις μεθοδολογίες που εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνουν:

- Τη διεύρυνση της τάφρου του αγωγού στην περιοχή της ρηξιγενούς ζώνης, προκειμένου να περιοριστεί η επιρροή του, κατά κανόνα, ανθεκτικότερου μητρικού εδάφους, στη δυνατότητα μετατόπισης του αγωγού. Οι διαστάσεις της τάφρου διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του ρήγματος όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 2.2.

- Την αντικατάσταση του υλικού πλήρωσης της τάφρου με χαμηλής αντοχής υλικά (crushable materials).
- Την προστασία του αγωγού με την κατασκευή εξωτερικά ενός υπόγειου «θυσιαζόμενου» κιβωτίου (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα κατάλληλου πλάτους, εντός του οποίου ο αγωγός είναι ελεύθερος να κινηθεί. Κατά τη διάρρηξη του ρήγματος, το κιβώτιο παραλαμβάνει τις μετακινήσεις και αστοχεί, ενώ ο αγωγός μένει ανεπηρέαστος.
- Την τοποθέτηση του αγωγού στην επιφάνεια του εδάφους, σε μικρής αντοχής επίχωμα ή στηρίγματα, εκμηδενίζοντας, ουσιαστικά, τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις λόγω της μετατόπισης του εδάφους. Σε περιπτώσεις που αναμένονται μεγάλες μετατοπίσεις ο αγωγός δύναται να τοποθετηθεί και σε ολισθαίνουσες ράγες.



(α)



(β)

**Σχήμα 2.2:** Προτεινόμενες διαστάσεις τάφρου για (α) ρήγμα οριζόντιας διάρρηξης και (β) ανάστροφο ρήγμα (Dijkers et al. 1996 – NIST 1996).

**Οδηγίες & Κανονισμοί.** Στους περισσότερους κανονισμούς και οδηγίες (π.χ. ASCE 1984, FEMA 233 1992, EN1998-4:2003) προτείνεται εξ αρχής η χάραξη και τοποθέτηση του αγωγού να γίνει με τέτοια διεύθυνση ως προς το ρήγμα, έτσι ώστε, κατά τη διάρρηξη του ρήγματος, να προκαλείται αποκλειστικά εφελκυσμός ή τουλάχιστον να περιοριστούν αισθητά οι αναμενόμενες θλιπτικές παραμορφώσεις.

Επιπροσθέτως, τμήμα των προαναφερόμενων μεθοδολογιών έχουν υιοθετηθεί από την ASCE (1984), σύμφωνα με την οποία, για την περίπτωση διασταύρωσης του αγωγού με ενεργό ρήγμα, προτείνονται ως εναλλακτικές μέθοδοι να γίνει η τοποθέτηση του:

- σε επίχωμα μικρής αντοχής, στην επιφάνεια του εδάφους.
- σε υπερμεγέθεις τάφρους και επίχωση με χαμηλής αντοχής (crushable materials) ή επιλεγμένο υλικό πλήρωσης.
- σε υπερμεγέθη υπόγεια κιβώτια (culverts).
- σε ολισθαίνουσες ράγες στην επιφάνεια του εδάφους.

Αντίστοιχα, στον Ευρωκώδικα (EN1998-4:2003) προτείνεται, πέρα από τον περιορισμό των θλιπτικών παραμορφώσεων:

- Η ελαχιστοποίηση του πάχους επίχωσης του αγωγού.
- Η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού σε απόσταση μέχρι και 300m μακριά από τη θέση διασταύρωσης με το ενεργό ρήγμα.
- Η απομείωση της γωνίας τριβής στη διεπιφάνεια αγωγού και εδάφους, με χρήση σκληρής επίστρωσης στον αγωγό.
- Η εφαρμογή χαλαρού μη-συνεκτικού υλικού, χωρίς λάτυπες ή κροκκάλες, για την επίχωση του αγωγού πλησίον του ρήγματος (έως και 300m μακριά από τη θέση διασταύρωσης). Αν το υλικό επίχωσης απέχει σημαντικά από το προτεινόμενο, απαιτείται η χρήση υπερμεγέθων τάφρων σε απόσταση περίπου 15m μακριά από το ρήγμα.
- Η αποφυγή ύπαρξης απότομων αλλαγών της διεύθυνσης και του υψομέτρου της χάραξης σε περιοχές πιθανής εδαφικής μετατόπισης.

## 2.4 Συμπεράσματα

Από τη σύντομη ανασκόπηση που προηγήθηκε προκύπτει ότι υπάρχουν αρκετές μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό αγωγών έναντι των μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων που προκαλούνται κατά την διάρρηξη τεκτονικών ρηγμάτων. Θα πρέπει να γίνει όμως κατανοητό ότι οι μέθοδοι αυτές δεν έχουν την ίδια απόδοση, ενώ υπόκεινται και σε αρκετούς περιορισμούς, κυρίως σε συνάρτηση με οικονομικά ή τεχνικά κριτήρια. Σύμφωνα με την αναμενόμενη επιρροή τους στην απομείωση των παραμορφώσεων του αγωγού, οι εν λόγω μέθοδοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως:

### Μέθοδοι μικρής επιρροής:

- 2.4.1. Η αντικατάσταση του είδους του χάλυβα με πιο ισχυρό (π.χ. API 5L X65 σε X70). Συνήθως το αυξημένο κόστος του υλικού είναι δυσανάλογο με την ευμενή επιρροή της μεθόδου.
- 2.4.2. Οι μέθοδοι για την μείωση της τριβής της διεπιφάνειας εδάφους-αγωγού, οι οποίες επηρεάζουν μόνο τις εφελκυστικές δυνάμεις λόγω της επιμήκυνσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι αυτοί μειώνουν τις εφελκυστικές παραμορφώσεις αλλά, ταυτόχρονα, δύνανται να αυξήσουν τις θλιπτικές.

- 2.4.3. Την εφαρμογή διευρυμένης τάφρου ανάλογης με την αναμενόμενη μετατόπιση του ρήγματος.

Μέθοδοι μέτριας επιρροής:

- 2.4.4. Η χρήση ελαφροβαρών υλικών για την επίχωση, τα οποία συχνά έχουν μεγάλο κόστος, ή η μείωση του βάθους επίχωσης, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις δε μπορεί να πραγματοποιηθεί για λόγους προστασίας του αγωγού από την ανθρωπίνη δραστηριότητα.
- 2.4.5. Την αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού. Η μέθοδος αυτή, είναι πρακτικά ο επικρατέστερος τρόπος αντιμετώπισης των επαυξημένων παραμορφώσεων λόγω διάρρηξης ρηγμάτων, αλλά τα συνήθη πάχη τοιχωμάτων δεν καλύπτουν περιπτώσεις πολύ μεγάλων μετατοπίσεων (π.χ. >1.5D έως 2.0D).

Μέθοδοι σημαντικής επιρροής:

- 2.4.6. Προστασία του αγωγού με την κατασκευή εξωτερικά ενός «θυσιαζόμενου» υπόγειου κιβωτίου (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα κατάλληλου πλάτους (αντίστοιχου με την αναμενόμενη μετατόπιση του ρήγματος). Η μέθοδος, αν και μπορεί να εφαρμοστεί και για πολύ μεγάλες μετατοπίσεις, μπορεί να είναι ιδιαίτερος αντιοικονομική για μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες και μεγάλες αναμενόμενες μετακινήσεις, όπου το μήκος του αγωγού το οποίο θα προστατευθεί ανέρχεται σε μερικές εκατοντάδες μέτρα .
- 2.4.7. Η τοποθέτηση του αγωγού στην επιφάνεια εδάφους, επί επιχώματος ή στηρίξεων μικρής αντοχής, ή πάνω σε ολισθαίνουσες ράγες. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προστατεύσει τον αγωγό και σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων μετατοπίσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 για την περίπτωση της ενεργοποίησης του ρήγματος Denali στην Αλάσκα το 2002. Εκθέτει όμως τον αγωγό σε ποικίλες ατυχηματικές και μη εξωτερικές δράσεις, ενώ δεν είναι αποδεκτή σε περιπτώσεις κατοικημένων περιοχών, σε καλλιεργούμενα εδάφη ή ακόμη και σε δασικές περιοχές χωρίς δυνατότητα συνεχούς προστασίας του αγωγού.

Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που προαναφέρθηκαν για τις υπάρχουσες «συμβατικές» μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό υπόγειων αγωγών υπό μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις λόγω διάρρηξης ρήγματος, προκύπτει σαφώς ότι η εφαρμογή τους είναι αποτελεσματική και οικονομικά σύμφωρη για μικρές και μέτριες εδαφικές μετατοπίσεις. Μόνον η μέθοδος 2.4.6 ανωτέρω είναι αποτελεσματική για μεγάλες εδαφικές μετατοπίσεις, αλλά το κόστος της καθίσταται απαγορευτικό δεδομένου ότι οι διαστάσεις του "θυσιαζόμενου" κιβωτίου και το κόστος κατασκευής του αυξάνονται δυσανάλογα.

Κατ' επέκταση των ανωτέρω, στα επόμενα κεφάλαια έγινε προσπάθεια διερεύνησης εναλλακτικών μεθοδολογιών κατασκευής του αγωγού, μεγάλης αποδοτικότητας σε σχέση με το κόστος εφαρμογής. Η διερεύνηση επικεντρώθηκε τόσο στη χρήση ειδικών διατάξεων (εφαρμογή εύκαμπτων κόμβων) που θα τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις κατά μήκος του αγωγού, προκειμένου να απομειωθούν οι παραμορφώσεις στα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού, όσο και στη χρήση εύκαμπτων υλικών υψηλής αντοχής για την κατασκευή τμημάτων του αγωγού στις περιοχές που αναμένονται μεγάλες μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις (αγωγοί από πολυμερή, σύνθετοι αγωγοί, υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί).



(a) before



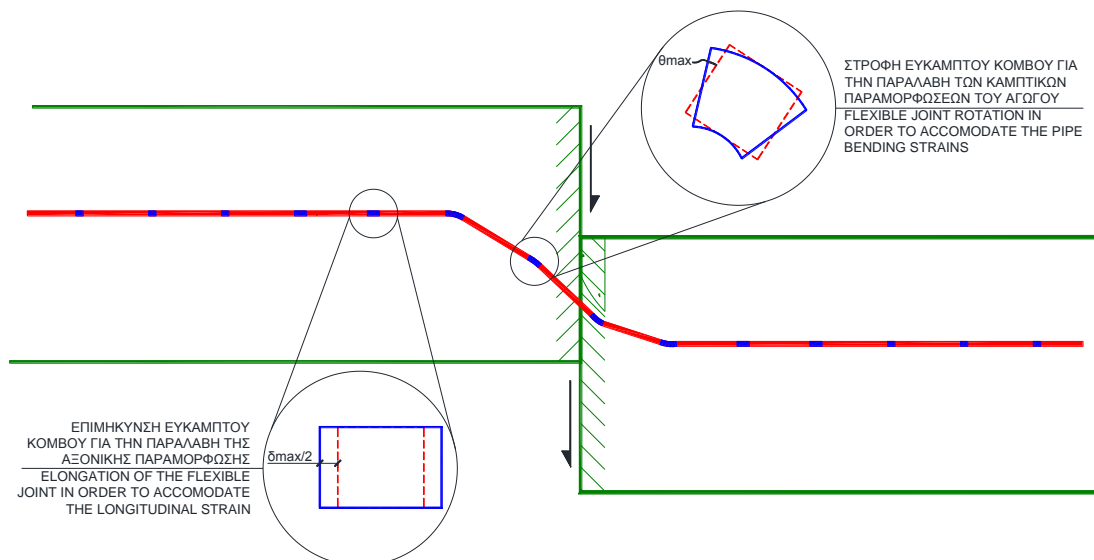
(b) after

**Σχήμα 2.3:** Εικόνα του αγωγού Trans-Alaska (a) πριν και (b) μετά την ενεργοποίηση του ρήγματος Denali στις 3 Νοέμβριου 2002 ( $M_w=7.9$ ) (After Hall et al. 2003).

## Εύκαμπτοι Κόμβοι

### 3.1 Εισαγωγή

Η πρώτη εναλλακτική λύση που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής δραστηριότητας, ήταν η χρήση εύκαμπτων κόμβων για την απομείωση των σεισμικά επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό. Ως εύκαμπτοι κόμβοι θεωρούνται ειδικές διατάξεις οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να παραλάβουν μετατοπίσεις ή/και στροφές, χωρίς όμως να επιβάλλουν πρόσθετες τάσεις στα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού με τα οποία συνδέονται. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, τέτοιες διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν, έτσι ώστε να συγκεντρωθούν οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις από τη διάρρηξη (αξονικές ή καμπτικές) στους εύκαμπτους κόμβους και κατά συνέπεια να περιοριστούν κάτω από τα επιτρεπτά όρια οι παραμορφώσεις που πρέπει να παραληφθούν από τον υπόλοιπο αγωγό.

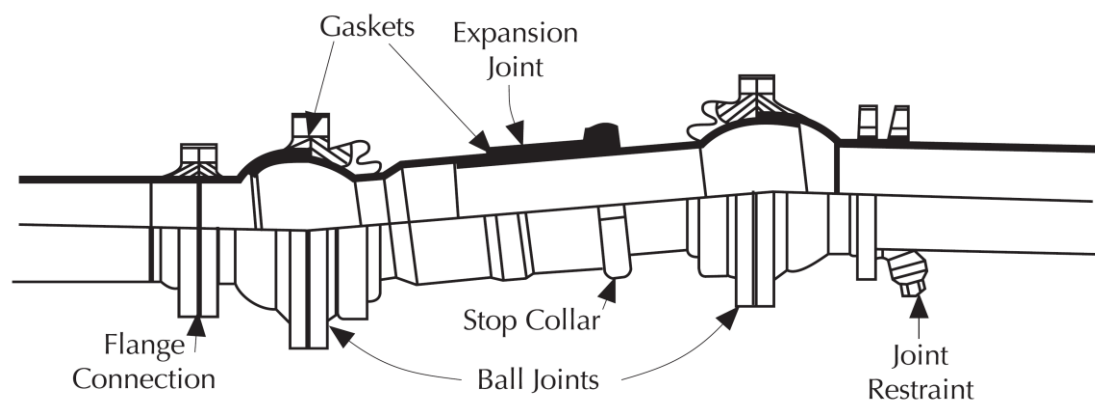


Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των εύκαμπτων κόμβων.

### 3.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίστηκαν περιορισμένες δημοσιεύσεις σχετικά με τη χρήση εύκαμπτων κόμβων σε υπόγειους αγωγούς υποκείμενους σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις, ενώ, οι περισσότερες από τις αναφορές, αφορούν χαμηλής πίεσης αγωγούς ύδρευσης ή αποχέτευσης.

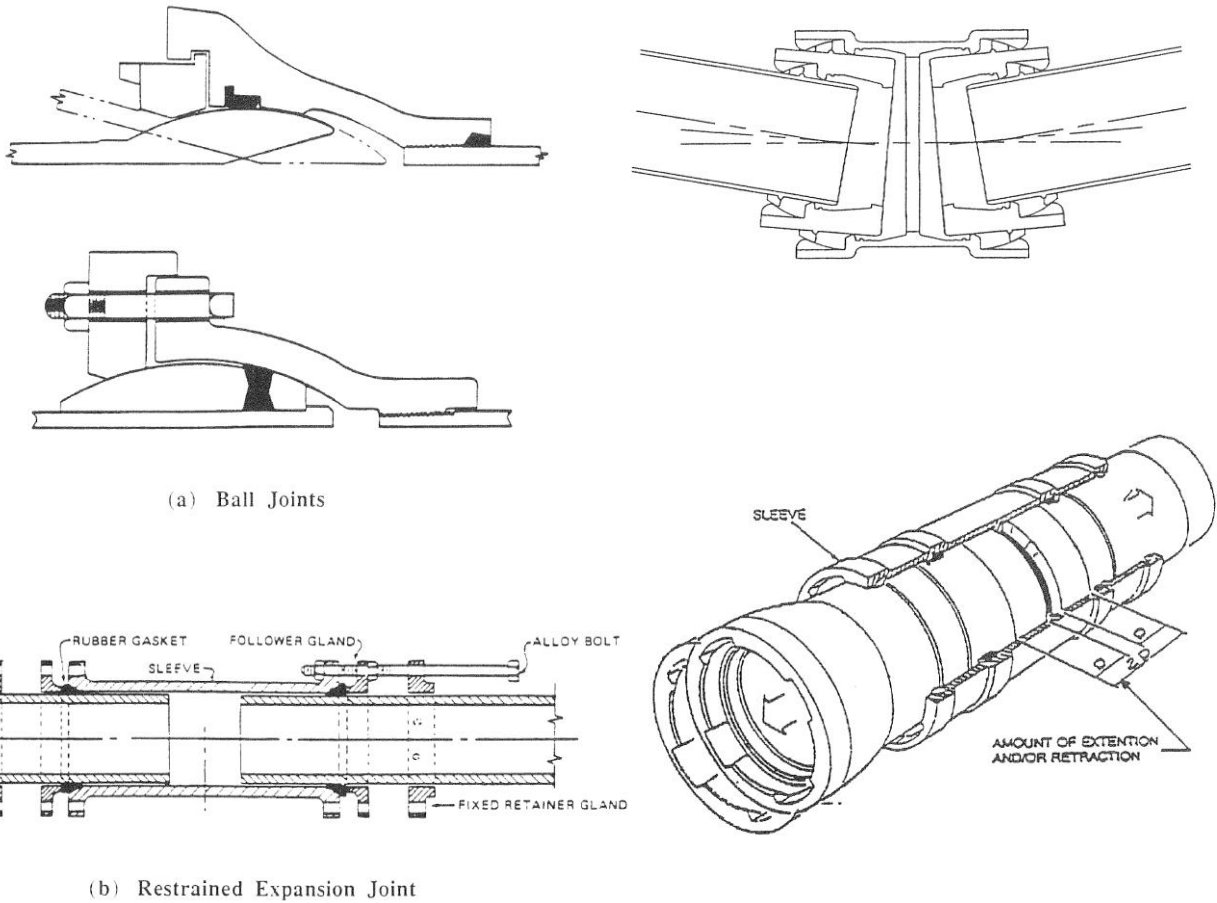
Πρώτος ο **Ford (1983)** πρότεινε τη χρήση σύνθετων εύκαμπτων κόμβων για την αντιμετώπιση τοπικών μεγάλων μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων, όπως αυτές που προκαλεί η διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων. Η διάταξη που πρότεινε παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2 και αποτελείται από δύο αλληπάληλους στροφικούς κόμβους τύπου «σφαίρας» που συνδέονται μεταξύ τους με ένα κόμβο διαστολής. Σύμφωνα με τον Ford (1983), η χρήση τέτοιων κόμβων μπορεί να επεκταθεί και σε περιοχές που αναμένονται μεγάλες διαφορικές καθιζήσεις (π.χ. όταν ο αγωγός διέρχεται κάτω από κτίρια, κτλ).



**Σχήμα 3.2:** Εύκαμπτος κόμβος που συνδυάζει περιστροφικό κόμβο τύπου «σφαίρας» και κόμβο διαστολής (από Ford, 1983).

Οι **Isenberg & Richardson (1989)** διερεύνησαν τους διαθέσιμους εύκαμπτους κόμβους καθώς και πραγματοποιηθείσες μελέτες αγωγών αποχέτευσης και ύδρευσης, στις οποίες είχαν χρησιμοποιηθεί παρόμοιες διατάξεις. Στα συμπεράσματα τους ανέφεραν ότι κάποιες διατάξεις, όπως αυτές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3, ήταν εμπορικά διαθέσιμες, αλλά, δεδομένου ότι η επιτυχία της μελέτης εξαρτάται κυρίως από την ικανότητα να εκτιμηθούν με ακρίβεια η θέση και το μέγεθος των αναμενόμενων μετατοπίσεων που θα καλούνταν να παραλάβουν οι διατάξεις αυτές, θεωρούσαν ότι έπρεπε να αναπτυχθεί περαιτέρω η γεωτεχνική μηχανική προκειμένου να μπορούν να τις αξιοποιήσουν.





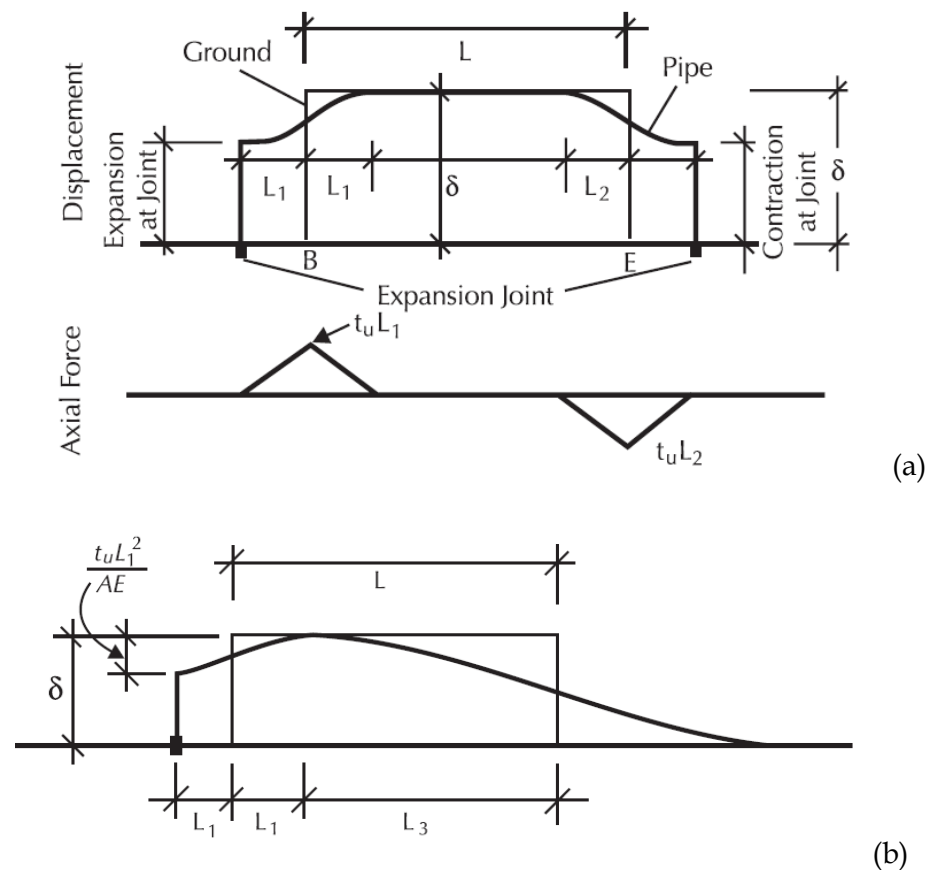
**Σχήμα 3.3:** Εύκαμπτοι κόμβοι που ανέφεραν οι Isenberg & Richardson (1989)

Ο **Ballantyne (1992)**, διερεύνησε τη σεισμική επιρροή σε αγωγούς ύδρευσης και αποχέτευσης για την περίπτωση μεγάλων μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων (τις οποίες όρισε μεταξύ 2.5cm και 100cm), και πρότεινε τη χρήση εύκαμπτων κόμβων παράλληλα με την εφαρμογή των «κλασικών» μεθοδολογιών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Οι κόμβοι αυτοί έπρεπε να είναι ειδικής σχεδίασης (special pipe joint/fitting designs) ώστε να επιτρέπουν μεγαλύτερη απόκλιση (deflection), επιμήκυνση (extension) ή συμπίεση (compression) από ότι οι συνηθισμένοι κόμβοι σύνδεσης τμηματικών αγωγών (segmented pipes joints), ενώ έθεσε και τα απαραίτητα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται για τη σωστή λειτουργία τους. Στα συμπεράσματα της έρευνας του αναφέρεται ότι οι διαθέσιμοι εμπορικά κόμβοι κατά την περίοδο εκπόνησης της μελέτης, δεν θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν αυτές τις βασικές προδιαγραφές.

Αναλυτική διερεύνηση της χρήσης κόμβων επιμήκυνσης (expansion joints) τύπου Dresser (απλός κόμβος ολίσθησης) για την αντιμετώπιση μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων έγινε από τους **O'Rourke & Liu (1994, 2012)**, οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η χρήση τους μπορεί να έχει θετικό αλλά και αρνητικό αντίκτυπο στις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις στον αγωγό, όπως παρουσιάζεται και στα Σχήμα 3.4a & 3.4b. Πιο συγκεκριμένα,

- ο θετικό αντίκτυπο έχουν στην περίπτωση του Σχήματος 3.4a, όπου οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις στον αγωγό περιορίζονται σε  $t_u L_1$  και  $t_u L_2$  αντίστοιχα έναντι των αρχικών  $t_u L/2$ , ενώ
- ο αρνητικό αντίκτυπο έχουν στην περίπτωση του Σχήματος 3b, όπου οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις περιορίζονται σε  $t_u L_1$  αλλά οι θλιπτικές αυξάνονται σε  $t_u L_3$ .

Σύμφωνα με την ανάλυσή τους, για θετική συνεισφορά στη συμπεριφορά του αγωγού, θα πρέπει να εγκατασταθούν τουλάχιστον δύο κόμβοι επιμήκυνσης, ο ένας κοντά στην κεφαλή της μετακίνησης και ο άλλος κοντά στον πόδα, ενώ η ικανότητά τους για παραμόρφωση πρέπει να είναι ανάλογη με την αναμενόμενη μετακίνηση του ρήγματος.

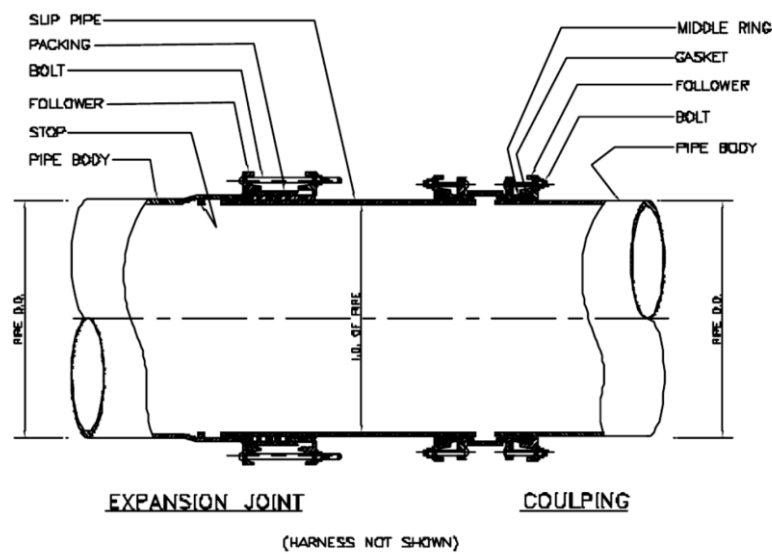


**Σχήμα 3.4:** Πιθανή (α) ευνοϊκή και (β) αρνητική επιρροή κόμβων επιμήκυνσης (O'Rourke & Liu, 2012)

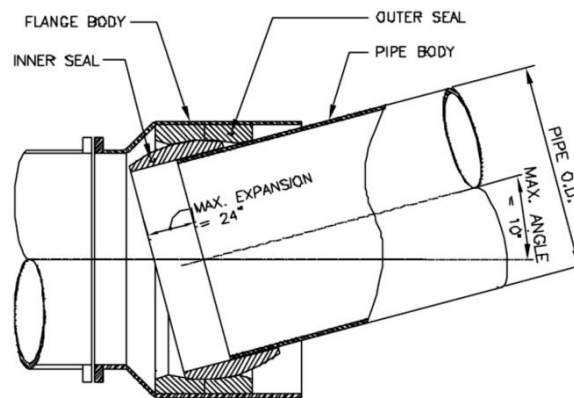
Αργότερα ο **Wang (1996)**, για την ενίσχυση υφιστάμενων δικτύων αγωγών, πρότεινε να αντικατασταθούν οι σταθεροί-άκαμπτοι κόμβοι (rigid joints) μεταξύ των τμημάτων των αγωγών (segmented pipes) με πιο εύκαμπτους και/ή ενισχυμένους-περισφιγμένους κόμβους (flexible and/or restrained joints). Οι προτάσεις του όμως είχαν μόνο ποιοτικό χαρακτήρα, δεδομένου ότι δεν γίνεται περαιτέρω αναφορά στις

ιδιότητες που πρέπει να έχουν οι κόμβοι αυτοί και κατά πόσον είναι εμπορικά διαθέσιμοι.

Ο **Cheng (2001)** μελέτησε εναλλακτικούς τρόπους για την παραλαβή μεγάλων μετακινήσεων λόγω διάρρηξης ρήγματος σε αγωγό ύδρευσης, εξετάζοντας μεταξύ άλλων και τους δύο τύπους κόμβων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5. Και οι δύο τύποι μπορούν να παραλάβουν μετακίνηση και στροφή, αλλά ο δεύτερος έχει την ικανότητα να στραφεί παραπάνω και μεγαλύτερη ικανότητα να παραλάβει απότομες μετακινήσεις, όπως αυτές που προκαλούνται κατά τη διάρρηξη του ρήγματος. Στον τελικό σχεδιασμό του αγωγού όμως, δεν επιλέχθηκε η χρήση κανενός από τους δύο εξεταζόμενους κόμβους, γιατί θεωρήθηκε ότι επαρκούσε ο συμβατικός σχεδιασμός.



(a)



(b)

**Σχήμα 3.5:** Είδη κόμβων που ελέγχθηκαν από τους Koike et al. (2001)

Η προαναφερόμενη μεθοδολογία των O'Rourke & Liu (1994) για την εκτίμηση της ευνοϊκής ή μη επιρροής των κόμβων επιμήκυνσης εντάχθηκε το 2007 στις «Αρχές σεισμικού σχεδιασμού υπόγειων αγωγών του Ινδικού Ινστιτούτου Τεχνολογίας του Kanpur» (NICEE 2007), οι οποίες αποτελούν το μοναδικό κείμενο κανονισμών ή

αρχών σχεδιασμού που εντοπίστηκε στη διεθνή βιβλιογραφία και στο οποίο να γίνεται αναφορά σε εύκαμπτους κόμβους.

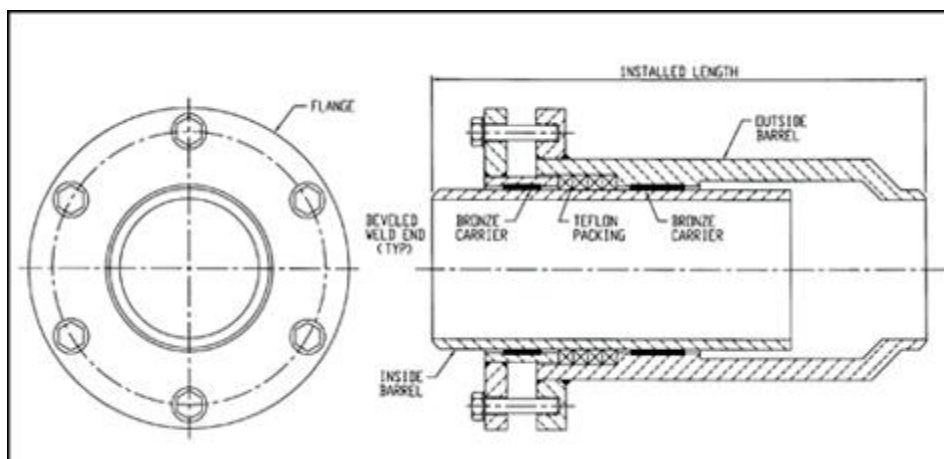
### 3.3 Εμπορικά Διαθέσιμοι Εύκαμπτοι Κόμβοι

Οι εμπορικά διαθέσιμοι εύκαμπτοι κόμβοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερα είδη, ανάλογα με τη μέθοδο με την οποία παραλαμβάνουν τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις: απλοί κόμβοι ολίσθησης, κόμβοι τύπου "σφαίρας", κόμβοι τύπου "φουσαρμόνικας" και σύνθετοι κόμβοι.

#### 3.3.1 Απλοί κόμβοι ολίσθησης (Slip expansion joints)

Οι απλοί κόμβοι ολίσθησης (slip expansion joints) αποτελούνται από δύο τμήματα αγωγού που το ένα εισέρχεται στο άλλο. Τα δύο τμήματα δεν είναι συγκολλημένα, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η σχετική κατά μήκος μετατόπιση μεταξύ τους (Σχήμα 3.6), αλλά παρέχεται μηδενική (ή πολύ περιορισμένη) ικανότητα στροφής. Σημαντικά στοιχεία στους κόμβους επιμήκυνσης είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη σχετική μετακίνηση, η αντοχή σε περαιτέρω επιμήκυνση επιπλέον της επιτρεπόμενης και η μέθοδος στεγάνωσης του κόμβου.

Υπάρχουν αρκετές εταιρίες που κατασκευάζουν τέτοιου είδους κόμβους ολίσθησης, ενώ δεν υπάρχουν κατασκευαστικοί περιορισμοί στη διάμετρο του αγωγού. Επί του παρόντος υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμοι τέτοιοι κόμβοι με μέγιστη επιτρεπόμενη εσωτερική πίεση άνω των 1000psi (~6.9MPa), δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε δίκτυα μεταφοράς καυσίμων υψηλής πίεσης.



Σχήμα 3.6: Τυπική διάταξη απλού κόμβου επιμήκυνσης (από U.S. Bellows Inc.)

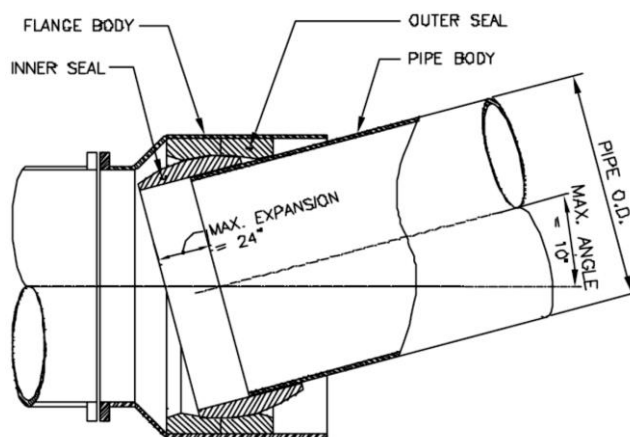
Οι κόμβοι αυτού του είδους έχουν τους περιορισμούς που ανέλυσαν θεωρητικά οι O'Rourke & Liu (1994, 2012), δηλαδή ότι, προκειμένου να έχουν ευνοϊκή δράση στις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις του αγωγού, πρέπει:

- να εγκατασταθούν τουλάχιστον δύο, ο ένας κοντά στην κεφαλή της μετακίνησης και ο άλλος κοντά στον πόδα, και
- να έχουν ικανότητα για παραμόρφωση ανάλογη με την αναμενόμενη μετακίνηση του ρήγματος.

Δεδομένου ότι οι διατάξεις αυτές είναι σχετικά πολύπλοκες και επίσης συχνά υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στην ακριβή θέση και έκταση της ρηξιγενούς ζώνης, η λύση αυτή μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα δαπανηρή, χωρίς ταυτόχρονα να περιορίζει επαρκώς τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις στα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού.

### 3.3.2 Κόμβοι τύπου «σφαίρας» με -ή χωρίς- ικανότητα επιμήκυνσης (Expansion/Ball joints)

Οι κόμβοι αυτοί χαρακτηρίζονται από τη σφαιρικού σχήματος απόληξη του ενός τμήματος τους, το οποίο εισέρχεται σε κατάλληλου σχήματος υποδοχή στο άλλο τμήμα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7. Η σφαιρική διάταξη επιτρέπει τη σχετική στροφή των δύο τμημάτων του αγωγού, ενώ, στο βαθμό που υπάρχει δυνατότητα σχετικής μετακίνησης μεταξύ του ευθύγραμμου τμήματος και της σφαιρικής απόληξης, με τη διάταξη αυτή μπορούν να παραληφθούν και αξονικές παραμορφώσεις. Η κύρια κατασκευαστική δυσκολία των κόμβων αυτού του τύπου είναι η διαμόρφωση ανθεκτικού ορίου (stop) που δε θα επιτρέψει τη σχετική μετακίνηση να ξεπεράσει την επιτρεπόμενη τιμή σε ολίσθηση.

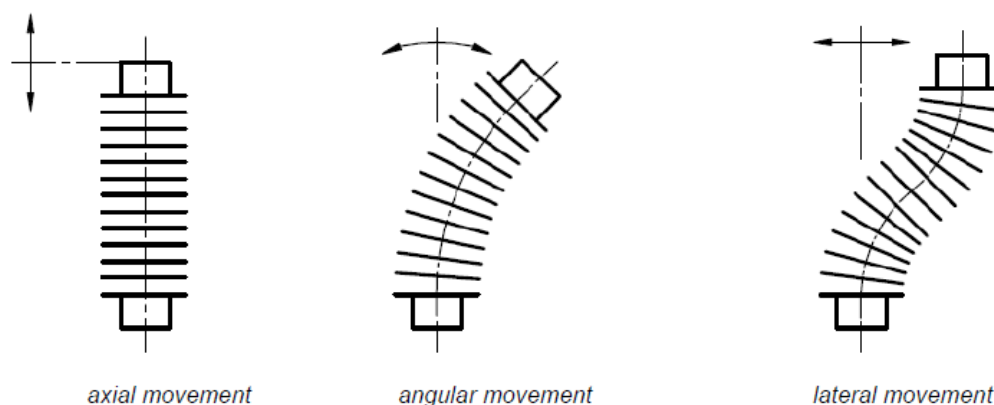


**Σχήμα 3.7:** Τυπική διάταξη κόμβου τύπου «σφαίρας» με ικανότητα επιμήκυνσης (από EBBA Iron Inc. σύμφωνα με Koike et al 2001)

Οι κόμβοι τύπου «σφαίρας» που είναι επί του παρόντος εμπορικά διαθέσιμοι δεν είναι κατάλληλοι για δίκτυα πετρελαίου ή φυσικού αερίου μέσης και υψηλής πίεσης, δεδομένου ότι είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα χαμηλής αντοχής ή συνθετικά υλικά και η επιτρεπόμενη εσωτερική πίεση τους δεν ξεπερνάει τα 350psi (~2.4MPa).

### 3.3.3 Εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows»

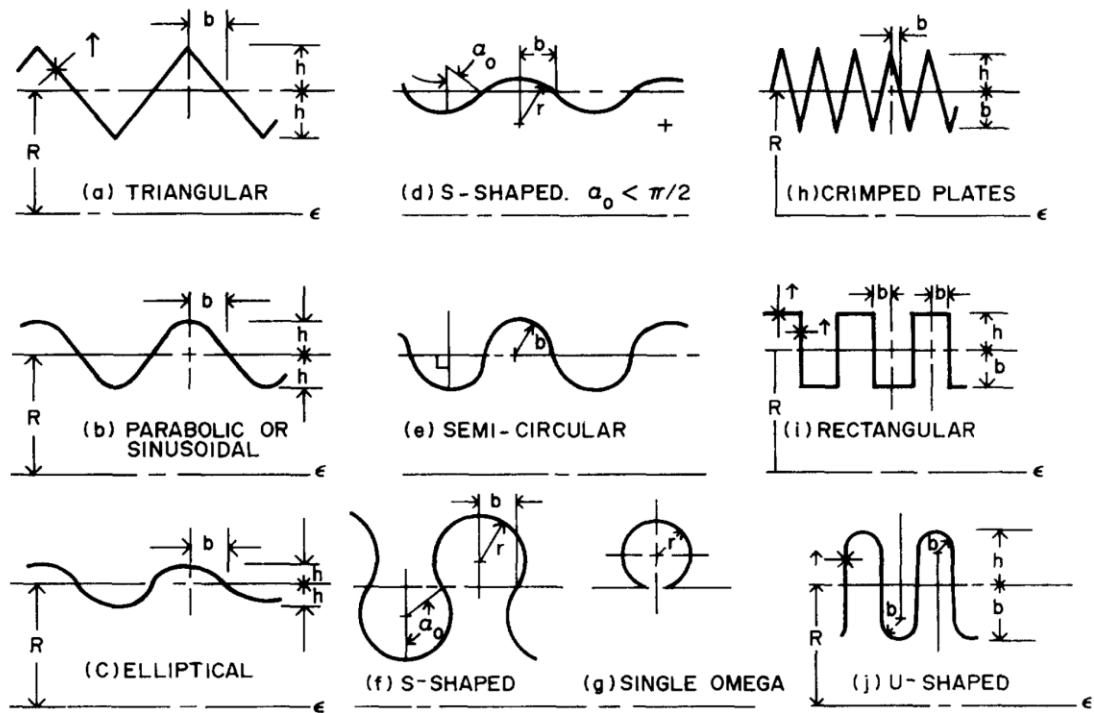
Οι εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows» (φουσαρμόνικας) είναι κόμβοι που αποτελούνται από λεπτότοιχο πτυχωτό χάλυβα, και είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να έχουν μεγάλη ευκαμψία όταν υποβάλλονται σε αξονικά φορτία, εσωτερική πίεση ή καμπτικές ροπές. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται σχηματικά ένας κόμβος τύπου «Bellows» καθώς και τα είδη μετακίνησης που μπορεί να παραλάβει μέσω της παραμόρφωσής του.



**Σχήμα 3.8:** Είδη μετακίνησης που μπορούν να παραληφθούν μέσω κόμβων τύπου «Bellows» (από BOA Group)

Η αντίσταση σε παραμόρφωση καθώς επίσης και η ικανότητα μέγιστης παραμόρφωσης εξαρτάται από το πάχος και το είδος της διατομής της κάθε πτύχωσης. Σύμφωνα με τον Wilson (1984) υπάρχουν δέκα (10) διαφορετικοί τύποι διατομών της πτύχωσης, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9, με τον καθένα να έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά ευκαμψίας και αντοχής σε αξονικά φορτία. Ο συνηθέστερος τύπος διατομής είναι αυτός της «Λύρας» ή «σχήματος S» (εικόνα f).

Για το σύνολο σχεδόν των διατομών γίνεται να διαφοροποιηθεί ο ακριβής σχεδιασμός τους, με αλλαγή του ύψους των πτυχώσεων, της ακτίνας των καμπωλών τους, του αριθμού των αλληπάλληλων μεταλλικών στρώσεων που χρησιμοποιούνται και του συνολικού πάχους του τοιχώματος. Έτσι επιτυγχάνεται ο επιθυμητός (κατάλληλος) συνδυασμός αντοχής σε εσωτερική πίεση, αντοχής σε αξονικά φορτία και ικανότητα παραμόρφωσης.

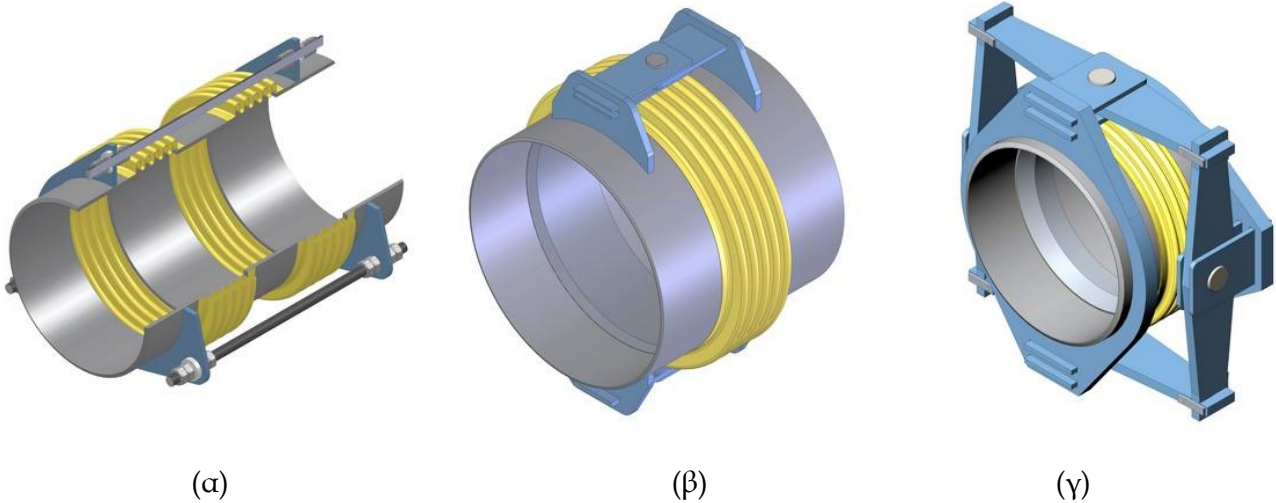


**Σχήμα 3.9:** Είδη προφίλ της πτύχωσης κόμβων τύπου «Bellows» (σύμφωνα με Wilson 1984)

Σήμερα υπάρχουν μία σειρά από εταιρίες που παράγουν εύκαμπτους κόμβους τύπου «Bellows» με διαμέτρους πάνω από 1000mm και αντοχή σε εσωτερική πίεση πάνω από 1200 psi (~8.3MPa), κυρίως με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις προκειμένου να παραληφθούν μετακινήσεις σωλήνων λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Δεδομένης της μεγάλης ευελιξίας στο σχεδιασμό των πτυχώσεων τους, του σχετικά φτηνού κόστους τους και της ευκολίας τοποθέτησής τους στο πεδίο (με απλή συγκόλλησή τους στα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού), οι εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows» μπορούν να αποτελέσουν μία εναλλακτική μέθοδο για την απομείωση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων σε αγωγούς λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων.

Οι κόμβοι τύπου «bellows» μπορούν να εξοπλιστούν με ράβδους ή αρθρώσεις προκειμένου να περιοριστούν κάποιοι από τους διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται κόμβοι που επιτρέπουν μόνο την πλευρική μετακίνηση ή την στροφή γύρω από έναν ή δύο άξονες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, δεδομένου ότι η ύπαρξη πτυχώσεων στον κόμβο θα αυξήσει τις τριβές που αναπτύσσονται με το περιβάλλον έδαφος της επίχωσης, θα πρέπει να προβλεφθεί η κάλυψη των κόμβων αυτών με γεω-ύφασμα για να μπορέσουν να παραμορφωθούν ελεύθερα. Προσοχή επίσης πρέπει να δοθεί στον περιορισμό ή και στην εκμηδένιση των μόνιμων παραμορφώσεων του κόμβου υπό την επιβολή της εσωτερικής πίεσης του πετρελαίου ή του φυσικού αερίου που θα μεταφέρει.



**Σχήμα 3.10:** Σύνθετα είδη κόμβων τύπου «Bellows» με επιτρεπόμενη μόνο την (α) πλευρική μετακίνηση, (β) τη στροφή σε ένα άξονα και (γ) τη στροφή σε δύο άξονες (σχήματα από Eagleburgmann group)

### 3.3.4 Σύνθετοι κόμβοι

Τόσο στη διεθνή βιβλιογραφία (Ford 1983, Isenberg & Richardson 1989) όσο και στους καταλόγους εταιριών παραγωγής εύκαμπτων κόμβων παρουσιάζονται διατάξεις σύνθετων κόμβων, που αποτελούνται από συνδυασμό των προαναφερόμενων κόμβων (π.χ. συνδυασμός κόμβου τύπου «σφαίρας» και κόμβου ολίσθησης, ή συνδυασμός δύο κόμβων τύπου «Bellows»). Οι διατάξεις αυτές ουσιαστικά αποτελούν συνδυασμό των λύσεων που έχουν ήδη παρουσιαστεί και για αυτό δεν αναλύονται περαιτέρω.

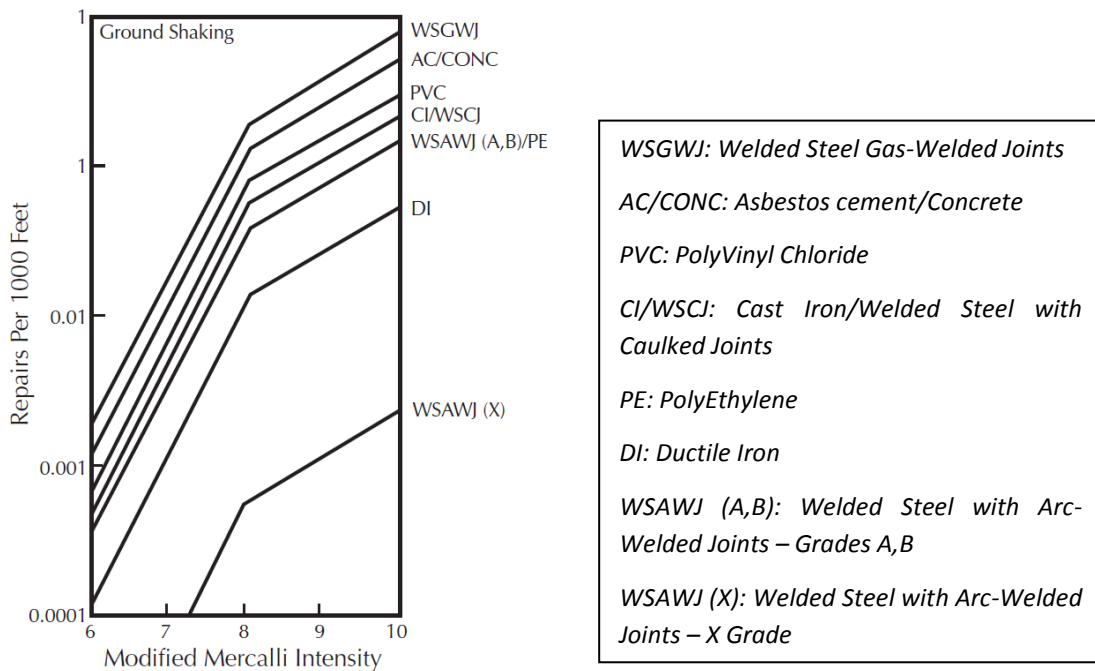


## Αγωγοί Πολυμερών και Σύνθετοι Αγωγοί

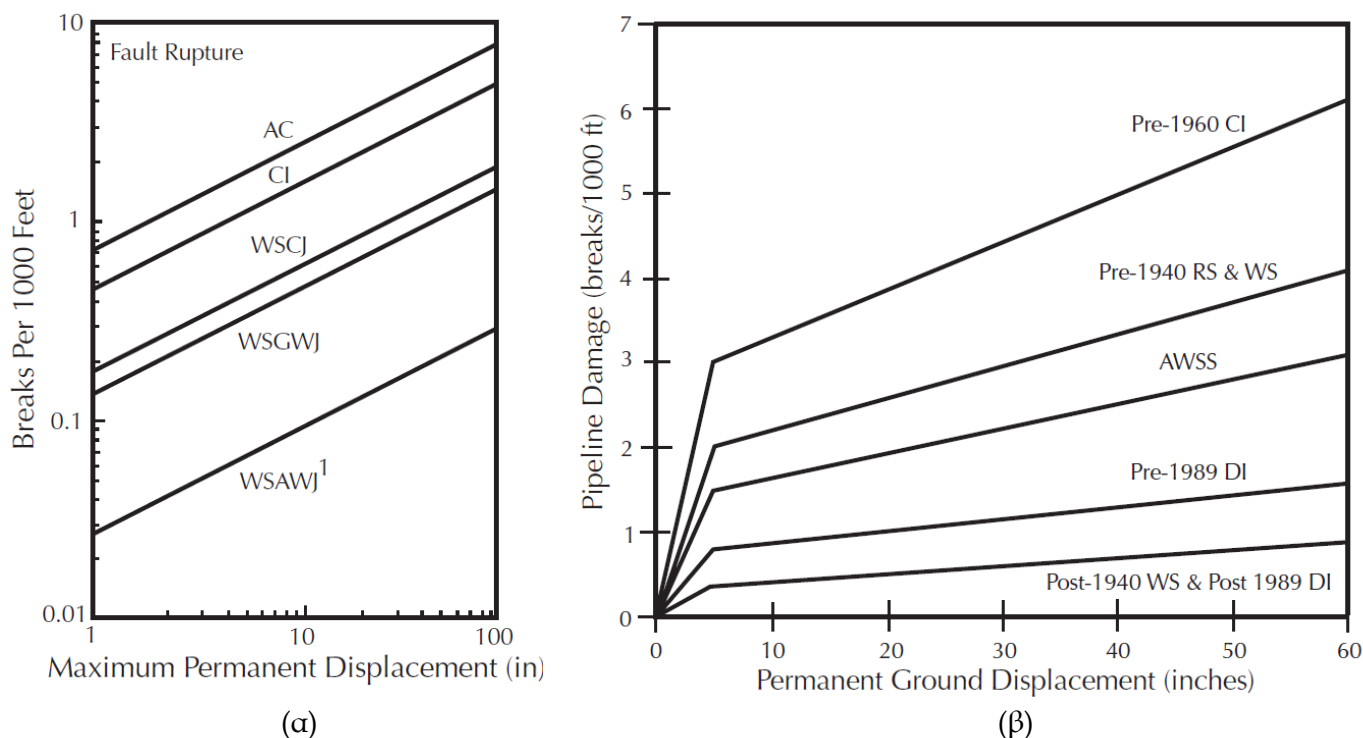
### 4.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της διερεύνησης εναλλακτικών μεθοδολογιών σχεδιασμού αγωγών που διασταυρώνονται με ενεργά ρήγματα, διερευνήθηκε η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν πιο εύκαμπτα υλικά ή σύνθετες διατομές για την κατασκευή του αγωγού, προκειμένου να βελτιωθεί η σεισμική του συμπεριφορά και η ικανότητά παραμόρφωσής του σε περίπτωση επιβαλλόμενων μετακινήσεων λόγω του ρήγματος.

Στο παρελθόν έχει γίνει προσπάθεια να συσχετιστεί το είδος του υλικού των αγωγών με τις ζημιές που παρατηρήθηκαν ανάλογα την ένταση του σεισμού (Σχήμα 4.1) ή τις μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις (Σχήμα 4.2). Όπως σχολιάζουν όμως οι O'Rourke & Liu (2012) τα διαγράμματα αυτά δεν περιέχουν τα ακριβή δεδομένα, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να εκτιμηθεί αν οι καμπύλες αυτές αποτελούν απλά εκτιμήσεις μηχανικών ή βασίζονται σε επαρκή δεδομένα πεδίου.



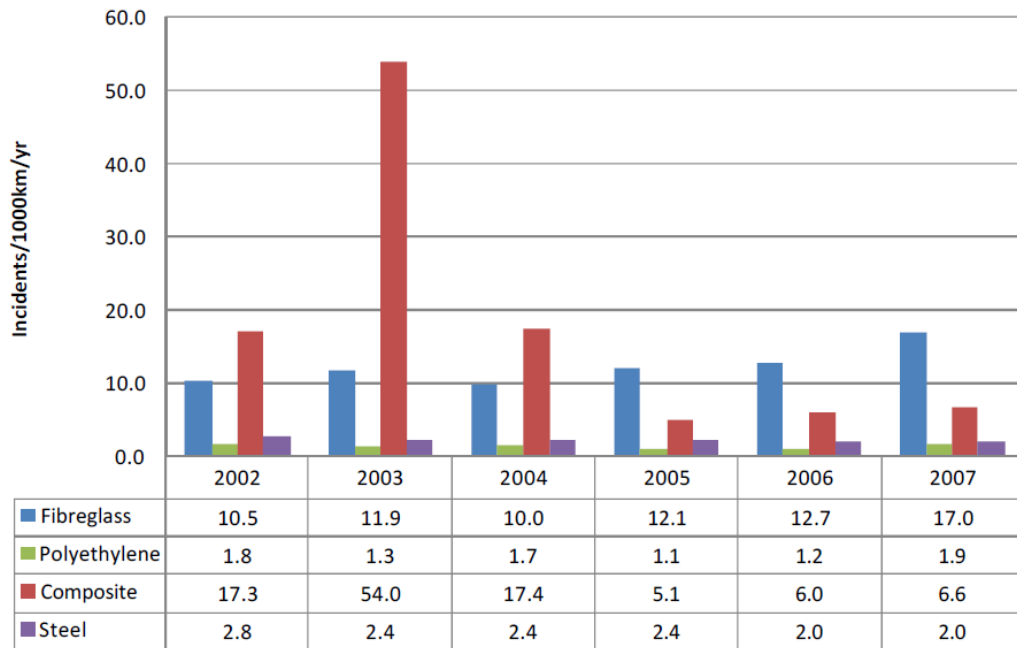
**Σχήμα 4.1:** Συσχέτιση του είδους του υλικού του αγωγού με τις παρατηρούμενες ζημιές ανάλογα με την ένταση του σεισμού (σύμφωνα με Eguchi 1991)



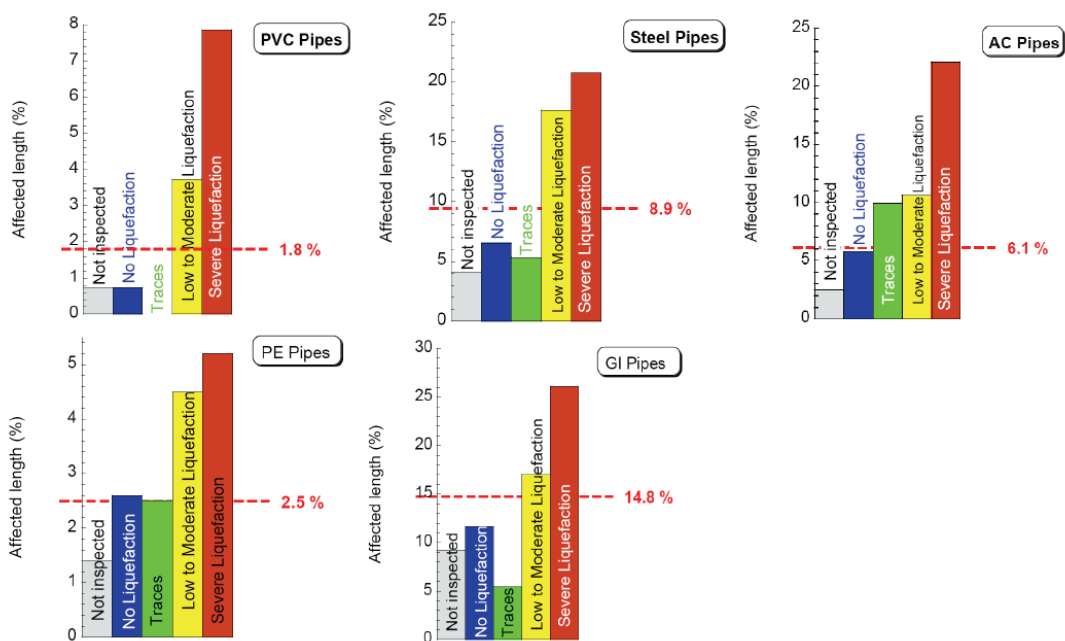
**Σχήμα 4.2:** Συσχέτιση του είδους του υλικού του αγωγού με τις παρατηρούμενες ζημιές ανάλογα με τις μόνιμες μετατοπίσεις σύμφωνα με (α) Eguchi (1984) και με (β) Porter et al. (1991)

Πιο πρόσφατα η CAPP (2009) συγκέντρωσε τις αναφορές βλαβών σε αγωγούς στην περιοχή Αλμπέρτα μεταξύ του 2002 και του 2007 και τις κατηγοριοποίησε ανάλογα με το είδος του υλικού του αγωγού όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3, όπου φαίνεται ότι οι αγωγοί από PVC και από χάλυβα εμφανίζουν τις λιγότερες αστοχίες. Όμως, δεδομένου ότι πολύ λίγες από τις αστοχίες που παρατηρήθηκαν αφορούν μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις (μόνο το 4% των αστοχιών σε μία χρονιά -2006-), τα συμπεράσματα αυτά δεν μπορούν να αναχθούν και για τη βελτιωμένη ή μη συμπεριφορά των υπόλοιπων υλικών έναντι του χάλυβα σε μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις.

Σε αντίστοιχα συμπεράσματα όσον αφορά τη βελτιωμένη συμπεριφορά των αγωγών PVC κατέληξαν και οι Cubrinovski et al. (2012), οι οποίοι παρατήρησαν ότι, στο σεισμό του Christchurch το 2011, οι αγωγοί ύδρευσης από PVC και PE εμφάνισαν τρεις έως πέντε φορές λιγότερες ζημιές από τους αγωγούς από ασβεστοσκυρόδεμα (AC), χάλυβα (Steel) και γαλβανισμένο σίδηρο (GI) λόγω των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων που προκάλεσε η εκτεταμένη ρευστοποίηση των εδαφών (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.3: Συσχέτιση του είδους του υλικού του αγωγού με τις παρατηρούμενες βλάβες στην Αλμπέρτα (σύμφωνα με CAPP 2009)



Σχήμα 4.4: Παρατηρούμενες ζημιές σε αγωγούς ύδρευσης κατά το σεισμό του Christchurch το 2011 (σύμφωνα με Cubrinovski 2012)

Με βάση τα προαναφερθέντα στοιχεία γίνεται φανερό ότι παρουσιάζει ενδιαφέρον και αξίζει επίσης να διερευνηθεί η πιθανή βελτίωση της συμπεριφοράς του αγωγού έναντι μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων, με χρησιμοποίηση άλλων υλικών αντί του

χάλυβα. Η ακόλουθη βιβλιογραφική διερεύνηση επικεντρώθηκε στη χρήση πλαστικών και σύνθετων αγωγών, δεδομένου ότι αποτελούν τα κυριότερα είδη εναλλακτικών υλικών που είναι σήμερα διαθέσιμα στο εμπόριο.

#### 4.2 Πλαστικοί Αγωγοί (PVC, HDPE, PVDF, κτλ.)

Το πλαστικό είναι ένα στερεό υλικό που αποτελείται από συνθετικά μακρά μόρια οργανικών ενώσεων (συνθετικά πολυμερή). Το πρώτο πλαστικό (Vinyl Chloride  $C_2H_3Cl$ ) ανακαλύφθηκε τυχαία στο τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα, και άρχισε να χρησιμοποιείται ευρύτατα μόλις διαπιστώθηκε η εκπληκτική του αντίσταση σε διάβρωση και οι σχετικά καλές μηχανικές ιδιότητες.

Σήμερα, ως πρώτη ύλη για την κατασκευή αγωγών, χρησιμοποιούνται μία σειρά από πλαστικά υλικά, με συνηθέστερους τους αγωγούς από PVC (PolyVinyl Chloride), PE (PolyEthylene), HDPE (High Density PolyEthylene), CPVC (Chlorinated PolyVinyl Chloride) και PVDF (PolyVinylidene Fluoride). Οι αγωγοί αυτοί, ανάλογα με το υλικό παρασκευής τους, παρουσιάζουν διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, διαφορετικό ειδικό βάρος και διαφορετική θερμική συμπεριφορά. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται εικόνες από εμπορικά διαθέσιμους πλαστικούς αγωγούς.

Οι πλαστικοί αγωγοί μπορούν να κατασκευαστούν σχεδόν σε οποιαδήποτε επιθυμητή διάμετρο, ενώ το πάχος των τοιχωμάτων τους επιλέγεται συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης που καλούνται να παραλάβουν, σύμφωνα με τη σχέση (Antaki 2005):

$$P = \frac{2 \times S}{SDR - 1} \quad 4.1$$

- όπου  $P$ , η επιτρεπόμενη εσωτερική πίεση (internal pressure rating),  
 $S$ , η μέγιστη επιτρεπόμενη δακτυλιοειδής τάση (hoop stress) και  
 $SDR$ , ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος του τοιχώματος του αγωγού.

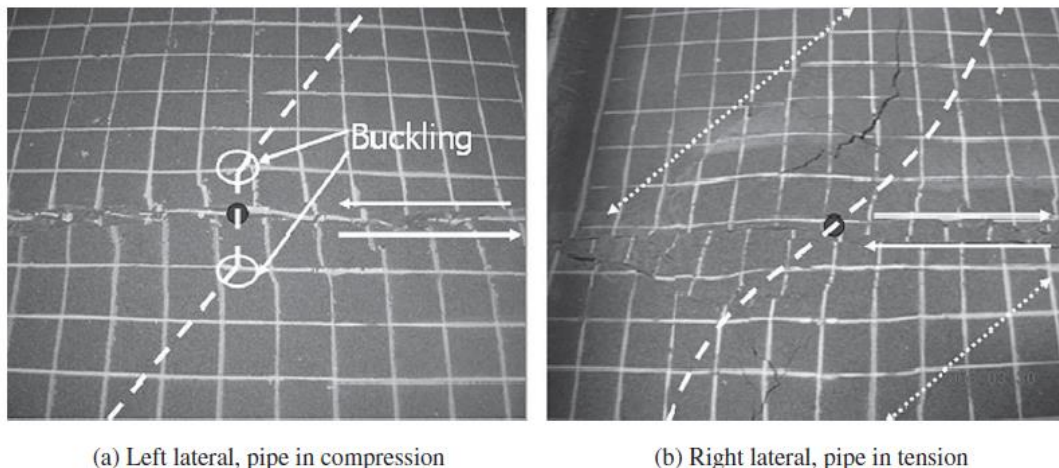


**Σχήμα 4.5:** Εμπορικά διαθέσιμοι πλαστικοί αγωγοί.

Σχετικά πρόσφατα έχουν πραγματοποιηθεί μία σειρά από πειράματα στον φυγοκεντριστή του RPI για να διερευνηθεί η συμπεριφορά αγωγών ύδρευσης από HDPE σε μετατοπίσεις που προκαλούνται από ενεργά ρήγματα (Ha et al. 2008a, 2008b, 2010, Abdoun et al. 2008, 2009). Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η παρατηρούμενη επιφάνεια του εδάφους μετά το πέρας των πειραμάτων στο φυγοκεντριστή, για την περίπτωση επιβολής συμπίεσης και εφελκυσμού αντίστοιχα, λόγω της διάρρηξης του ρήγματος.

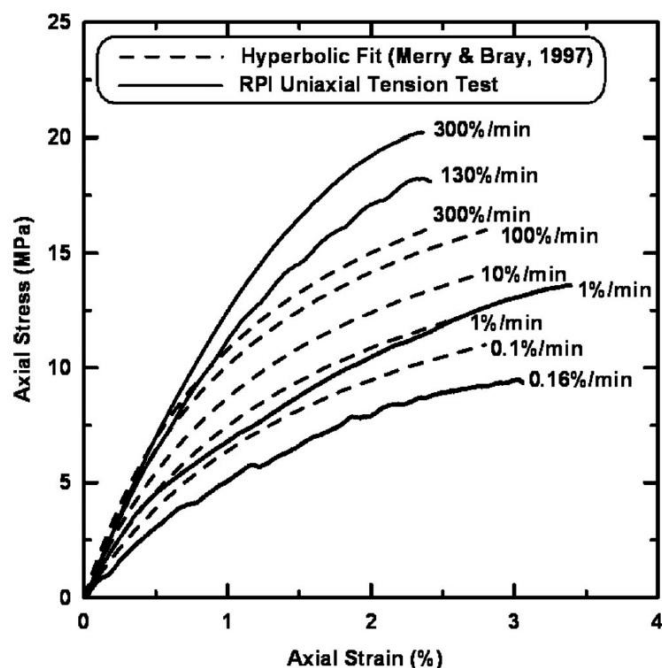
Τα πειράματα δείχνουν καλή συμπεριφορά των εν λόγω αγωγών υπό επιβαλλόμενες μετακινήσεις έως και  $H/D=6.0$  (όπου  $H$  η μέγιστη μετακίνηση του εδάφους και  $D$  η διάμετρος του αγωγού) ακόμα και μετά την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού, ενώ οι μετρηθείσες σχέσεις φορτίου μετατόπισης ( $p-y$ ) του περιβάλλοντος εδάφους είναι αντίστοιχες με τις θεωρητικά προβλεπόμενες από τις σχέσεις της ASCE (1984). Τα πειράματα στο φυγοκεντριστή συγκρίνονται ικανοποιητικά και με ένα ιστορικό περιστατικό από το σεισμό στο Izmit (Ha et al. 2010) και με πειράματα πλήρους

κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν στο κέντρο George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES) του Πανεπιστημίου του Cornell (O'Rourke et al. 2008).



**Σχήμα 4.6:** Παρατηρούμενη επιφάνεια μετά το πέρας δύο εκ των πειραμάτων σε φυγοκεντρική που πραγματοποίησαν οι Ha et al. (2010).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, όπου παρουσιάζεται η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για διάφορες ταχύτητες επιβαλλόμενης παραμόρφωσης του υλικού HDPE που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα του RPI, το κυριότερο πρόβλημα με τα πλαστικά υλικά είναι ότι εμφανίζουν σχετικά χαμηλές παραμέτρους αντοχής. Έτσι, για να μπορέσει ένας αγωγός από πλαστικό HDPE, με επιτρεπόμενη δακτυλιοειδή τάση  $S=1000\text{psi}$ , να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυα μέσης (π.χ.  $D=20''$ ,  $P=500\text{psi}$ ) ή υψηλής πίεσης (π.χ.  $D=30''$ ,  $P=1200\text{psi}$ ), θα πρέπει σύμφωνα με τη Σχέση 4.1, το πάχος τοιχώματος του να είναι κατ' ελάχιστο  $t=4''$  και  $t=17.6''$  αντίστοιχα, τιμές που είναι ουσιαστικά απαγορευτικές, τουλάχιστον για την περίπτωση αγωγών υψηλής πίεσης.



**Σχήμα 4.7:** Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του υλικού HDPE για διάφορους ρυθμούς παραμόρφωσης (σύμφωνα με Ha et al. 2008)

### 4.3 Σύνθετοι Αγωγοί

Ως σύνθετοι αγωγοί θεωρούνται οι αγωγοί που συνδυάζουν ένα ή περισσότερα υλικά στη διαμόρφωση του τοιχώματός τους. Σύμφωνα με τον Jones (1999), οι διαθέσιμοι σήμερα σύνθετοι αγωγοί κατηγοριοποιήθηκαν σε:

- Αγωγούς με ινώδη όπλιση (fiber reinforced pipes): Περιλαμβάνονται αγωγοί από σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ένα υλικό βάσης στο οποίο έχει ενταχθεί δομικά κάποιος ινώδης οπλισμός
- Αγωγοί σύνθετης διατομής (CRLP, SSLP, κτλ.): Περιλαμβάνονται αγωγοί που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά, τα οποία τοποθετούνται αυτόνομα, το ένα παράλληλο στο άλλο ή πεπλεγμένα μεταξύ τους (ως οπλισμός).

Πρέπει να σημειωθεί εκ προοιμίου ότι, όπως οι πλαστικοί αγωγοί, έτσι και οι σύνθετοι αγωγοί χρησιμοποιούνται ευρύτατα για γραμμές παροχής και διανομής φυσικού αερίου και πετρελαίου (μικρής έως μεσαίας πίεσης), αλλά δεν έχουν γίνει ακόμα αποδεκτοί για τις (μέσης έως υψηλής πίεσης) γραμμές μεταφοράς (Laney 2002). Για την ώρα έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες περιορισμένες δοκιμές με αγωγούς από σύνθετες διατομές τύπου CRLP αλλά ακόμη δεν θεωρούνται βιώσιμη εναλλακτική λύση των χαλύβδινων αγωγών για υψηλής πίεσης γραμμές μεταφοράς.

#### 4.3.1 Αγωγοί με ινώδη όπλιση (Fiber Reinforced Pipes)

Η πρώτη κατηγορία σύνθετων αγωγών που διερευνήθηκε στα πλαίσια αυτής της ερευνητικής εργασίας ήταν αγωγοί που αποτελούνται από κάποιο υλικό βάσης το οποίο έχει ενισχυθεί από ίνες οπλισμού και οι οποίοι θα αποκαλούνται για λόγους συντομίας, αγωγοί FRP. Οι ίνες οπλισμού πρέπει να βρίσκονται σε τέτοια πυκνότητα ώστε να επιτρέπεται η μεταφορά δυνάμεων μεταξύ τους, χωρίς να χάνεται η χημική σύνδεσή τους με το πολυμερές.

Για το σύνολο των αγωγών με ινώδη οπλισμό που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία ως υλικό βάσης χρησιμοποιούνται συνθετικά πολυμερή. Πιο συγκεκριμένα, τα παρακάτω υλικά βάσης είναι τα πιο συνηθισμένα (Laney 2002):

- Πολυεστερικές ρητίνες γενικής χρήσης (General Purpose Polyester Resins - orthophthalic polyesters), που εμφανίζουν μέσες τιμές αντοχής και ανθεκτικότητας στη διάβρωση, με χαμηλό κόστος.
- Ενισχυμένες πολυεστερικές ρητίνες (Improved Polyester Resin - isophthalic polyesters), που εμφανίζουν καλές τιμές αντοχής και ανθεκτικότητας στη διάβρωση, και είναι λίγο πιο ακριβές από τις προηγούμενες.
- Ρητίνες Βινυλεστέρα (Vinylester Resin), που εμφανίζουν πολύ καλές τιμές αντοχής και ανθεκτικότητας στη διάβρωση αλλά και μεγαλύτερο κόστος.
- Εποξειδικές Ρητίνες (Epoxy Resins), που εμφανίζουν τις καλύτερες τιμές αντοχής, καλή ανθεκτικότητα στη διάβρωση, αλλά έχουν μεγαλύτερο κόστος.
- Φαινολικές Ρητίνες (Phenolic Resins), που εμφανίζουν εξαιρετικές ιδιότητες έναντι φωτιάς, μέση τιμή αντοχής και μεγάλο κόστος.
- Bisphenol-A Fumarate, chlorendic Ρητίνες, που έχουν βελτιωμένες ιδιότητες ανθεκτικότητας σε διάβρωση, αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες, και μεγαλύτερο κόστος.

Αντίστοιχα χρησιμοποιούνται τέσσερα κύρια είδη ινών όπλισης:

- E-Glass, ίνες γυαλιού με καλή αντοχή, χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, οι πιο χαμηλού κόστους ίνες.
- S-Glass, ίνες γυαλιού καλύτερης αντοχής, μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας και κόστους από τις ίνες E-Glass.
- Aramid, ίνες από αραμιδίο (π.χ. Kevlar), με καλή αντοχή, μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας και κόστους από τις ίνες γυαλιού, πολύ χαμηλής πυκνότητας (1/3 αυτής των ινών γυαλιού), πολύ καλές ιδιότητες πρόσκρουσης και αντοχής σε ζημιές
- Carbon/Graphite, ίνες άνθρακα, με μεγάλο εύρος αντοχών, το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από όλες τις ίνες, μέσης πυκνότητας (2/3 αυτής των ινών γυαλιού), πολύ χαμηλή αντοχή σε πρόσκρουση, τη μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και το μεγαλύτερο κόστος.

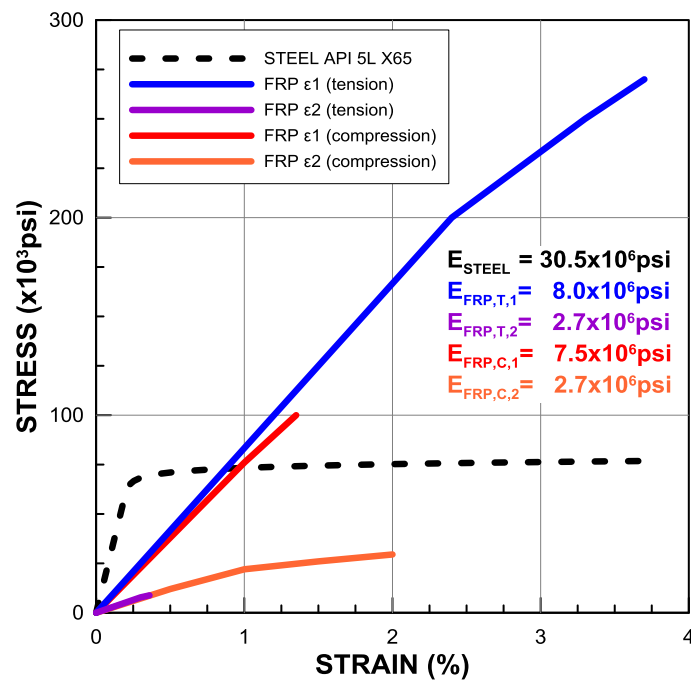


Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται εικόνες από εμπορικά διαθέσιμους αγωγούς FRP.



Σχήμα 4.8: Εμπορικά διαθέσιμοι αγωγοί FRP.

Όπως γίνεται κατανοητό οι παράμετροι αντοχής και οι υπόλοιπες ιδιότητες των αγωγών FRP εξαρτώνται από τον συνδυασμό του υλικού βάσης και του υλικού των ινών. Παράλληλα, επειδή τα υλικά αυτά είναι μη-ομοιογενή, η αντοχή εξαρτάται από τον προσανατολισμό των ινών και, κατά συνέπεια, επιδεικνύουν διαφορετική επιτρεπόμενη αξονική και περιμετρική (hoop) τάση. Στο Σχήμα 4.9 συγκρίνονται οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα τύπου API 5L X65 και ενός τυπικού υλικού FRP (Jones,1999). Στο σχήμα οι παραμορφώσεις  $\epsilon_1$  ορίζονται κατά τη διεύθυνση των ινών ενώ οι  $\epsilon_2$  είναι κάθετα προς τη διεύθυνση των ινών.



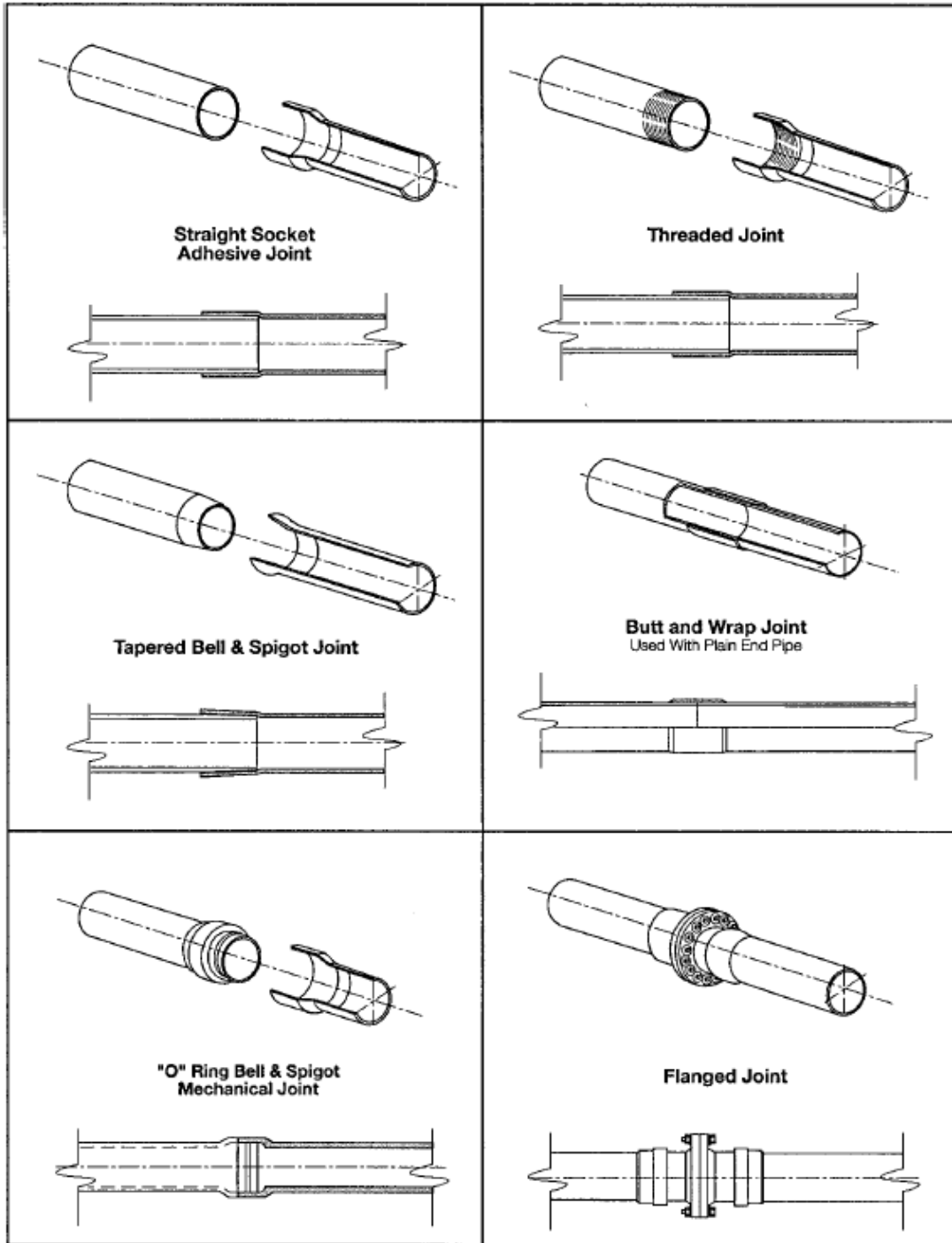
**Σχήμα 4.9:** Σύγκριση καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα API 5L X65 και τυπικού υλικού FRP σύμφωνα με Jones (1999).

Από το διάγραμμα γίνεται φανερό, ότι στη διεύθυνση που είναι στραμμένες οι ίνες, η αντοχή του υλικού ξεπερνάει κατά πολύ την αντίστοιχη αντοχή του χάλυβα, αλλά στην άλλη διεύθυνση η αντοχή είναι πολύ μικρή. Για αυτό το λόγο η συνηθέστερη διάταξη των ινών σε αγωγούς είναι σε δύο στρώσεις με  $+55^\circ$  και  $-55^\circ$  ή με  $+45^\circ$  και  $-45^\circ$ , έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη αντοχή σε όλες τις διευθύνσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως φαίνεται και από το απότομο σταμάτημα των σχετικών καμπυλών, η συμπεριφορά των υλικών FRP είναι έντονα ψαθυρή (brittle) όταν ξεπεραστεί η επιτρεπόμενη τάση, σε αντίθεση με την πιο όλκιμη (ductile) συμπεριφορά του χάλυβα.

Σήμερα, υπάρχουν κανονιστικές διατάξεις για την παραγωγή αγωγών FRP με πίεση λειτουργίας άνω των 1000psi ( $\sim 6.9\text{MPa}$ ) και διαμέτρους μέχρι 200mm (API 15HR 2001), ενώ στο εμπόριο κυκλοφορούν και αγωγοί υψηλής πίεσης και μεγαλύτερων διαμέτρων. Η μεγάλη αντοχή που επιδεικνύουν τα υλικά FRP επιτρέπουν την κατασκευή αγωγών υψηλής πίεσης με σχετικά μικρά πάχη (π.χ. για αγωγό διαμέτρου 30" και εσωτερικής πίεσης λειτουργίας 1200psi ( $\sim 8.0\text{MPa}$ ) το απαιτούμενο πάχος είναι περίπου 2"). Το μήκος κατασκευής των αγωγών περιορίζεται μόνο από τον τρόπο μεταφοράς τους, ενώ στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται μερικές από τις πιο συχνές μεθόδους σύνδεσης μεταξύ αγωγών FRP.

Σε σύγκριση με τους χαλύβδινους αγωγούς, οι αγωγοί από FRP χαρακτηρίζονται από αρκετά μικρότερο βάρος για τις ίδιες τιμές αντοχής, έχουν αντίστοιχο κόστος κατασκευής ενώ απαιτούν πολύ μικρότερο κόστος συντήρησης δεδομένου ότι δεν σκουριάζουν, έχουν πολύ μεγάλη ανθεκτικότητα σε διαβρωτικούς παράγοντες και κατά συνέπεια δεν χρειάζονται προστασία έναντι του περιβάλλοντος (Bai 2013).

Ενώ όμως τα προαναφερθέντα συγκριτικά πλεονεκτήματα των αγωγών FRP έχουν μικρή ευνοϊκή επιρροή στη συμπεριφορά του αγωγού έναντι διάρρηξης ενεργού ρήγματος, η έντονα ψαθυρή συμπεριφορά του υλικού, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για προβλήματα επιβαλλόμενης μετακίνησης όπως αυτό που εξετάζεται. Αν στη συγκεκριμένη διαπίστωση συνυπολογιστεί και ότι οι συνδέσεις μεταξύ των αγωγών FRP αποτελούν το πιο αδύναμο σημείο τους (Laney 2002), γίνεται κατανοητό ότι η χρήση τους σε περιοχές διασταύρωσης των αγωγών με ενεργά ρήγματα δε θα μπορέσει να αποτελέσει εναλλακτική μέθοδο για τη βελτίωση του σχεδιασμού του αγωγού.



Σχήμα 4.10: Συχνές μέθοδοι σύνδεσης αγωγών FRP (Nayyar 2000).

### 4.3.2 Αγωγοί σύνθετης διατομής (CRLP, SSLP, κτλ.)

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται αγωγοί που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα αυτόνομα υλικά, το ένα παράλληλο στο άλλο ή πεπλεγμένα μεταξύ τους (ως οπλισμός). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η δημιουργία μίας σύνθετης διατομής που συνδυάζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά των υλικών που την αποτελούν.

Η πρώτη σύνθετη διατομή που εξετάστηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας ονομάζεται **αγωγός CRL (Composite Reinforced Line Pipe)** και έχει την ιδιομορφία ότι αφορά χαλύβδινους αγωγούς που ενισχύονται από συνθετικό πολυμερές με ινώδη οπλισμό (FRP). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 η ενίσχυση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε επί τόπου στο πεδίο, για την ενίσχυση αγωγών εν λειτουργία, είτε βιομηχανικά πριν την τοποθέτηση του κάθε τμήματος του αγωγού.

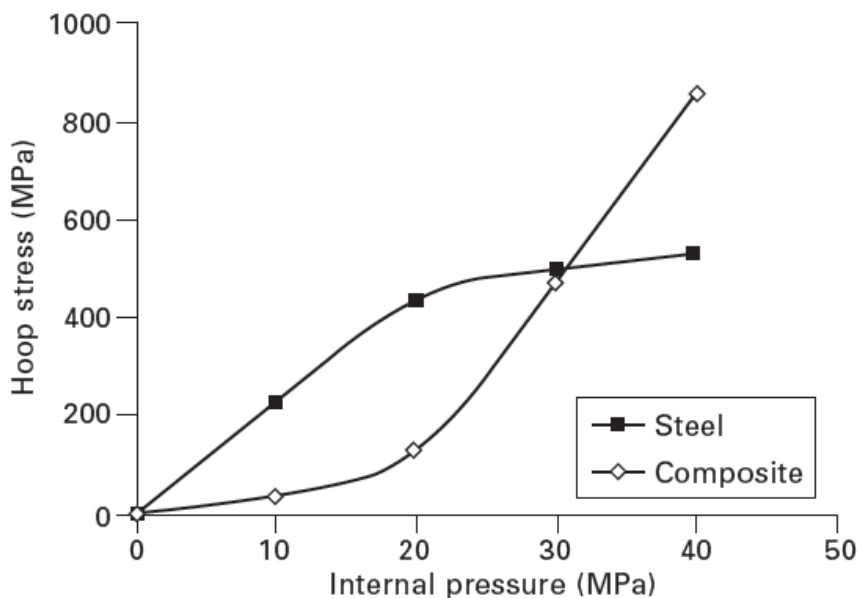


**Σχήμα 4.11:** Κατασκευή αγωγού CRLP (α) επί τόπου και (β) στο εργοστάσιο.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία ενίσχυσης του αγωγού χρησιμοποιήθηκε αρχικά την δεκαετία του 1980, για την επιδιόρθωση τμημάτων αγωγών εν λειτουργία. Αργότερα η μεθοδολογία αυτή επεκτάθηκε για τη συνολική ενίσχυση αγωγών, έτσι ώστε να αναβαθμιστεί η επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας τους και η αντίστασή τους σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, ενώ προτείνεται η χρήση της και για νέους αγωγούς ως πιο οικονομική λύση από τη χρήση χαλύβδινου αγωγού μεγαλύτερης κλάσης (π.χ. API 5L X100).

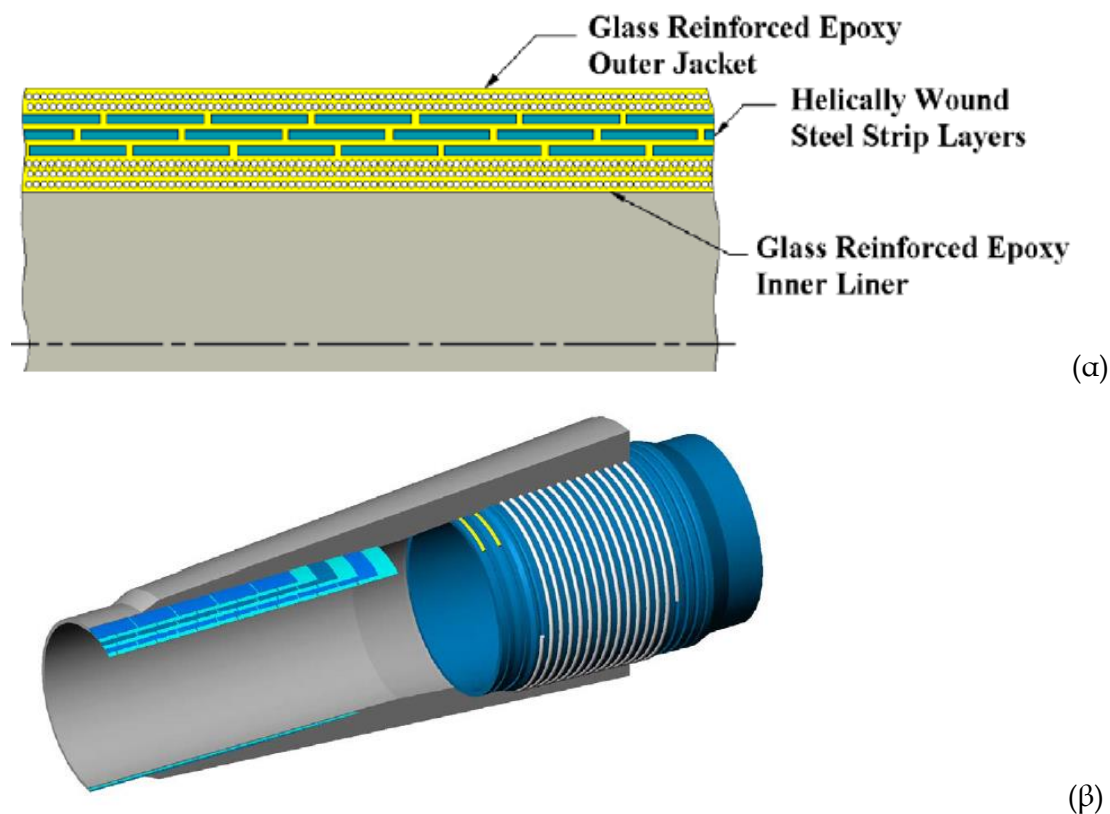
Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η σύγκριση των αναπτυσσόμενων περιφερειακών τάσεων (hoop stress) μεταξύ ενός συνήθους χαλύβδινου αγωγού και ενός αγωγού CRL για διάφορες πιέσεις λειτουργίας του αγωγού (Bai, 2013). Γίνεται κατανοητό ότι, για τις πιέσεις λειτουργίας του αγωγού που μας ενδιαφέρουν (5-15MPa), οι αναπτυσσόμενες τάσεις στους αγωγούς CRL είναι σημαντικά μικρότερες. Πάρα ταύτα, για τα προβλήματα επιβαλλόμενης μετατόπισης όπως αυτό που εξετάζουμε, οι αγωγοί CRL έχουν μόνο δευτερευόντως βελτιωμένη συμπεριφορά από τους

χαλύβδινους αγωγούς (π.χ. ο αγωγός αποκτά αυξημένο πάχος τοιχώματος και κατά συνέπεια αυξημένο φορτίο λυγισμού). Κατά συνέπεια η μεθοδολογία αυτή κρίνεται αντι-οικονομική, δεδομένου ότι αυξάνει σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα της κατασκευής, για συγκριτικά μικρό όφελος στο σχεδιασμό αγωγών υπό μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις.



**Σχήμα 4.12:** Σύγκριση αναπτυσσόμενης δακτυλιοειδούς τάσης σε αγωγούς από χάλυβα και σε αγωγούς CRL (σύμφωνα με Bai 2013).

Το 1991 η εταιρία Enron και το Gas Research Institute (GRI) διαμόρφωσαν από κοινού τον πρώτο αγωγό **SSL (Steel-Strip Laminate Pipe)**, ο οποίος συνδυάζει την υψηλή αντοχή του χάλυβα με την υψηλή ανθεκτικότητα σε διάβρωση του υλικού FRP. Ο αγωγός SSL ουσιαστικά αποτελείται από αλληπάλληλες στρώσεις ελικοειδώς πεπλεγμένων χαλύβδινων ινών, οι οποίες περιβάλλονται εσωτερικά και εξωτερικά από συνεχές κάλυμμα από FRP (συνήθως τύπου GRE: Glass Reinforced Epoxy). Στο Σχήμα 4.13α παρουσιάζεται η τοπική διατομή του τοιχώματος αγωγού SSL Bondstrand της Amerplastics. Ο συγκεκριμένος τύπος αγωγού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εσωτερικές πιέσεις έως και 5800psi (~40 MPa), ενώ είναι εμπορικά διαθέσιμες διατομές μέχρι και 40". Ο αγωγός κατασκευάζεται σε τμήματα με μήκος έως και 12m και ο χρόνος ζωής του φτάνει τα 50 χρόνια. Το κάθε τμήμα του αγωγού προκατασκευάζεται με κατάλληλες διατάξεις στις άκρες για να μπορεί να ενωθεί με το επόμενο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13β.



**Σχήμα 4.13:** (α) Διατομή τοιχώματος αγωγού SSL και (β) σύνδεση τμημάτων αγωγού SSL με προκατασκευασμένες άκρες bell και spigot (Bondstrand SSL από Hall 2004).

Οι συγκεκριμένοι αγωγοί κατασκευάστηκαν για να χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου αναμένονται πολύ δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες που μπορεί να οδηγήσουν σε διάβρωση του χάλυβα και που η χρήση συνήθων αγωγών από FRP δεν επιλέγεται λόγω μεγάλου πάχους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, για την ίδια εσωτερική πίεση, το πάχος του αγωγού SSL είναι περίπου το 1/3 ενός απλού αγωγού από FRP.

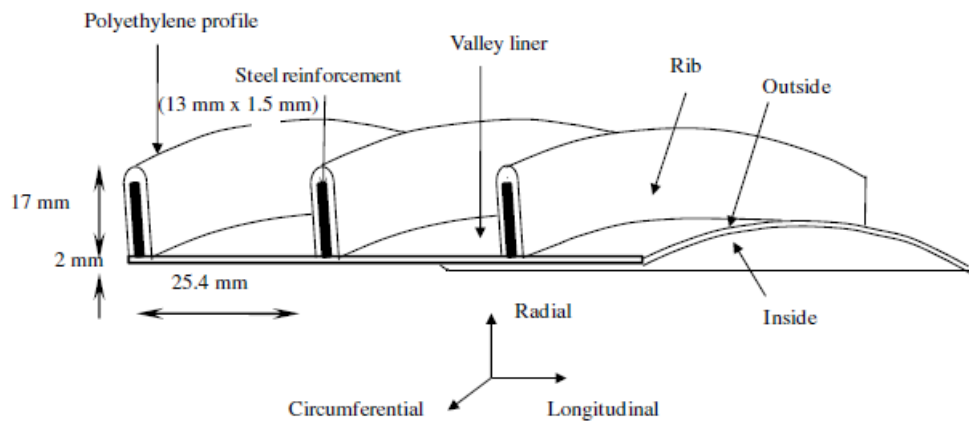
Στη βιβλιογραφία δεν υπήρχαν διαθέσιμες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ή άλλα σχετικά στοιχεία προκειμένου να εκτιμηθεί αναλυτικά η συμπεριφορά του αγωγού SSL σε επιβαλλόμενες μετατοπίσεις λόγω διάρρηξης ρήγματος. Όμως, δεδομένου του πολύ ψαθυρού χαρακτήρα του βασικού υλικού κατασκευής του, το οποίο είναι και αυτό που εξασφαλίζει τη στεγανότητα του αγωγού, εκτιμάται ότι δε θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικός τύπος αγωγού σε περιοχές με ενεργά ρήγματα.

Το τρίτο είδος σύνθετου αγωγού που εντοπίστηκε στη βιβλιογραφία είναι οι **οπλισμένοι πλαστικοί αγωγοί (Steel reinforced plastic pipes)**. Η συνηθέστερη μορφή αυτών των αγωγών είναι η εικονιζόμενη στο Σχήμα 4.14α, με τον χαλύβδινο οπλισμό να βρίσκεται με τη μορφή διχτυού ανάμεσα σε στρώσεις πλαστικού. Πιο πρόσφατα οι Khatri et al. (2013) παρουσίασαν τον αγωγό που φαίνεται στο Σχήμα 4.14β, όπου ο οπλισμός περιβάλλει ελικοειδώς τον πλαστικό αγωγό. Το βασικό πρόβλημα αυτών των αγωγών είναι ότι, όπως και στην περίπτωση των πλαστικών

αγωγών, εμφανίζουν μικρές αντοχές παρά την όπλιση και, κατά συνέπεια, δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δίκτυα μέσης ή υψηλής πίεσης.



(α)



(β)

**Σχήμα 4.14:** (α) Συνήθης μορφή όπλισης πλαστικών αγωγών και (β) προτεινόμενος όπλισμένος αγωγός HDPE από τους Khatri et al. (2013).

# 5

## Υπέρ-Εύκαμπτοι Αγωγοί

---

### 5.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της βιβλιογραφικής αναδρομής έγινε προσπάθεια να εντοπιστούν επιπλέον αγωγοί που είναι τόσο εύκαμπτοι ώστε να έχουν τη δυνατότητα να ακολουθήσουν τη μετατόπιση του εδάφους, χωρίς να αναπτυχθούν πρόσθετες τάσεις στο τοίχωμα του αγωγού λόγω της μετακίνησης αυτής. Τέτοιου είδους «υπέρ-εύκαμπτοι» αγωγοί θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε όλο το μήκος του αγωγού όπου αναμένονται εδαφικές μετακινήσεις και, επί της ουσίας, θα απάλλασαν τον αγωγό από πρόσθετες τάσεις λόγω της διάρρηξης του ρήγματος.

Επί του παρόντος, πολύ εύκαμπτοι αγωγοί έχουν αναπτυχθεί αφενός για την μεταφορά πετρελαίου σε θαλάσσιες πλατφόρμες εξόρυξης και αφετέρου για την αύξηση της ταχύτητας διάστρωσης δικτύων διανομής πετρελαίου και φυσικού αερίου στην ξηρά. Με βάση τον λόγο για τον οποίο έχουν αναπτυχθεί, οι δύο αυτές κατηγορίες θα χαρακτηρίζονται για ευκολία στο υπόλοιπο κείμενο ως **υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί τύπου «ανοιχτής θάλασσας»** και **υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί τύπου «ξηράς»**.

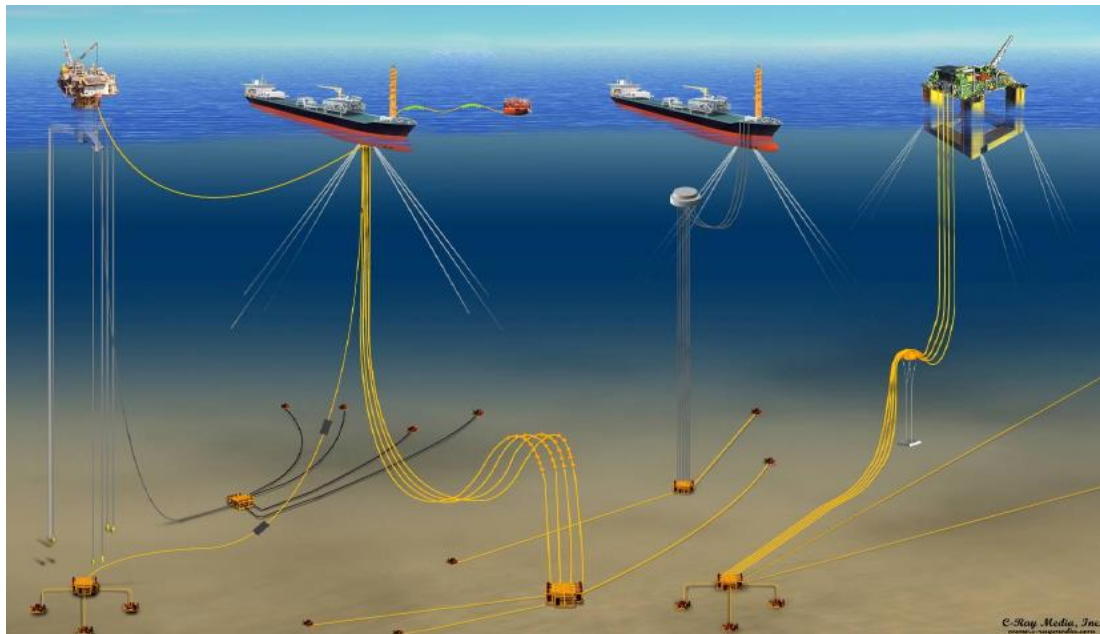
Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν εντοπίστηκε στη βιβλιογραφία κάποια σχετική αναφορά ή πρόταση για την αξιοποίηση τέτοιου είδους αγωγών για τον περιορισμό των παραμορφώσεων υπόγειων αγωγών λόγω μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων.

### 5.2 Υπέρ-Εύκαμπτοι Αγωγοί τύπου «Ανοιχτής Θάλασσας»

Οι υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί τύπου «Ανοιχτής Θάλασσας» έχουν αναπτυχθεί για τη μεταφορά πετρελαίου ή φυσικού αερίου από τις γεωτρήσεις εξόρυξης που γίνονται σε μεγάλο βάθος στην ανοιχτή θάλασσα. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται σχηματικά οι συνήθεις χρήσεις τέτοιων αγωγών. Όπως γίνεται κατανοητό οι αγωγοί αυτοί καλούνται να λειτουργήσουν σε ένα πολύ δύσκολο και συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, με μεγάλες εξωτερικές πιέσεις, κυματισμούς και θαλάσσια ρεύματα,



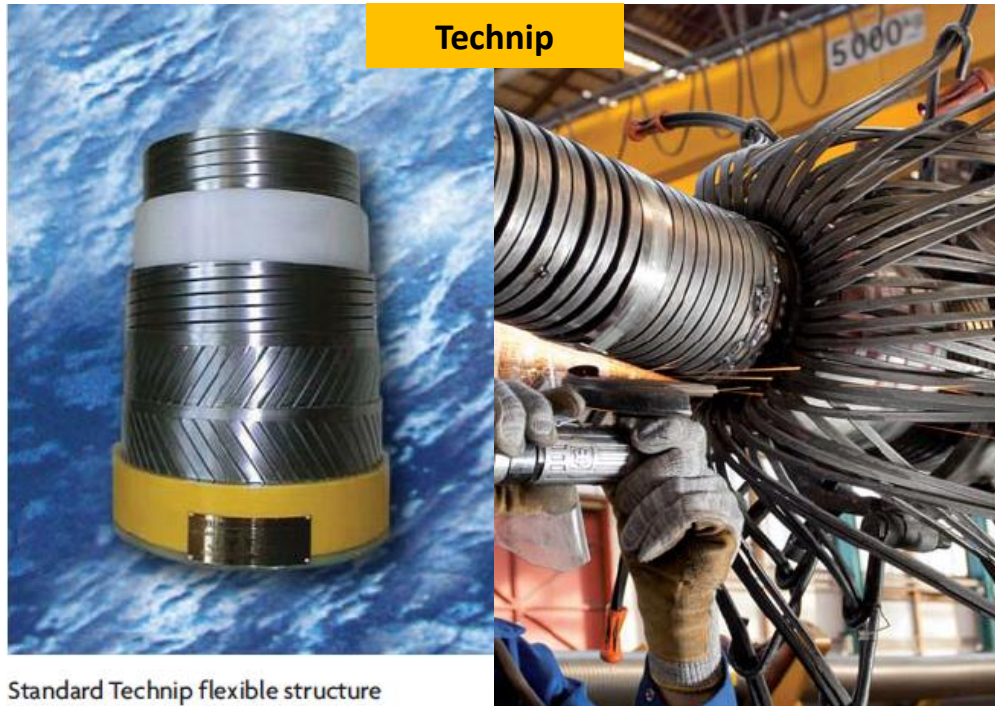
γεγονός που, σε συνδυασμό με το μεγάλο περιβαλλοντικό κόστος που συνεπάγεται ενδεχόμενη αστοχία των αγωγών αυτών, έχει οδηγήσει σε πολύ αυξημένες απαιτήσεις για την κατασκευή τους. Έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχουν την αντοχή και ανθεκτικότητα των χαλύβδινων αγωγών, να είναι απρόσβλητοι από τη διαβρωτική επιρροή της θάλασσας και να έχουν τη δυνατότητα να παραμορφώνονται, ώστε να μην επηρεάζονται από τα δυναμικά φαινόμενα του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται.



**Σχήμα 5.1:** Σχηματική αναπαράσταση της χρήσης υπέρ-εύκαμπτων αγωγών «Ανοιχτής Θάλασσας» (Clevelario 2007)

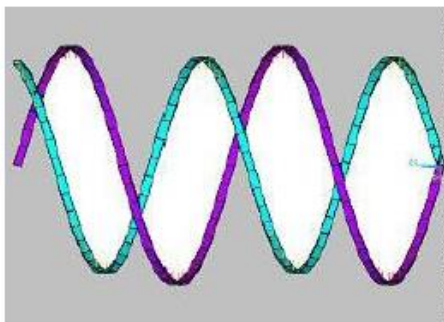
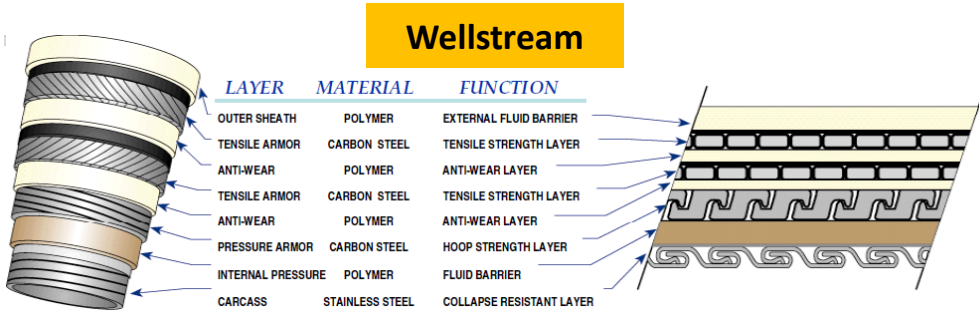
Οι υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί τύπου «ανοιχτής θάλασσας» χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τους συζευγμένους (bonded) και τους μη-συζευγμένους (unbonded) εύκαμπτους αγωγούς, ανάλογα με τον τρόπο που είναι κατασκευασμένοι. Πιο συγκεκριμένα, οι συζευγμένοι αγωγοί (bonded) είναι υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί στους οποίους ο χαλύβδινος οπλισμός είναι ενσωματωμένος και πεπλεγμένος μέσα στα ελαστομερή υλικά και περιγράφονται από την κανονιστική οδηγία API 17K (2005). Οι μη-συζευγμένοι αγωγοί (unbonded) αντίθετα, αποτελούνται από ξεχωριστές στρώσεις συνθετικών πολυμερών και μετάλλων, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η σχετική μετακίνηση μεταξύ των στρώσεων αυτών, ενώ περιγράφονται από την κανονιστική οδηγία API 17J (2008).

Στο Σχήμα 5.2 και στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται παραδείγματα συζευγμένων και μη-συζευγμένων αγωγών αντίστοιχα. Οι διαθέσιμες εμπορικά διάμετροι τέτοιων εύκαμπτων αγωγών κυμαίνονται από 2" έως 24", η επιτρεπόμενη εσωτερική πίεση λειτουργίας ξεπερνάει τα 10000psi (~69.0MPa) για τις μικρότερες διαμέτρους και τα 1000psi (~7.0MPa) για τις μεγαλύτερες, ενώ η αντοχή τους σε εξωτερικές πιέσεις είναι πολύ μεγάλη.



**Technip**

Standard Technip flexible structure



Σχήμα 5.2: Παραδείγματα συζευγμένων υπέρ-εύκαμπτων αγωγών τύπου «Ανοιχτής Θάλασσας».

**Contitech**



Σχήμα 5.3: Παραδείγματα μη-συζευγμένων υπέρ-εύκαμπτων αγωγών τύπου «Ανοιχτής Θάλασσας».

Αν και δεν υπάρχουν πολλά διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τη δυνατότητα παραμόρφωσης τέτοιων αγωγών ή τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης της σύνθετης διατομής -κυρίως επειδή οι συγκεκριμένοι αγωγοί βρίσκονται στην αιχμή της τεχνολογίας, είναι κατοχυρωμένοι σε πατέντες και επομένως τα ακριβή δεδομένα δε δημοσιεύονται- είναι φανερό ότι αν χρησιμοποιηθούν στην περιοχή διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, κατά τη διάρρηξη του ρηγματος θα μπορέσουν να ακολουθήσουν τη μετακίνηση του εδάφους, χωρίς να επιβληθούν πρόσθετες παραμορφώσεις στον υπόλοιπο αγωγό. Το κύριο πρόβλημα που παρουσιάζουν οι υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί τύπου «ανοιχτής θάλασσας» είναι το δυσανάλογα μεγάλο κόστος τους, το οποίο καθιστά απαγορευτική την αξιοποίησή τους σε συνήθη έργα.

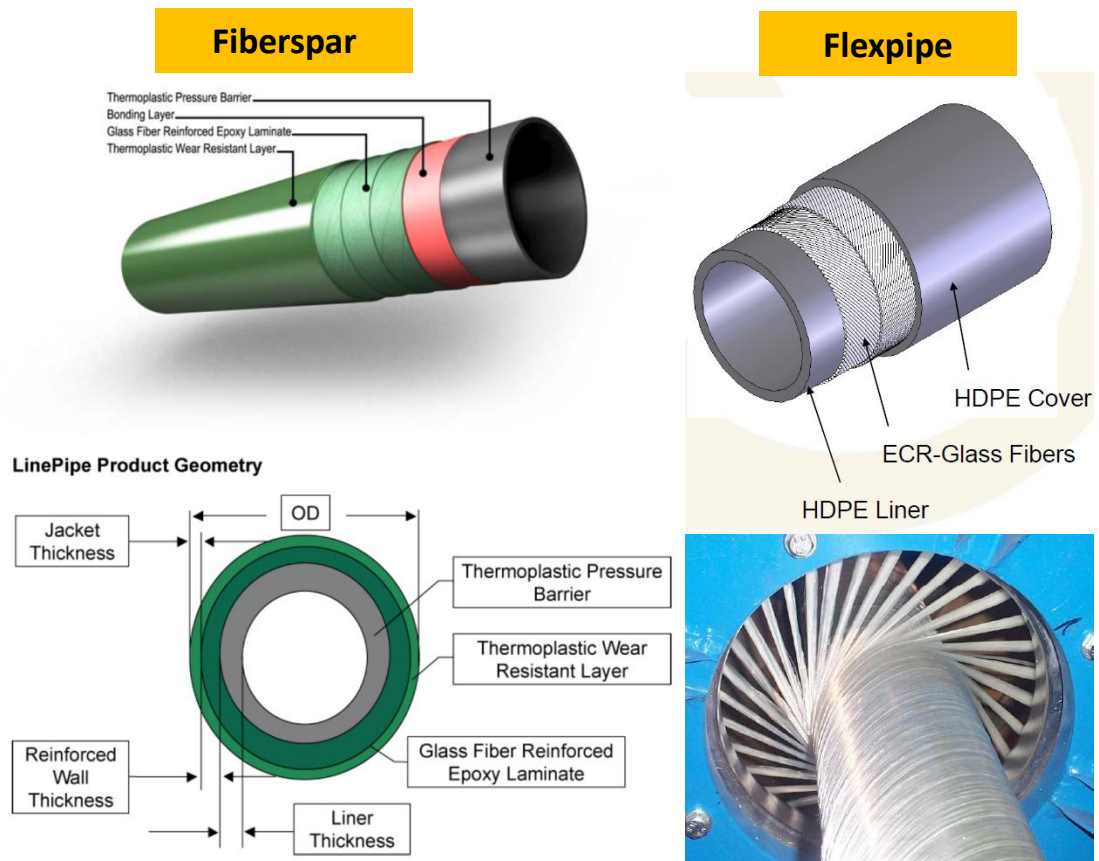
### 5.3 Υπέρ-Εύκαμπτοι Αγωγοί τύπου «Ξηράς»

Οι υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί τύπου «Ξηράς» έχουν αναπτυχθεί για τη διευκόλυνση της απόθεσης των υψηλής πίεσης δικτύων διανομής πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Οι αγωγοί αυτοί είναι αρκετά εύκαμπτοι, ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σε μεγάλα καρούλια όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 5.4 για να μεταφερθούν στο χώρο απόθεσης όπου, εφόσον έχει ήδη πραγματοποιηθεί η εκσκαφή της σχετικής τάφρου, ο αγωγός ξετυλίγεται σταδιακά και εναποτίθεται στο έδαφος.



**Σχήμα 5.4:** Τρόπος μεταφοράς και τοποθέτησης υπέρ-εύκαμπτων αγωγών τύπου «Ξηράς».

Σύμφωνα με τους Kulshreshtha & Vasile (2002) ένας τυπικός υπέρ-εύκαμπτος αγωγός τύπου «Ξηράς» αποτελείται από μία ή περισσότερες στρώσεις FRP (πολυμερή με ίνες από άνθρακα, γυαλί ή/και kevlar) μεγάλης αντοχής, οι οποίες περιβάλλουν μία θερμοπλαστική εσωτερική στρώση. Αν χρειάζεται μπορεί να προστεθεί επιπλέον εξωτερική θερμοπλαστική στρώση προστασίας. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται τυπικές διατομές υπέρ-εύκαμπτων αγωγών τύπου «Ξηράς». Επί του παρόντος, ενώ οι εμπορικά διαθέσιμοι αγωγοί έχουν ικανοποιητικές μέγιστες επιτρεπόμενες εσωτερικές πιέσεις έως και 2500psi (~17MPa), το ίδιο δεν ισχύει και με τις διαθέσιμες διαμέτρους που δεν ξεπερνούν τις 6", καθιστώντας τη χρήση αυτού του είδους αγωγών ουσιαστικά αδύνατη για την πλειονότητα των δικτύων μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου.



Σχήμα 5.5: Παραδείγματα διατομών υπέρ-εύκαμπτων αγωγών τύπου «Ξηράς».

## Εκτενής Περίληψη - Συμπεράσματα

---

### 6.1 Γενικά

Η παρούσα βιβλιογραφική επισκόπηση αφορά σε νέες μεθοδολογίες κατασκευής υπόγειων αγωγών σε περιοχές μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων, όπως αυτές που επιβάλλονται από τη διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων. Διευκρινίζεται ότι, αν και αυτού του είδους οι μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις αποτελούν ίσως το σημαντικότερο παράγοντα αστοχιών σε υπόγειους αγωγούς, οι υπάρχουσες σήμερα «συμβατικές» μεθοδολογίες δεν επαρκούν για την αντιμετώπιση τους, δεδομένου ότι η ευεργετική τους δράση εξαντλείται σε περιπτώσεις μικρών σχετικά μετακινήσεων μέχρι μία έως δύο διαμέτρους (αντικατάσταση είδους χάλυβα, μείωση τριβών διεπιφάνειας, διεύρυνση τάφρου, αύξηση πάχους τοιχώματος αγωγού), ή το κόστος τους αυξάνει δυσανάλογα όταν εφαρμόζονται σε περιπτώσεις μεγαλύτερων μετακινήσεων (π.χ. κατασκευή "θυσιαζόμενου" εξωτερικού υπόγειου κιβωτίου).

Στην προσπάθεια διερεύνησης εναλλακτικών μεθοδολογιών που θα επιτρέπουν τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό των αγωγών υπό μεγάλες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, εντοπίστηκαν και αξιολογήθηκαν προκαταρκτικά οι ακόλουθες κατηγορίες εναλλακτικών λύσεων:

- Χρήση **εύκαμπτων κόμβων** στην περιοχή που αναμένονται οι εδαφικές μετακινήσεις, έτσι ώστε να συγκεντρωθεί το μεγαλύτερο μέρος των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων και στροφών σε αυτούς και να μειωθούν οι παραμορφώσεις που καλούνται να πάρουν τα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού.
- Χρήση **πολυμερών πλαστικών υλικών (πλαστικοί ή σύνθετοι αγωγοί)**, που θα επιτρέπουν την ανάληψη μεγαλύτερων παραμορφώσεων χωρίς αστοχία.
- Χρήση **υπέρ-εύκαμπτων αγωγών** στην περιοχή που αναμένονται οι εδαφικές μετακινήσεις, οι οποίοι θα έχουν τη δυνατότητα να ακολουθήσουν απόλυτα την μετακίνηση του εδάφους σε όλο το μήκος επιρροής της διάρρηξης, χωρίς προβλήματα εφελκυστικής ή θλιπτικής (σε λογισμό) αστοχίας.

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν σχετικά με τις εν λόγω εναλλακτικές λύσεις κατασκευής του αγωγού παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

## 6.2 Κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών μεθοδολογιών

Το πρόβλημα επιλογής εναλλακτικών διατάξεων ή υλικού για το σχεδιασμό υπόγειων αγωγών που υπόκεινται σε μεγάλες μετακινήσεις είναι οικονομοτεχνικής φύσης και τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

**I) Κριτήρια Σχεδιασμού.** Η νέα διαμόρφωση, προκειμένου να μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική μέθοδο σχεδιασμού σε περιοχές αναμενόμενων μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων, θα πρέπει:

- να έχει τη **δυνατότητα μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου υψηλής πίεσης (~8.0-10.0MPa)**, δεδομένου ότι τέτοιες πιέσεις χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς, τα οποία έχουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα να διασχίζουν περιοχές με ενεργά ρήγματα και συγχρόνως έχουν και τις μεγαλύτερες συνέπειες σε περίπτωση αστοχίας.
- να δρα ανακουφιστικά στον υπόλοιπο αγωγό, μειώνοντας σημαντικά τις **αναπτυσσόμενες εφελκυστικές και θλιπτικές του παραμορφώσεις**.

Τα κριτήρια αυτά πρέπει να ικανοποιούνται επαρκώς για να μπορεί οποιαδήποτε διάταξη να αποτελέσει εναλλακτική λύση σχεδιασμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι, από τις συμβατικές λύσεις για το σχεδιασμό υπόγειων αγωγών σε ρηξιγενείς ζώνες, η μόνη που μπορεί να τα ικανοποιήσει επαρκώς είναι η κατασκευή «θυσιαζόμενου» εξωτερικού κελύφους στον αγωγό.

**II) Κριτήρια Κατασκευής.** Σημαντικό στοιχείο στην αξιολόγηση των εναλλακτικών μεθοδολογιών είναι η ευκολία κατασκευής της προτεινόμενης διάταξης στο πεδίο και πιο συγκεκριμένα:

- το πόσο **χρονοβόρο και δύσκολο είναι να κατασκευαστεί στο πεδίο ή να τοποθετηθεί** (αν πρόκειται για προκατασκευασμένα τμήματα), και
- το πόσο **τεχνικά δύσκολη και ασφαλής είναι η σύνδεση της εναλλακτικής διάταξης με τα υπόλοιπα τμήματα** του αγωγού, πριν και μετά τη ρηξιγενή ζώνη.

**III) Κριτήρια Προμήθειας.** Η τελευταία κατηγορία κριτηρίων που αξιολογήθηκε ήταν η δυνατότητα προμήθειας των διατάξεων και πιο συγκεκριμένα:

- Αν υπάρχει **δυνατότητα κατασκευής/προμήθειας των εν λόγω διατάξεων στις συνήθεις διαμέτρους των αγωγών** μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου μέσης και υψηλής πίεσης (D=18" - 40").

- Αν οι εναλλακτικές διατάξεις είναι εμπορικά διαθέσιμες επί του παρόντος ή υπάρχει η δυνατότητα άμεσης κατασκευής και προμήθειάς τους μετά από σχετική παραγγελία.
- Πόσο είναι το κόστος κατασκευής της εναλλακτικής διάταξης σε σχέση με το κόστος του απλού χαλύβδινου αγωγού.

### 6.3 Αξιολόγηση εναλλακτικών μεθοδολογιών και υλικών κατασκευής

Με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια αξιολόγησης γίνεται στη συνέχεια συγκριτική αξιολόγηση για τις συμβατικές μεθοδολογίες και εναλλακτικά εξεταζόμενες λύσεις σχεδιασμού υπόγειων αγωγών υπό μόνιμες μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις. Τα συμπεράσματα αυτά παρουσιάζονται σχηματικά και στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί.

#### Συμβατικές μεθοδολογίες:

**Κατασκευή «θυσιαζόμενου» εξωτερικού κελύφους από Ο.Σ.** \_ Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί επί του παρόντος τη μοναδική μεθοδολογία σχεδιασμού υπόγειων αγωγών σε διασταυρώσεις με ενεργά ρήγματα στα οποία αναμένονται μεγάλες σεισμικές μετακινήσεις (μεγαλύτερες από 1.5-2.0 D). Η μεθοδολογία καλύπτει επαρκώς όλα τα υπό αξιολόγηση κριτήρια αλλά το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι απαιτεί την κατασκευή ενός «θυσιαζόμενου» τεχνικού έργου, το οποίο δύναται να έχει αρκετά μεγάλες διαστάσεις ανάλογα με τη διάμετρο του αγωγού, τις αναμενόμενες εδαφικές μετακινήσεις του ρήγματος και την αβεβαιότητα της περιοχής διασταύρωσης με το εν λόγω ρήγμα, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δυσανάλογα το κόστος και η δυσκολία κατασκευής του.

#### Προσθήκη ενδιάμεσων εύκαμπτων κόμβων:

**Εύκαμπτοι κόμβοι τύπου “Bellows”.**\_ Υπάρχουν σήμερα εμπορικά διαθέσιμοι εύκαμπτοι κόμβοι τύπου “Bellows” με τις απαιτούμενες διαστάσεις και αντοχή σε εσωτερική πίεση, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυα μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου μέσης και υψηλής πίεσης. Οι κόμβοι αυτοί έχουν τη δυνατότητα να παραλαμβάνουν ταυτόχρονα μετακινήσεις και στροφές και κατά συνέπεια, στο βαθμό που είναι σωστά τοποθετημένοι, οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις στα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού, δύναται να απομειωθούν αισθητά. Οι κόμβοι μπορούν να εγκατασταθούν εύκολα στο πεδίο με απλή συγκόλληση με τα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού και αποτελούν μία σχετικά οικονομική λύση, με κόστος σχετικά μεγαλύτερο από το κόστος των απλών χαλύβδινων αγωγών.

**Απλοι κόμβοι ολίσθησης.**\_ Αντίστοιχα συμπεράσματα για τη διαθεσιμότητα, την ευκολία κατασκευής και το κόστος μπορούν να διατυπωθούν και για τους απλούς κόμβους ολίσθησης. Οι κόμβοι αυτοί, στον βαθμό που είναι σωστά τοποθετημένοι



και σχεδιασμένοι, μπορούν να παραλάβουν τις επιβαλλόμενες αξονικές μετακινήσεις του αγωγού και κατά συνέπεια να μειωθούν οι εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού. Η επιρροή τους βέβαια, δεν προβλέπεται να είναι αντίστοιχη με αυτή των κόμβων τύπου “bellows”, δεδομένου ότι δεν μπορούν να απομειώσουν τις καμπτικές παραμορφώσεις του αγωγού.

#### **Αντικατάσταση του υλικού του αγωγού:**

**Αγωγοί από πλαστικό (PVC, HDPE, κτλ.).**\_ Οι αγωγοί από πλαστικό είναι εν γένει περισσότερο εύκαμπτοι και όλκιμοι (ductile) σε σύγκριση με τον χάλυβα, και παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε περιοχές μεγάλων τεκτονικών μετατοπίσεων όπως έχει επαληθευτεί πειραματικά (π.χ. Ha et al. 2008a, 2008b, 2010, Abdoun et al. 2008, 2009). Παρά ταύτα, δε μπορούν να αξιοποιηθούν ως εναλλακτική μεθοδολογία για την κατασκευή αγωγών φυσικού αερίου ή πετρελαίου στους οποίους αναπτύσσονται μεγάλες τιμές εσωτερικής πίεσης, λόγω της πολύ μικρότερης εφελκυστικής αντοχής των υλικών αυτών σε σύγκριση με τον χάλυβα και κατά συνέπεια δεν καλύπτουν ένα από τα πιο βασικά κριτήρια σχεδιασμού.

**Αγωγοί με ινώδη όπλιση (FRP).**\_ Τα υλικά με ινώδη όπλιση παρουσιάζουν πολύ μεγάλες τιμές αντοχής κατά μήκος των ινών και με σωστή διάταξη των διάφορων στρώσεων μπορούν να κατασκευαστούν αγωγοί οποιασδήποτε διάστασης, που να επιτρέπουν την ασφαλή μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου σε μέσες και μεγάλες πιέσεις. Το βασικό πρόβλημα των αγωγών αυτού του είδους είναι ότι το υλικό κατασκευής τους, παρά τη μεγάλη αντοχή του, παρουσιάζει έντονα ψαθυρή συμπεριφορά σε μέτριες και μεγάλες παραμορφώσεις (~1.5-3.5%) που, σε προβλήματα ελεγχόμενης παραμόρφωσης όπως αυτό που εξετάζουμε, μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφική αστοχία. Πρόσθετο πρόβλημα αποτελεί η δυσκολία διαμόρφωσης ασφαλών συνδέσεων μεταξύ των επιμέρους τμημάτων.

**Σύνθετοι αγωγοί τύπου CRL.**\_ Οι αγωγοί τύπου CRL είναι συνήθεις χαλύβδινοι αγωγοί που ενισχύονται περιμετρικά από ένα συνθετικό πολυμερές με ινώδη όπλιση (FRP). Οι αγωγοί αυτοί εμφανίζουν βελτιωμένη συμπεριφορά έναντι των χαλύβδινων αγωγών όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες δακτυλιοειδείς τάσεις λόγω εσωτερικής πίεσης, ενώ λόγω του αυξημένου πάχους τους έναντι του απλού χαλύβδινου αγωγού, αυξάνεται η κρίσιμη παραμόρφωση λυγισμού. Η λύση αυτή είναι η πλέον ενδεικνυόμενη για την ενίσχυση ήδη εγκατεστημένων αγωγών, αλλά, σχετικά με το εξεταζόμενο πρόβλημα, αποτελεί ακριβή και πολύπλοκη κατασκευαστικά λύση, με συγκριτικά μικρό ευνοϊκό αποτέλεσμα στη συμπεριφορά του αγωγού έναντι μεγάλων μόνιμων παραμορφώσεων.

**Σύνθετοι αγωγοί τύπου SSL.**\_ Πρακτικά πρόκειται για αγωγούς FRP πολλαπλών στρωμάτων ενισχυμένους με κάποιου είδους ελικοειδή όπλιση. Είναι εμπορικά διαθέσιμοι στις απαιτούμενες διαστάσεις και τιμές αντοχής σε εσωτερική πίεση, όμως, αν και δεν υπάρχουν διαθέσιμα αναλυτικά δεδομένα για τη συμπεριφορά τους υπό μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις, κρίνεται ότι η ψαθυρότητα του υλικού FRP και σε

αυτή την περίπτωση αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα για τη χρήση τους σε τέτοιου είδους εφαρμογές.

**Πλαστικοί αγωγοί με μεταλλικό οπλισμό.**\_ Η συγκεκριμένη κατηγορία αγωγών έχει αναπτυχθεί για την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και της αντοχής των απλών πλαστικών αγωγών, όμως οι βελτιωμένες αυτές τιμές δεν επαρκούν για τη αξιοποίησή τους σε δίκτυα μέσης ή υψηλής πίεσης.

**Υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί τύπου «Ξηράς».**\_ Πρόκειται για αρκετά εύκαμπτους ώστε να μπορούν να ακολουθήσουν την μετακίνηση του εδάφους λόγω της διάρρηξης του ρήγματος, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού. Έχουν υψηλές αντοχές σε εσωτερική πίεση ενώ η απόθεσή τους στο πεδίο είναι πολύ εύκολη με τη μεταφορά τους σε ειδικά καρούλια. Το κυριότερο πρόβλημα των εν λόγω αγωγών είναι ότι επί του παρόντος οι διαθέσιμες διαμέτροι αγωγών είναι πολύ μικρές ( $D < 6''$ ), γεγονός που ουσιαστικά τους αποκλείει από τη χρήση σε περιπτώσεις συνήθων αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου ( $D = 18'' - 40''$ ).

**Υπέρ-εύκαμπτοι αγωγοί τύπου «Ανοιχτής Θάλασσας».**\_ Αυτοί οι αγωγοί έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με την προηγούμενη κατηγορία αγωγών, ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλες τιμές αντοχής σε εξωτερικά φορτία. Το εύρος διαθέσιμων διαμέτρων είναι μεγαλύτερο ( $D < 20''$ ), αλλά η εξαιρετικά μικρή διαθεσιμότητά τους και το πολύ υψηλό κόστος τους αποτελούν παράγοντες που περιορίζουν τη δυνατότητα αξιοποίησής τους ως εναλλακτικό τρόπο σχεδιασμού υπόγειων αγωγών υπό μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις.

**Πίνακας 6.1: Αξιολόγηση εναλλακτικών μεθοδολογιών για τον σχεδιασμό υπόγειων αγωγών υποκείμενων σε μόνιμες μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις**

α/α	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΛΥΣΗ	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ			ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ		ΠΡΟΜΗΘΕΙΑ		
		P <sub>INT</sub>	ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚ.	ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ	ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΑΓΩΓΟ	D <sub>max</sub>	Διαθεσιμότητα	Κόστος*
1	Θυσιαζόμενα κελύφη	OK	ΜΕΓΑΛΗ	ΜΕΓΑΛΗ	ΔΥΣΚΟΛΗ**	ΔΕΝ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ	ΧΩΡΙΣ ΟΡΙΟ	ΜΕΓΑΛΗ	ΜΕΓΑΛΟ**
2	Εύκαμπτοι κόμβοι "Bellows"	OK	ΜΕΓΑΛΗ	ΜΕΓΑΛΗ	ΕΥΚΟΛΗ	ΕΥΚΟΛΗ	>40"	ΛΟΓΙΚΗ	ΜΕΤΡΙΟ
3	Εύκαμπτοι κόμβοι ολίσθησης	OK	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΙΚΡΗ	ΕΥΚΟΛΗ	ΕΥΚΟΛΗ		ΛΟΓΙΚΗ	ΜΕΤΡΙΟ
4	Πλαστικοί Αγωγοί (HDPE, PVC, κτλ.)	ΧΑΜΗΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ	ΕΥΚΟΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΧΩΡΙΣ ΟΡΙΟ	ΜΕΓΑΛΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΟ
5	Σύνθετοι Αγωγοί FRP	OK	?***	?***	ΕΥΚΟΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΧΩΡΙΣ ΟΡΙΟ	ΜΕΓΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΟ
6	Σύνθετοι αγωγοί CRL	OK	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΓΑΛΗ	ΔΥΣΚΟΛΗ	ΕΥΚΟΛΗ	ΧΩΡΙΣ ΟΡΙΟ	ΛΟΓΙΚΗ	ΜΕΓΑΛΟ
7	Σύνθετοι Αγωγοί SSL	OK	?***	?***	ΕΥΚΟΛΗ	ΕΥΚΟΛΗ	>40"	ΛΟΓΙΚΗ	ΜΕΓΑΛΟ
8	Οπλισμένοι Πλαστικοί Αγωγοί	ΧΑΜΗΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ	ΕΥΚΟΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	>40"	ΛΟΓΙΚΗ	ΜΕΤΡΙΟ
9	Υπέρ-Εύκαμπτοι "Ξηράς"	OK	ΜΕΓΑΛΗ	ΜΕΓΑΛΗ	ΕΥΚΟΛΗ	ΕΥΚΟΛΗ	<6"	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΑΛΟ
10	Υπέρ-Εύκαμπτοι "Αν. Θάλασσας"	OK	ΜΕΓΑΛΗ	ΜΕΓΑΛΗ	ΕΥΚΟΛΗ	ΕΥΚΟΛΗ	<20"	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΥΨΗΛΟ

\* Τα κόστη χαρακτηρίζονται ως ελάχιστο, μέτριο, μεγάλο και υψηλό ανάλογα με το αν είναι μικρότερο, περίπου ίσο, μεγαλύτερο ή πολύ μεγαλύτερο αντίστοιχα, από το κόστος του απλού χαλύβδινου αγωγού.

\*\* Το κόστος και οι κατασκευαστικές δυσκολίες αυξάνονται με τη διάμετρο του κελύφους και την αναμενόμενη μετατόπιση του ρήγματος.

\*\*\* Οι αγωγοί που στηρίζονται σε υλικά FRP δύναται να έχουν μεγαλύτερη αντοχή από το χάλυβα αλλά η έντονα ψαθυρή συμπεριφορά που επιδεικνύουν μόλις φτάσουν στο όριο διαρροής/θραύσης δε θεωρείται κατάλληλη για προβλήματα επιβαλλόμενης παραμόρφωσης όπως αυτό που εξετάζεται.

#### 6.4 Συμπεράσματα & Προτάσεις

Με βάση τα προαναφερθέντα, η χρήση εύκαμπτων κόμβων κατά μήκος της περιοχής που αναμένονται οι μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, αποτελεί την πιο πρόσφορη (τεχνικά και οικονομικά) εναλλακτική μεθοδολογία, από αυτές που εξετάστηκαν για το σχεδιασμό υπόγειων αγωγών που διασταυρώνονται με ενεργά ρήγματα, τόσο για την περαιτέρω διερεύνησή της στα πλαίσια αυτού του ερευνητικού προγράμματος, όσο και για τη μελλοντική εφαρμογή της σε σχετικές μελέτες. Για αυτό το λόγο ζητήθηκε από τρεις εταιρίες που κατασκευάζουν τέτοιου είδους κόμβους να στείλουν προσφορές για την αγορά κόμβων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα πειράματα που θα πραγματοποιηθούν στη συνέχεια. Η συγκριτική παράθεση των στοιχείων των προσφορών παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

Στα πλαίσια αυτής της βιβλιογραφικής αναδρομής εξετάστηκε επίσης η δυνατότητα αντικατάστασης του υλικού του αγωγού, στην περιοχή που επηρεάζεται από τις μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις. Όπως διαπιστώθηκε, τόσο οι πλαστικοί αγωγοί (PVC, HDPE, κτλ), όσο και οι αγωγοί σύνθετης διατομής (FRP, CRLP, SSLP) που εξετάστηκαν, δεν πληρούν τα απαραίτητα συνδυασμένα κριτήρια για να αποτελέσουν εναλλακτική μεθοδολογία σχεδιασμού έναντι μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων, είτε επειδή δεν καλύπτεται κάποιο από τα βασικά κριτήρια

σχεδιασμού (πλαστικοί αγωγοί, αγωγοί FRP, SSL), είτε επειδή αυξάνεται πολύ το κόστος και οι δυσκολίες κατασκευής, για μικρή θετική συνεισφορά στην απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων του αγωγού (αγωγοί CRL).

Αντίθετα, **μεγάλη συνεισφορά στην απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων του αγωγού θα μπορούσε να έχει η χρήση των υπέρ-εύκαμπτων αγωγών** που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Οι αγωγοί αυτοί μπορούν να ακολουθήσουν την παραμόρφωση του περιβάλλοντος εδάφους λόγω π.χ. διάρρηξης ενεργού ρήγματος, χωρίς να επιβάλλουν στα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού πρόσθετες τάσεις ή παραμορφώσεις. Δυστυχώς όμως, **επί του παρόντος, οι τεχνολογίες αυτές είτε είναι πολύ ακριβές**, όπως στην περίπτωση των υπέρ-εύκαμπτων αγωγών τύπου «Ανοιχτής θάλασσας», **είτε μπορούν να εφαρμοστούν μόνο για αγωγούς μικρής διαμέτρου**, όπως στην περίπτωση των υπέρ-εύκαμπτων αγωγών τύπου «Ξηράς». Κατά συνέπεια κρίνεται ότι σήμερα η χρήση υπέρ-εύκαμπτων αγωγών **δε μπορεί να προταθεί για περαιτέρω διερεύνηση στα πλαίσια αυτού του ερευνητικού προγράμματος** ή για εφαρμογή σε συνήθη έργα δικτύων μεταφοράς φυσικού αερίου ή πετρελαίου μέσης ή υψηλής πίεσης.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

---

Abdoun T.H., Ha D. & O'Rourke M.J. (2008), "Behavior of Moderately Buried HDPE Pipelines Subject Strike-Slip Faulting", The 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IAGMAG), 1-6 October, 2008, Goa, India.

Abdoun T.H., Ha D., O'Rourke M.J., Symans M.D., O'Rourke T.D., Palmer M.C. & Stewart H.E. (2009), "Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29, pp. 415-427.

American Lifeline Alliance -ALA/ ASCE- (2001), "Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe", ASCE, (with addenda through February 2005) 76p.

API SPEC 15HR (2001), "Specification for High Pressure Fiberglass Line Pipe", 3<sup>rd</sup> Edition, August 2001, American Petroleum Institute.

API SPEC 17K (2005), "Specification for Bonded Flexible Pipe", 2<sup>nd</sup> Edition, January 2005, American Petroleum Institute.

API SPEC 17J (2008), "Specification for Unbonded Flexible Pipe", 3<sup>rd</sup> Edition, January 2008, American Petroleum Institute.

American Society of Civil Engineers -ASCE- (1984), "Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems", Committee on Gas and Liquid Fuel Pipelines, ASCE, 473p.

Antaki G.A. (2005), "Piping and Pipeline Engineering. Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair", Marcel Dekker Inc., New York, Basel.

Bai J. (2013), "Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications", Woodhead Publishing Limited, 906p.

Ballantyne D.B. (1992), "Thoughts on a Pipeline Design Standard Incorporating Countermeasure for Permanent Ground Deformation", Proceedings of the Fourth Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and

Countermeasures for Soil Liquefaction, Honolulu, Hawaii, Technical Report NCEER-92-0019, pp. 875-887.

Canadian Association of Petroleum Producers (2009), "Best Management Practice: Use of Reinforced Composite Pipe (Non-Metallic Pipelines)", November 2009.

CEN European Committee for Standardisation (2003), "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Silos, tanks and pipelines, Draft No 2", Ref. No. EN1998-4: 2003 (E), December 2003.

Cheng L. (2001), "Seismic Design of Water Pipelines at Fault Crossing", Proceeding of The 2 Japan and U.S. Workshop on Seismic Measures for Water Supply, AWWA, Tokyo, Japan, August 2001.

Clevelario J. (2007), "Introduction to Unbonded Flexible Pipe Design & Manufacturing", Presentation, Course on Flexible Pipes, Wellstream corp.

Cubrinovski M., Henderson D. & Bradley B. (2012), "Liquefaction Impacts in Residential Areas in the 2010-2011 Christchurch Earthquakes", Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan.

Dijkers, R. J., Chung, R. M., Mohraz, B., Lew, H. S. & Wright, R. N. (1996), "NISTIR 5907: Proceedings of a Workshop on Developing and Adopting Seismic Design and Construction Standards for Lifelines", October 1996.

Egushi R. T. (1983), "Seismic Vulnerability Models for Underground Pipes", Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, ASME, New York, June, pp. 368-373.

Egushi R. T. (1991), "Early Post-Earthquake Damage Detection for Underground Lifelines", Final Report to the National Science Foundation, Dames and Moore P.C., Los Angeles, California.

Ford D.B. (1983), "Joint Design for Pipelines Subjected to Large Ground Deformations", Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, ASME, New York, June, pp. 160-165.

Federal Emergency Management Agency -FEMA- 233 (1992), "Earthquake Resistant Construction of Gas and Liquid Fuel Pipeline Systems Serving, or Regulated by, the Federal Government", Earthquake Hazard Reduction Series 67, 68p.

Hall W. J., Nyman D. J., Johnson E. R. & Norton J. D. (2003), "Performance of the Trans-Alaska pipeline in the November 3, 2002 Denali Fault Earthquake", Proceedings of the 6<sup>th</sup> U.S. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, August 2003.

Ha D., Abdoun T.H., O'Rourke M.J., Symans M.D., O'Rourke T.D., Palmer M.C. & Stewart H.E. (2008a), "Centrifuge Modeling of Earthquake Effects on Buried High-Density Polyethylene (HDPE) Pipelines Crossing Fault zones", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 10, October 1.

Ha D., Abdoun T.H., O'Rourke M.J., Symans M.D., O'Rourke T.D., Palmer M.C. & Stewart H.E. (2008b), "Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strike-slip faulting - a centrifuge investigation", *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(12): 1733-1742, 10.1139/T08-089.

Ha D., Abdoun T.H., O'Rourke M.J., Symans M.D., O'Rourke T.D., Palmer M.C. & Stewart H.E. (2010), "Earthquake Faulting Effects on Buried Pipelines – Case History and Centrifuge Study", *Journal of Earthquake Engineering*, 14:5, 646-669.

Hall S.C. (2004), "Field Corrosion Monitoring of Steel-Strip Laminate (SSL) Pipe", Conference: 2004 SEM X International Congress & Exposition on Experimental & Applied Mechanics - Addressing Future Experimental Mechanics Challenges with Special Focus on Extreme Environments.

Isenberg J. & Richardson E. (1989), "Countermeasures to Mitigate Damage to Pipelines", Proceedings of the Second U.S.-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines, Buffalo, New York, Technical Report NCEER-89-0032, pp. 468-482.

Jones R.M. (1999), "Mechanics of Composite Materials", 2<sup>nd</sup> Edition, Taylor & Francis Inc.

Khatri D.K., Han J., Parsons R.L., Young B., Brennan J.J. & Corey R. (2013), "Laboratory Evaluation of Deformations of Steel-Reinforced High-Density Polyethylene Pipes under Static Loads", Technical Note, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 12, December 1, ASCE.

Kulshreshtha A.K. & Vasile C. (2002), "Handbook of Polymer Blends and Composites: Vol. 2", Rapra Technology Limited, 2002, p. 758.

Laney P. (2002), "Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas", Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (INEEL) Field Work Proposal #4340-70.

Merry S.M. & Bray J. (1997), "Time-dependent mechanical response of HDPE geomembranes", *J. Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 123 (1), pp. 57-65.

National Information Center of Earthquake Engineering (2007), "IITK-GSDMA Guidelines for Seismic Design of Buried Pipelines: Provisions with Commentary and Explanatory Examples", Indian Institute of Technology Kanpur, Gujarat State Disaster Management Authority, November 2007.

Nayyar M. L. (2000), "Piping Handbook", Seventh Edition, McGraw-Hill Education p. 2483.

O'Rourke M.J. & Liu X. (1994), "Failure Criterion for Buried Pipe subject to Longitudinal PGD: Benchmark Case History", 5<sup>th</sup> U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design for Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-94-0026, MCEER, Buffalo, pp. 639-652.

O'Rourke T.D., Jezerski J.M., Olson N.A., Bonneau A.L., Palmer M.C., Stewart H.E., O'Rourke M.J. & Abdoun T. (2008), "Geotechnics of Pipeline System Response to Earthquakes", Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress 2008.

O'Rourke M.J. & Liu J.X. (2012), "Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines", Monograph MCEER-12-MN04, November 2012.

Porter K.A, Scawthorn C., Honegger D.G., O'Rourke T.D. & Blackburn F. (1991), "Performance of Water Supply Pipelines in Liquefied Soil", Proceedings of the Fourth U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, Los Angeles, California, pp. 3-17.

Wang L.R.L. (1996), "Some aspects of prioritization for rehabilitation of buried lifelines", Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1902, Elsevier Science Ltd.

Wilson J.F. (1984), "Mechanics of Bellows: A critical Survey", Int.J.Mech.Sci.Vol. 26, No. 11/12, pp. 593-605, 1984.



## Παράρτημα Α

---

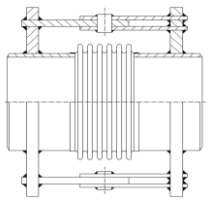
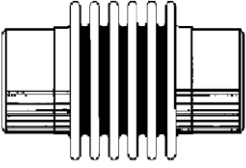
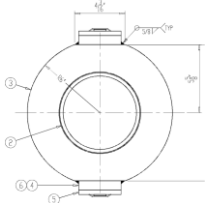
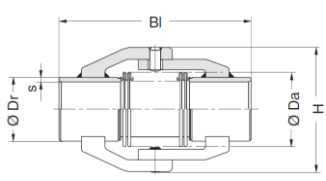
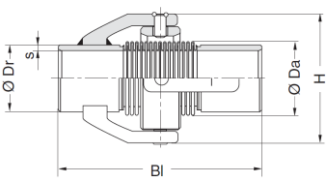
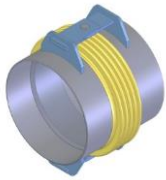
Στα πλαίσια της παρούσας βιβλιογραφικής αναδρομής ζητήθηκε από τις εταιρίες HKS Company group, US Bellows Inc., BOA Group και Eagleburgmann Group που κατασκευάζουν τέτοιου είδους κόμβους να υποβάλουν προσφορές για την πιθανή αγορά κόμβων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα πειράματα που θα πραγματοποιηθούν στην Ενότητα Εργασίας 9 του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Κατά την επικοινωνία μας με τις εν λόγω εταιρίες διερευνήθηκε η πιθανότητα αγοράς από 8 έως 18 κόμβων (αναλόγως με τις δυνατότητες των κόμβων σε παραμόρφωση και τον τελικό σχεδιασμό των πειραμάτων), με τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά: (α) διάμετρος κόμβου μεταξύ 10 και 15cm και (β) με δυνατότητα εσωτερικής πίεσης 10-15 bar.

Από τις εταιρίες αυτές ζητήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία:

- το κόστος προμήθειας των κόμβων για τη διεξαγωγή των πειραμάτων,
- τα μηχανικά χαρακτηριστικά των κόμβων σε αξονική και γωνιακή παραμόρφωση και πιο συγκεκριμένα η μέγιστη επιτρεπόμενη αξονική, πλευρική και γωνιακή παραμόρφωση και οι αντίστοιχες δυσκαμψίες των κόμβων στις παραμορφώσεις και
- το κατά πόσον είναι δυνατό να κατασκευαστούν τέτοιοι κόμβοι για πιέσεις έως και 80 bar, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυα υψηλής πίεσης.

Τα στοιχεία αυτά, πλην του κόστους το οποίο αποτελεί μεταβλητή με τον χρόνο και διαπραγματεύσιμη παράμετρο, συνοψίζονται στον Πίνακα Ι που ακολουθεί.

**Πίνακας Ι: Συγκριτικά στοιχεία προσφορών για εύκαμπτους κόμβους**

Α/Α	ΠΡΟΣΦΟΡΑ	ΣΧΕΔΙΟ ΚΟΜΒΟΥ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ								
			$P_{INT}$ Σχεδιασμού	Εσωτερική διάμετρος	Δυνατότητα στροφής	Στροφικό ελατήριο	Δυνατότητα αξον. μετακ.	Αξονικό ελατήριο	Δυνατότητα εγκ.μετ ακ.	Εγκάρσιο ελατήριο	Περιορισμός Μετακινήσεων
1	HKS-angular-expansion joint		1102.3 psi 76.0 bar 7.60 MPa	4.50 in (114.3 mm)	5°	146Nm/° 1292.2 lbin/°	N/A	N/A	N/A	N/A	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
2	US-BELLOWS Single Expansion joint		150 psi 10.3 bar 1.03 MPa	4.50 in (114.3 mm)	10°	4.7 Nm/° 42 lb in/°	1.05 in	92 kN/m 816 lb/in	0.30 in	161 kN/m 1429 lb/in	Κανένας
3	US-BELLOWS Hinged Expansion joint		150 psi 10.3bar 1.03MPa	4.50 in (114.3 mm)	20°	8.8 Nm/° 79 lb in/°	N/A	104 kN/m 920 lb/in	N/A	303 kN/m 2685 lb/in	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
4	BOA Group BKT-7510 joints		232 psi 16.0bar 1.60MPa	4.50 in (114.3 mm)	13.5°	8.0 Nm/° 71 lb in/°	N/A	N/A	N/A	N/A	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
5	BOA Group BKT-7610 joints		232 psi 16.0bar 1.60MPa	4.50 in (114.3 mm)	13.5°	8.0 Nm/° 71 lb in/°	N/A	N/A	N/A	N/A	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
6	EAGLE-BURGMANN Hinged Expansion joint		145 psi 10.0 bar 1.00 Mpa	4.50 in (114.3 mm)	20°	4.0 Nm/° 35 lb in/°	N/A	118 kN/m 673.8 lb/in	N/A	584 kN/m 3335 lb/in	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης

Συνοπτικά προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Υπάρχουν σήμερα εμπορικά διαθέσιμοι κόμβοι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την απομείωση των παραμορφώσεων σε αγωγούς που διέρχονται από περιοχές με ενεργά ρήγματα.
- Οι διαθέσιμες διάμετροι των κόμβων κυμαίνονται από 1 έως 100 ίντσες, ενώ μπορούν να κατασκευαστούν και μεγαλύτερες κατόπιν σχετικής παραγγελίας.
- Υπάρχει δυνατότητα κατασκευής κόμβων που θα λειτουργούν σε εσωτερική πίεση έως και 10.0MPa.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων προτείνεται τελικώς να χρησιμοποιηθούν κόμβοι τύπου «Bellows» που να επιτρέπουν μόνο τη στροφική μετακίνηση (αρθρωτοί κόμβοι σε μία διάσταση – βλ. Σχήμα 3.10β), έτσι ώστε να δεσμεύονται οι αξονικές και πλευρικές μετακινήσεις. Η εν λόγω επιλογή εξασφαλίζει ότι θα απομονωθεί πειραματικά η επίδραση των κόμβων στις επιβαλλόμενες καμπτικές παραμορφώσεις, οι οποίες αποτελούν την κύρια αιτία αστοχίας των αγωγών. Επισημαίνεται ότι η εγκάρσια δυσκαμψία των εμπορικά διαθέσιμων κόμβων τύπου «Bellows» είναι πολύ μικρότερη από αυτή του περιβάλλοντος εδάφους. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα, εάν δε δεσμευτεί η εγκάρσια παραμόρφωση του κόμβου, να αναπτυχθούν μεγάλες πλευρικές παραμορφώσεις και πιθανότατα αστοχία, ακόμα και για μικρές μετακινήσεις του ρήγματος.

HKS Company group



**PRODUCER OF  
EXPANSION JOINTS AND HOSES**  
Flexible solutions for your pipe system

HKS · Schonenfahrerstraße 1 · 18057 Rostock · Deutschland

HEAD OF FOUNDATION ENGINEERING  
LABORATORY NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY  
OF ATHENS  
9 IROON POLYTECHNIU 15780 ZOGRALFOU  
15780 ZOGRALFOU  
GREECE

HKS Handelsgesellschaft  
für Kompensatoren und  
Schläuche mbH

Schonenfahrerstraße 1  
18057 Rostock  
Deutschland

Tel. +49 (0)381 86 51 60-0  
Fax +49 (0)381 86 51 60-60

info@hks-hro.de  
www.hks-kompensatoren.de

**OFFER 3404326**

Offer No.	3404326
Date	10.04.2014
Customer No.	101521
Your inquiry	4.04.2014
Contact	Herr Schumacher
Phone	+49 5032 8940-92
Fax	+49 5032 8940-99
eMail	j.schumacher@hks-hro.de
Sales area	
Page	1 / 2

Dear Mr. Bouckovalas,

We are pleased to make the following non-binding offer:

**Item 1: WN 0100 / 076 / W010 / R / R - 390**

HKS-angular-expansion joint DN 100, building length = 390 mm, consisting of :  
corrugated multi-ply-bellow made of material 1.4541,  
both sides with welding ends Ø 114,3 mm made of ST35.8I, thickness = 8 mm,  
incl. V-bevelling 30° outside,  
with outer in one plane angular movable bracing with hinged joint made of carbon steel,  
incl. primer painting for carbon steel parts,  
without inner pipe / without pressure test / without leakage test/ without X-ray examination /  
with dimensional- and visual examination,  
not according PED,  
bellow designed according EJMA for :  
max. allowable operating pressure (PS) = 76 bar, max. allowable operating temperature (TS) = +30°C,  
max. test pressure = 110 bar, Medium = gas,  
angular movement = ± 5 °, life cycles (with movement ±5°): 1000 with safety factor 2,  
angular spring rate = approx. 146 Nm / °



8,00	Piece(s) at 580,00 EUR	Total	4.640,00 EUR
------	------------------------	-------	--------------

---

<b>Total Amount:</b>	<b>4.640,00 EUR</b>
----------------------	---------------------

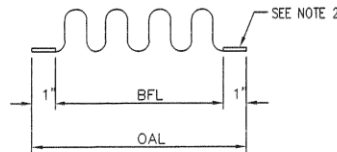
---

US Bellows Inc. (Πρώτη προσφορά)

 <p>3701 Holmes Road Houston, Texas 77051 Phone : (832) 356-8812 Fax : (713) 731-8640 U.S.A. Website: www.usbellows.com E-mail : sales@usbellows.com</p>		Quote #	Q-164545		
		Page 1 / 1			
Client : National Technical University of Athens Will Advise		Project : (none) Req # : email  Date Printed : 4/18/2014 Salesman/ENGR : Jose Silva Rivas/Jose Silva Rivas EXT. 000 joses@pipingtech.com			
		Fax to : George Bouckovalas Fax : Phone # : 30 6945 546257 Email : gbouck@central.ntua.gr Final Destination : Greece			
Item #	Qty.	Tag/Mark #	Client Tag #	Unit price	Ext. price
1	1	US-4-8-85S-W01	8 BELLOWS - 10 CM	\$675.00	\$675.00
2	1	US-4-12-150L-W01	12 BELLOWS - 10 CM	\$715.00	\$715.00
3	1	US-6-8-85S-W01	8 BELLOWS - 15 CM	\$749.00	\$749.00
4	1	US-6-12-150L-W01	12 BELLOWS - 15 CM	\$798.00	\$798.00
<b>Total ---&gt; U.S.\$</b>					<b>\$2,937.00</b>

PART No.	I.D (IN)	O.D (IN)	PLY (NO)	THK (IN)	CONS. (NO)	BFL (IN)	O.A.L (IN)	AXIAL MVT. (IN)	LATERAL MVT. (IN)	ANGULAR MVT.(DEG)	AXIAL S.R(LB/IN)	LATERAL S.R(LB/IN)	ANGULAR S.R(LB/IN/DEG)	WEIGHT EACH (LBS)	QTY REQ'D	TOTAL WEIGHT (LBS)
U.S-2-8-85S	2.375	3	1	0.018	8	3	5	0.64	0.24	10	643	2068	27	0.6	25	15
U.S-2-12-85L	2.375	3	1	0.018	12	4.5	6.5	0.95	0.53	10	693	462	14	1	25	25
U.S-2.5-8-85S	2.9	3.7	1	0.018	8	3	5	1.33	0.39	10	580	1052	21	1	25	25
U.S-2.5-12-85L	2.9	3.7	1	0.018	12	4.5	6.5	1.12	0.50	10	388	312	14	1	25	25
U.S-3-8-85S	3.5	4.5	1	0.024	8	3	5	0.71	0.17	10	855	2887	38	1	25	25
U.S-3-12-85L	3.5	4.5	1	0.024	12	4.5	6.5	1.07	0.40	10	570	855	25	1	25	25
U.S-4-8-85S	4.5	5.75	1	0.024	8	3	5	0.96	0.18	10	547	3016	39	1	25	25
U.S-4-12-85L	4.5	5.75	1	0.024	12	4.5	6.5	1.45	0.42	10	365	894	26	2	25	50
U.S-5-8-85S	5.563	6.813	1	0.024	8	3	5	0.95	0.15	10	684	5295	69	1	25	25
U.S-5-12-85L	5.563	6.813	1	0.024	12	4.5	6.5	1.42	0.34	10	456	1569	46	2	25	50
U.S-6-8-85S	6.625	8.125	1	0.030	8	4	6	1.10	0.19	10	926	5729	133	3	10	30
U.S-6-12-85L	6.625	8.125	1	0.030	12	6	8	1.65	0.44	10	617	1698	89	4	10	40
U.S-8-8-85S	8.625	10.125	1	0.030	8	4	6	1.07	0.15	10	1220	2930	273	3	10	30
U.S-8-12-85L	8.625	10.125	1	0.030	12	6	8	1.61	0.34	10	813	868	182	5	10	50
U.S-10-8-85S	10.75	12.5	1	0.036	8	8	10	1.99	0.45	10	1868	8095	567	7	10	70
U.S-10-12-85L	10.75	12.5	1	0.036	12	12	14	2.38	0.82	10	1110	1806	378	12	10	120
U.S-12-8-85S	12.75	14.875	1	0.036	8	8	10	2.09	0.40	10	1077	5585	520	11	10	110
U.S-12-12-85L	12.75	14.875	1	0.036	12	12	14	3.14	0.91	10	718	1655	347	15	10	150
U.S-14-8-85S	14	16.125	1	0.036	8	8	10	2.05	0.36	10	1187	7231	673	12	5	60
U.S-14-12-85L	14	16.125	1	0.036	12	12	14	3.08	0.81	10	791	2143	449	17	5	85
U.S-16-8-85S	16	18.5	1	0.048	8	8	10	2.04	0.31	10	2000	16,042	1493	21	5	105
U.S-16-12-85L	16	18.5	1	0.048	12	12	14	3.06	0.71	10	1333	4753	986	28	5	140
U.S-18-8-85S	18	20.5	1	0.048	8	8	10	2.03	0.28	10	2259	22,250	2071	23	5	115
U.S-18-12-85L	18	20.5	1	0.048	12	12	14	3.05	0.63	10	1506	8593	1381	32	5	160
U.S-20-8-85S	20	22.5	1	0.048	8	8	10	2.01	0.25	10	2518	29,879	2781	26	5	130
U.S-20-12-85L	20	22.5	1	0.048	12	12	14	3.02	0.57	10	1679	8853	1854	36	5	180
U.S-22-8-85S	22	24.75	1	0.048	8	8	10	2.28	0.26	10	2059	26,363	3775	26	5	130
U.S-22-12-85L	22	24.75	1	0.048	12	12	14	3.42	0.58	10	1372	7811	2517	36	5	180
U.S-24-8-85S	24	26.75	1	0.048	8	8	10	2.26	0.23	10	2251	37,757	3515	32	5	160
U.S-24-12-85L	24	26.75	1	0.048	12	12	14	3.39	0.53	10	1501	11,187	2343	47	5	235
TOTAL WEIGHT															2570	

- NOTES:
- BELLOWS MATERIAL: A240-304
  - BANDS: .060" THK x 1" WIDE A240-304
  - RATED CYCLE LIFE @ 800" F IS 3000 CYCLES FOR ANY ONE TABULATED MOVEMENT.
  - MAX. TEST PRESSURE: 1.5 X RATED WORKING PRESSURE.
  - LABEL BELLOWS BY PART #.
  - STENCIL PART No's ON BANDS.
  - CHANGES MADE TO THICKNESS; AXIAL SPRING RATE; LATERAL SPRING RATE; ANGULAR SPRING RATE AND WEIGHT IN REVISION 1.



- TOLERANCE SPECIFICATIONS
- BELLOWS OUTSIDE DIAMETER +0.0 -1/16"
  - OVERALL LENGTH ±1/8"
  - PITCH ±1/32"

85# SERIES EXPANSION JOINTS

THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF US BELLOWS AND MUST NOT BE REPRODUCED FOR ANY PURPOSE WITHOUT PERMISSION OF US BELLOWS



U.S. BELLOWS, INC.  
3701 HOLMES RD., HOUSTON, TX, 77051  
web: http://www.usbellows.com phone: (713) 731-0030  
e-mail: info@pipingtech.com fax: (713) 731-8640

REV: 01/05/12 RR  
10/31/11 LC  
JUN/22/11 RR

BY: U.S.B. JOB No. 51461 DATE: 4/17/99 DWG. No. 51461-1 REV. 3

PART No.	I.D (IN)	O.D (IN)	PLY (NO)	THK (IN)	CONS. (NO)	BFL (IN)	O.A.L (IN)	AXIAL MVT. (IN)	LATERAL MVT. (IN)	ANGULAR MVT.(DEG)	AXIAL S.R(LB/IN)	LATERAL S.R(LB/IN)	ANGULAR S.R(LB/IN/DEG)	WEIGHT EACH (LBS)	QTY REQ'D	TOTAL WEIGHT (LBS)
U.S-2-8-150S	2.375	3	1	0.024	8	3	5	0.34	0.12	10	2911	3153	41	0.6	25	15
U.S-2-12-150L	2.375	3	1	0.024	12	4.5	6.5	0.51	0.28	10	1940	934	28	1	25	25
U.S-2.5-8-150S	2.9	3.7	1	0.024	8	3	5	0.69	0.20	10	1441	2615	53	1	25	25
U.S-2.5-12-150L	2.9	3.7	1	0.024	12	4.5	6.5	0.78	0.34	10	961	775	35	1	25	25
U.S-3-8-150S	3.5	4.5	1	0.024	8	3	5	0.66	0.16	10	950	2281	30	1	25	25
U.S-3-12-150L	3.5	4.375	1	0.024	12	4.5	6.5	0.82	0.31	10	974	1007	30	1	25	25
U.S-4-8-150S	4.5	5.75	1	0.030	8	3	5	0.70	0.13	10	1224	4822	63	1	25	25
U.S-4-12-150L	4.5	5.75	1	0.030	12	4.5	6.5	1.05	0.30	10	816	1429	42	2	25	50
U.S-5-8-150S	5.563	6.813	1	0.030	8	3	5	0.75	0.15	10	1531	8791	115	2	25	50
U.S-5-12-150L	5.563	6.813	1	0.030	12	4.5	6.5	1.15	0.30	10	1021	2805	77	3	25	75
U.S-6-8-150S	6.625	8.125	1	0.036	8	4	6	0.83	0.15	10	1823	8364	195	3	10	30
U.S-6-12-150L	6.625	8.125	1	0.036	12	6	8	1.25	0.34	10	1215	2478	130	4	10	40

US Bellows Inc. (Δεύτερη προσφορά)

		Quote # Q-164545			
3701 Holmes Road Houston, Texas 77051 Phone : (832) 356-8812 Fax : (713) 731-8640 U.S.A. Website: www.usbellows.com E-mail : sales@usbellows.com		 Project : (none) Req # : email Date Printed : 5/14/2014 Salesman/ENGR : Jose Silva Rivas/Jose Silva Rivas EXT. 000 joses@pipingtech.com			
Client : National Technical University of Athens Will Advise		Fax to : George Bouckovalas Fax : Phone # : 30 6945 546257 Email : gbouck@central.ntua.gr Final Destination : Greece			
Item #	Qty.	Tag/Mark #	Client Tag #	Unit price	Ext. price
1	10	US-4-12-150L-W01	12 BELLOWS - 10 CM	\$1,095.00	\$10,950.00
<b>Total ---&gt; U.S.\$</b>					<b>\$10,950.00</b>



Customer:	0	Date:	5/6/2014
Refer:	0	Job/Quote:	Q-
Tag:	0	Item No:	1
Version:	EJAnalysis v0.0	Engineer:	Jose Silva
Rev:	0	Page:	___ of ___

Expansion Joint Type: (S) Single  
 Analysis Condition: Hinged

**BELLOWS PROPERTIES**

Bellows Material A240 tp 304  
 Inside Diameter 4.500 in  
 Outside Diameter 5.750 in  
 Nominal Thickness 0.030 in  
 Number of Convolutions 12  
 Number of Plies 1

Bellows Length 4.500 in  
 Design Stress 20,000 psi  
 Mod. of Elasticity 28,300,000 psi  
 Weld Joint Efficiency 100%  
 Universal Live Length 0.000 in

**COLLAR PROPERTIES**

Collar Material N/A  
 Thickness 0.000 in  
 Width 0.000 in  
 Weld Joint Efficiency 100%  
 Design Stress N/A  
 Modulus of Elasticity N/A

**ROOT RING PROPERTIES**

Material N/A  
 Cross-Sectional Area 0.000 si  
 Weld Joint Efficiency 100%  
 Design Stress N/A  
 Modulus of Elasticity N/A

**ANALYSIS CONDITION**

Design Pressure 150 psi  
**MOVEMENTS**  
 (Combined)  
 Compression Design 0.000 in  
 Lateral Design 0.000 in  
 Angular Design 20.000 °  
 Torsion 0.000 °

Design Temperature 150 °  
 Extension 0.000 in  
 Lateral Preset 0.000 in  
 Angular Preset 0.000 °

**STRESS LEVELS**

Tangent Circumferential Membrane Stress due to Pressure.....(S1).....  
 Bellows Circumferential Membrane Stress due to Pressure.....(S2).....  
 Bellows Meridional Membrane Stress due to Pressure.....(S3).....  
 Bellows Meridional Bending Stress due to Pressure.....(S4).....  
 Combined Meridional Membrane and Bending Stress due to Pressure.....(S3+S4).....  
 Combined Meridional Membrane and Bending Stress due to Pressure (Creep Range).....(S3+S4/1.25).....  
 Bellows Meridional Membrane Stress due to Deflection.....(S5).....  
 Bellows Meridional Bending Stress due to Deflection.....(S6).....  
 Total Stress Range.....(St).....  
 EJMA Cycle Life .....(Nc).....

**STRESSES**

11,325 psi  
 0 psi  
 0 psi  
 3,738 psi  
 0 psi N/A  
 1,587 psi  
 27,249 psi  
 28,836 psi  
 23,387 psi  
 3,764 psi  
 273,146 psi  
 297,095 psi  
 1,011 cyc

**ALLOWABLE**

20,000 psi  
 100 psi  
 N/A  
 20,000 psi  
 N/A  
 N/A  
 60,000 psi  
 N/A  
 N/A  
 N/A  
 N/A  
 N/A  
 1,000 cyc

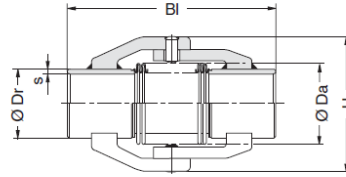
**BELLOWS CONSTANTS**

Axial Spring Rate, Lb/in..... 920  
 Lateral Spring Rate, Lb/in..... 2,685  
 Angular Spring Rate, in•lb/deg..... 79  
 Torsional Spring Rate, in•lb/deg..... 2.42E+04  
 Bellows Effective Area, sq in..... 21  
 Bellows maximum design pressure based upon squirm, psig..... 220

BOA Group

BOA Group

Angular Expansion Joints



Order text:  
7510 – DN ... / PN ... / ± Δα ... / BI ...

DN	PN	Nominal angular movement capacity ± α	Overall length BI	H	Weight	Welded end		Bellows			
						Ø Dr	s	Outer diameter Ø Da	Bending spring rate per 1° α <sup>1)</sup> C <sub>β</sub>	Additional moment from rotation and pressure per 1 bar and per 1° α <sup>1)</sup> c <sub>γ</sub>	Hinge friction per 1 bar <sup>1)</sup> φ
		[Grd]	[mm]	[mm]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
50	16	22	230	130	3.1	60.3	3.2	74	1.5	0.08	0.2
	25	18	230	130	3.2	60.3	3.2	74	2.5	0.08	0.2
	40	10	225	130	3.1	60.3	3.2	67	2.4	0.08	0.2
65	16	18	255	145	3.7	76.1	3.2	93	3.2	0.16	0.4
	25	13	255	145	3.9	76.1	3.2	93	7.5	0.16	0.4
	40	12	255	180	4.1	76.1	3.2	93	10.8	0.16	0.5
80	16	17	255	160	4.1	88.9	3.6	105	4.4	0.21	0.5
	25	12	255	190	4.3	88.9	3.6	105	10.0	0.21	0.5
	40	11	255	190	4.5	88.9	3.6	104	14.5	0.21	0.6
100	16	15	255	220	4.9	114.3	4.0	130	8.0	0.34	0.8
	25	11	255	220	6.8	114.3	4.0	130	19.1	0.34	0.8
	40	10	275	220	7.5	114.3	4.0	130	27.0	0.34	1.0
125	16	21	505	280	28.0	139.7	4.0	158	11.9	0.80	3.0
	25	16	505	280	29.0	139.7	4.0	158	23.1	0.80	3.0
	40	14	510	280	30.0	139.7	4.0	158	32.9	0.80	3.0
150	16	18	505	310	31.0	168.3	4.5	187	18.3	1.20	4.0
	25	14	505	310	32.0	168.3	4.5	187	36.4	1.20	4.0
	40	13	510	310	32.0	168.3	4.5	187	51.5	1.20	4.0

<sup>1)</sup> Deviation ± 30 %

Reserve the right for technical changes

Type 7510  
previous: 307/250

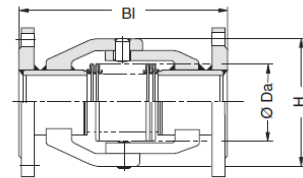
Temperature °C	K <sub>p</sub>	K <sub>α</sub>
-10 ... 120	1.00	1.11
150	0.96	1.09
200	0.88	1.06
250	0.80	1.00
300	0.68	0.95
350	0.62	0.93
400	0.50	0.90

<sup>2)</sup> Intermediate values can be linearly interpolated.

Angular Expansion Joints

BOA Group

Type 7520  
previous: 307/251



Order text:  
7520 – DN ... / PN ... / ± Δα ... / BI ...

DN	PN	Nominal angular movement capacity ± α	Overall length BI	H	Weight	Connection dimensions (flange)	Bellows			
							Outer diameter Ø Da	Bending spring rate per 1° α <sup>1)</sup> C <sub>β</sub>	Additional moment from rotation and pressure per 1 bar and per 1° α <sup>1)</sup> c <sub>γ</sub>	Hinge friction per 1 bar <sup>1)</sup> φ
		[Grd]	[mm]	[mm]	[kg]		[mm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
50	16	22	240	130	7.5	DIN 2501	74	1.5	0.08	0.2
	25	18	240	130	8.4		74	2.5	0.08	0.2
	40	10	280	130	8.3		67	2.4	0.08	0.2
65	16	18	265	145	9.1		93	3.2	0.16	0.4
	25	13	265	145	10.0		93	7.5	0.16	0.4
	40	12	265	180	11.0		93	10.8	0.16	0.5
80	16	17	265	160	11.0		105	4.4	0.21	0.5
	25	12	265	190	12.0		105	10.0	0.21	0.5
	40	11	265	190	13.0		104	14.5	0.21	0.6
100	16	15	265	220	12.0		130	8.0	0.34	0.8
	25	11	265	220	17.0		130	19.1	0.34	0.8
	40	10	285	220	18.0		130	27.0	0.34	1.0
125	16	21	520	280	38.0	158	11.9	0.80	3.0	
	25	16	520	280	43.0	158	23.1	0.80	3.0	
	40	14	525	280	44.0	158	32.9	0.80	3.0	
150	16	18	520	310	43.0	187	18.3	1.20	4.0	
	25	14	520	310	50.0	187	36.4	1.20	4.0	
	40	13	525	310	52.0	187	51.5	1.20	4.0	

Temperature °C	K <sub>p</sub>	K <sub>α</sub>
-10 ... 120	1.00	1.11
150	0.96	1.09
200	0.88	1.06
250	0.80	1.00
300	0.68	0.95
350	0.62	0.93
400	0.50	0.90

<sup>2)</sup> Intermediate values can be linearly interpolated.

<sup>1)</sup> Deviation ± 30 %

Reserve the right for technical changes

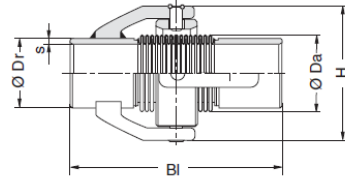
## Angular Expansion Joints

Type 7610  
previous: 307/260

Reduction factor <sup>2)</sup> for pressure [K <sub>p</sub> ] and movement capacity [K <sub>Δ</sub> ]		
Temperature °C	K <sub>p</sub>	K <sub>Δ</sub>
-10 ... 120	1.00	1.11
150	0.96	1.09
200	0.88	1.06
250	0.80	1.00
300	0.68	0.95
350	0.62	0.93
400	0.50	0.90

<sup>2)</sup> Intermediate values can be linearly interpolated.

BOA Group



Order text:  
7610 – DN ... / PN ... / ± Δα ... / BI ...

DN	PN	Nominal angular movement capacity ± Δα	Overall length BI [mm]	H [mm]	Weight [kg]	Welded end		Bellows			
						Ø Dr [mm]	s [mm]	Outer diameter Ø Da [mm]	Bending spring rate C <sub>β</sub> per 1° Δα [Nm]	Additional moment from rotation and pressure per 1 bar and per 1° Δα C <sub>α</sub> [Nm]	Hinge friction per 1 bar φ [Nm]
50	16	22	255	155	6.8	60.3	3.2	74	1.5	0.08	0.2
	25	18	255	155	6.9	60.3	3.2	74	2.5	0.08	0.2
	40	10	255	155	6.8	60.3	3.2	67	2.4	0.08	0.2
65	16	18	255	170	7.4	76.1	3.2	93	3.2	0.16	0.4
	25	13	255	170	7.5	76.1	3.2	93	7.5	0.16	0.4
	40	12	255	180	7.8	76.1	3.2	93	10.8	0.16	0.5
80	16	17	255	185	8.3	88.9	3.6	105	4.4	0.21	0.5
	25	12	255	195	8.6	88.9	3.6	105	10.0	0.21	0.5
	40	11	255	195	8.8	88.9	3.6	104	14.5	0.21	0.6
100	16	15	255	220	9.4	114.3	4.0	130	8.0	0.34	0.8
	25	11	255	220	9.7	114.3	4.0	130	19.1	0.34	0.8
	40	10	275	220	16.0	114.3	4.0	130	27.0	0.34	1.0
125	16	21	505	335	35.0	139.7	4.0	158	11.9	0.80	2.3
	25	16	505	335	35.0	139.7	4.0	158	23.1	0.80	2.3
	40	14	510	335	36.0	139.7	4.0	158	32.9	0.80	2.3
150	16	18	505	370	40.0	168.3	4.5	187	18.3	1.20	3.3
	25	14	505	370	40.0	168.3	4.5	187	36.4	1.20	3.3
	40	13	510	370	49.0	168.3	4.5	187	51.5	1.20	3.3

<sup>1)</sup> Deviation ± 30 %

Reserve the right for technical changes

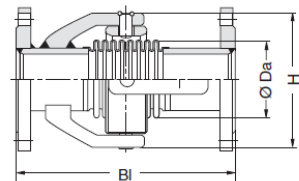
## Angular Expansion Joints

Type 7620  
previous: 307/261

Reduction factor <sup>2)</sup> for pressure [K <sub>p</sub> ] and movement capacity [K <sub>Δ</sub> ]		
Temperature °C	K <sub>p</sub>	K <sub>Δ</sub>
-10 ... 120	1.00	1.11
150	0.96	1.09
200	0.88	1.06
250	0.80	1.00
300	0.68	0.95
350	0.62	0.93
400	0.50	0.90

<sup>2)</sup> Intermediate values can be linearly interpolated.

BOA Group



Order text:  
7620 – DN ... / PN ... / ± Δα ... / BI ...

DN	PN	Nominal angular movement capacity ± Δα	Overall length BI [mm]	H [mm]	Weight [kg]	Connection dimensions (flange)	Bellows			
							Outer diameter Ø Da [mm]	Bending spring rate C <sub>β</sub> per 1° Δα [Nm]	Additional moment from rotation and pressure per 1 bar and per 1° Δα C <sub>α</sub> [Nm]	Hinge friction per 1 bar φ [Nm]
50	16	22	265	155	11	DIN 2501	74	1.5	0.08	0.2
	25	18	265	155	11		74	2.5	0.08	0.2
	40	10	280	155	12		67	2.4	0.08	0.2
65	16	18	265	170	13		93	3.2	0.16	0.4
	25	13	265	170	14		93	7.5	0.16	0.4
	40	12	265	180	14		93	10.8	0.16	0.5
80	16	17	265	185	15		105	4.4	0.21	0.5
	25	12	265	195	17		105	10.0	0.21	0.5
	40	11	265	195	17		104	14.5	0.21	0.6
100	16	15	265	220	17		130	8.0	0.34	0.8
	25	11	265	220	20		130	19.1	0.34	0.8
	40	10	285	220	26		130	27.0	0.34	1.0
125	16	21	520	335	45		158	11.9	0.80	2.3
	25	16	520	335	49		158	23.1	0.80	2.3
	40	14	525	335	50		158	32.9	0.80	2.3
150	16	18	520	370	52	187	18.3	1.20	3.3	
	25	14	520	370	58	187	36.4	1.20	3.3	
	40	13	525	370	67	187	51.5	1.20	3.3	

<sup>1)</sup> Deviation ± 30 %

Reserve the right for technical changes



## Angularkompensatoren mit Einfachgelenk

**BKT-7510** (alt: 307/250)

**BKT-7520** (alt: 307/251)

**Beschreibung**

**Typ BKT-7510**

Rohrgelenkstück mit Schweißenden, für Winkelausschlag in einer Ebene in Gelenksystemen.

**Typ BKT-7520**

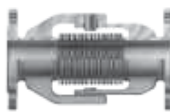
Rohrgelenkstück mit Flanschen, für Winkelausschlag in einer Ebene in Gelenksystemen.

Die Kompensatoren PN 10, 16 sind vom DWGW nach DIN 30681 geprüft und für Gasanlagen zugelassen.

Kennzeichnung mit der entsprechenden DIN-DWGW-Reg.-Nr. kann gegen Mehrpreis erfolgen.



**BKT-7510**



**BKT-7520**

Bestellbeispiel Seite 68

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Bestell-Nr. BKT-7510 BKT-7520			Nennwinkel- Ausschlag	Typ BKT-7510				Typ BKT-7520				
DN	PN			Bau- länge	Artikel-Nr.	Preis	Bau- länge	Artikel-Nr.	Preis			
			± Grad	mm	€	mm	€					
40	6		20	268	6000007000		302,-	282	6000007050			564,-
	10		20	268	6000007000		302,-	282	6000007051			568,-
	16		20	246	6000007002		322,-	260	6000007052			589,-
	25		20	260	6000007003		389,-	274	6000007053			671,-
40		20	244	6000007004		413,-	258	6000007054			696,-	
50	6		20	260	6000007006		335,-	274	6000007055			609,-
	10		20	260	6000007006		335,-	274	6000007056			616,-
	16		20	256*	6000007007		355,-	270	6000007057			639,-
	25		20	260*	6000007008		406,-	274	6000007058			702,-
40		20	256	6000007009		432,-	270	6000007059			728,-	
65	6		20	290	6000007010		434,-	304	6000007060			743,-
	10/16		20	306	6000007012		470,-	320	6000007062			789,-
	25		20	308	6000007013		498,-	322	6000007063			821,-
40		19	310	6000007014		759,-	324	6000007064			1109,-	
80	6		20	300	6000007015		478,-	314	6000007065			812,-
	10/16		20	298	6000007017		504,-	312	6000007067			848,-
	25		20	320	6000007018		736,-	334	6000007068			1133,-
	40		17	330	6000007019		900,-	454	6000007069			1308,-
100	6		20	330	6000007021		691,-	428	6000007070			1082,-
	10		20	330	6000007021		691,-	442	6000007071			1105,-
	16		18,5	332	6000007023		732,-	444	6000007072			1151,-
	25		18,5	332	6000007023		732,-	470	6000007073			1279,-
40		16,5	368	6000007024		948,-	506	6000007074			1460,-	
125	6		20	360	6000007025		800,-	466	6000007075			1265,-
	10/16		19,5	360	6000007027		849,-	480	6000007077			1420,-
	25		16,5	362	6000007028		900,-	508	6000007078			1464,-
	40		15	368	6000007029		1111,-	514	6000007079			1695,-
150	6		20	360	6000007030		995,-	466	6000007080			1548,-
	10/16		17	360	6000007032		1163,-	480	6000007082			1765,-
	25		14	362	6000007033		1206,-	522	6000007083			1934,-
	40		13	498	6000007034		1379,-	658	6000007084			2128,-
200	6		13	495	6000007037		1692,-	615	6000007085			2695,-
	10		13	495	6000007037		1692,-	629	6000007086			2677,-
	16		13	495	6000007037		1692,-	629	6000007087			2679,-
	25		11	495	6000007038		1794,-	685	6000007088			2837,-
40		8,5	555	6000007039		2053,-	741	6000007089			3214,-	

Unverbindliche Preisempfehlungen ausschließlich Mehrwertsteuer

Die gekennzeichneten Kompensatoren sind wie folgt lieferbar:  
 \* - ab Lager  
 ohne - ca. 2 Wochen bei DN 150, ca. 4 Wochen ab DN 200  
 Maß- und Konstruktionsänderungen vorbehalten.

**Werkstoffe**

Bälge: Edelstahl, Werkstoff-Nr. 1.4571 bis DN 50  
 1.4541 ab DN 65  
 Schweißenden: C-Stahl  
 Flansche: C-Stahl  
 Verspannung: C-Stahl

## Angularkompensatoren mit Kardangeln

### BKT-7610 (alt: 307/260)

### BKT-7620 (alt: 307/261)

Beschreibung

#### Typ BKT-7610

Angularkompensator mit Kardangeln, mit Schweißenden, für allseitigen Winkelausschlag in Gelenksystemen.

#### Typ BKT-7620

Angularkompensator mit Kardangeln, mit Flanschen, für allseitigen Winkelausschlag in Gelenksystemen.



BKT-7610



BKT-7620

Bestellbeispiel Seite 68

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Bestell-Nr. BKT-7610 BKT-7620					Typ BKT-7610			Typ BKT-7620				
DN	PN		Nennwinkel- Ausschlag		Bau- länge	Artikel-Nr.	Preis	Bau- länge	Artikel-Nr.	Preis		
			+ Grad		mm		€	mm		€		
40	6		20		268	6000007100	537,-	282	6000007150	815,-		
	10		20		268	6000007100	537,-	282	6000007151	820,-		
	16		20		246	6000007102	568,-	260	6000007152	852,-		
	25		20		260	6000007103	622,-	274	6000007153	932,-		
50	6		20		244	6000007104	659,-	258	6000007154	963,-		
	10		20		260	6000007106	611,-	274	6000007155	903,-		
	16		20		256	6000007107	647,-	270	6000007157	950,-		
	25		20		260	6000007108	663,-	274	6000007158	976,-		
65	6		20		290	6000007110	754,-	304	6000007160	1007,-		
	10/16		20		306	6000007112	798,-	320	6000007162	1144,-		
	25		20		308	6000007113	846,-	322	6000007163	1204,-		
	40		19		310	6000007114	1004,-	324	6000007164	1373,-		
80	6		20		300	6000007115	930,-	314	6000007165	1089,-		
	10/16		20		298	6000007117	986,-	312	6000007167	1366,-		
	25		20		320	6000007118	1124,-	334	6000007168	1549,-		
	40		17		330	6000007119	1429,-	454	6000007169	1876,-		
100	6		20		330	6000007121	1092,-	428	6000007170	1513,-		
	10		20		330	6000007121	1092,-	442	6000007171	1537,-		
	16		18,5		332	6000007123	1158,-	444	6000007172	1608,-		
	25		18,5		332	6000007123	1158,-	470	6000007173	1689,-		
125	6		20		360	6000007125	1405,-	506	6000007174	2057,-		
	10/16		19,5		360	6000007127	1446,-	480	6000007177	2064,-		
	25		16,5		362	6000007128	1489,-	508	6000007178	2111,-		
	40		15		368	6000007129	1728,-	514	6000007179	2359,-		
150	6		20		360	6000007130	1853,-	466	6000007180	2473,-		
	10/16		17		360	6000007132	1965,-	480	6000007182	2629,-		
	25		14		362	6000007133	2079,-	522	6000007183	2752,-		
	40		13		498	6000007134	2147,-	658	6000007184	2957,-		
200	6		13		495	6000007137	2347,-	615	6000007185	3311,-		
	10		13		495	6000007137	2347,-	629	6000007186	3329,-		
	16		13		495	6000007137	2347,-	629	6000007187	3331,-		
	25		11		495	6000007138	2487,-	665	6000007188	3529,-		
	40		8,5		555	6000007139	2805,-	741	6000007189	3964,-		

Größere Nennweiten auf Anfrage

Unverbindliche Preisempfehlungen ausschließlich Mehrwertsteuer

#### Werkstoffe

Bälge: Edelstahl, Werkstoff-Nr. 1.4571 bis DN 50  
1.4541 ab DN 65

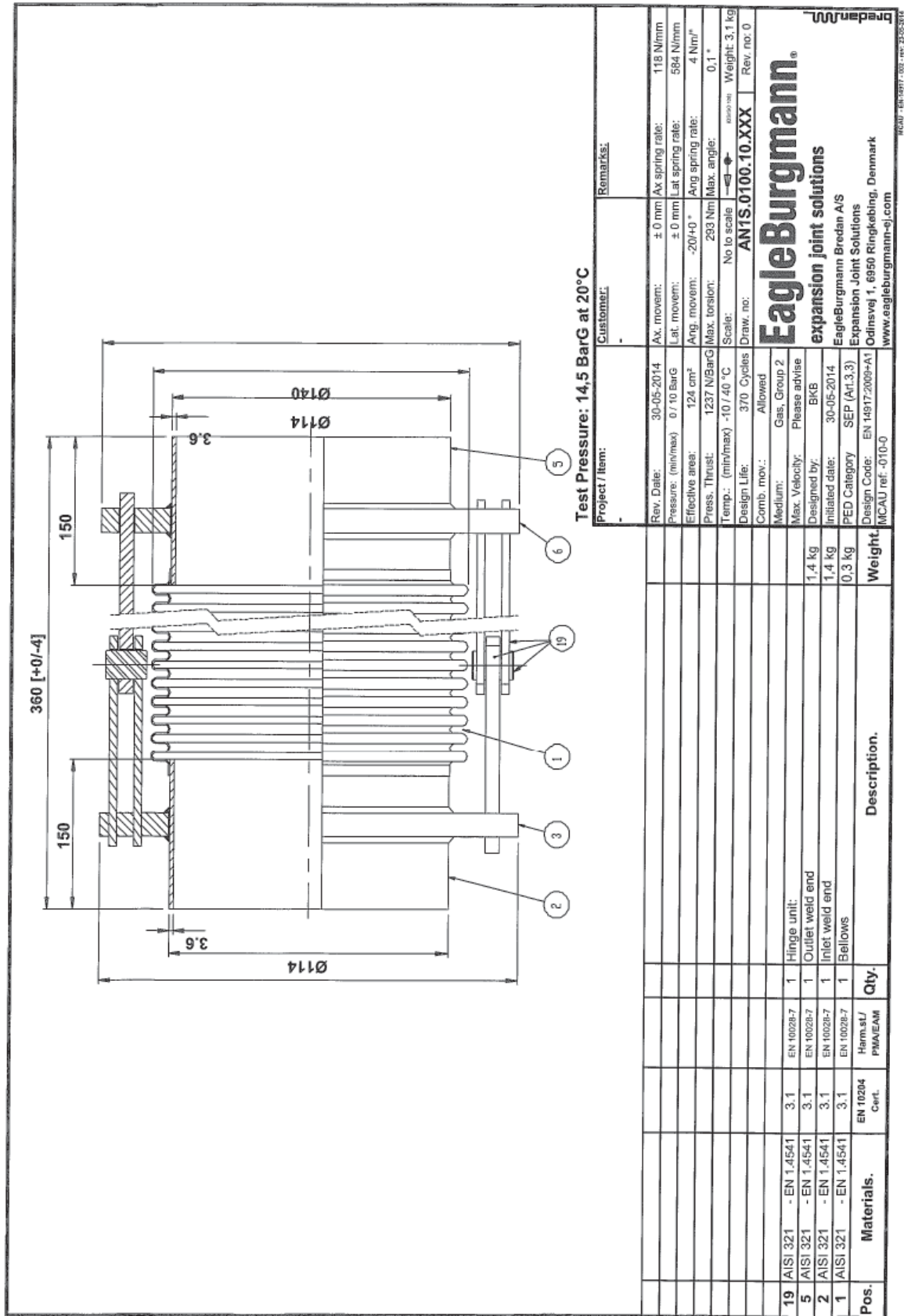
Schweißenden: C-Stahl

Flansche: C-Stahl

Verspannung: C-Stahl

Lieferzeit ca. 4 Wochen.

Maß- und Konstruktionsänderungen vorbehalten.



	<b>Ε. ΣΚΑΖΙΚΗΣ – Λ. ΜΑΡΑΓΚΟΣ Α.Ε.</b> Σερρών 2 - 104 41 Αθήνα Τηλ.: 210 5296850 - 5296857 Fax: 210 5223412 e-mail: <a href="mailto:i.hatzigianellis@skama.gr">i.hatzigianellis@skama.gr</a> web: <a href="http://www.skama.gr">www.skama.gr</a>

ΠΡΟΣ <b>ΕΜΠ</b> Υπόψη : κ. ΑΛ. ΒΑΛΣΑΜΗ <a href="mailto:a_valsamis@hotmail.com">a_valsamis@hotmail.com</a>	Αθήνα, 30.05.14 FAX: 210 ΤΗΛ.: 210 7723744 Αριθμός σελίδων: 1
--	--

### ΠΡΟΣΦΟΡΑ

Αναφερόμενοι σε σχετική σας ζήτηση σε μεταλλικό διαστολικό σύνδεσμο του οίκου **EAGLE-BURGMANN EJ**, σας προσφέρουμε ως ακολούθως:

Ποσ/τα	Περιγραφή	Τιμή μονάδος
8 τεμ	METALLIC EXPANSION JOINT DIMENSIONS: Ø114/140 X 360 mm MATERIAL: ANSI 321 – EN 1.4541 Ang. Movem.: -20/ +0° Υπόλοιπα χαρακτηριστικά βάσει σχεδίου	890,00 €/τεμ

Οι προσφερόμενες τιμές είναι καθαρές (νετ), πλέον Φ.Π.Α. και ισχύει για την αιτούμενη ποσότητα.