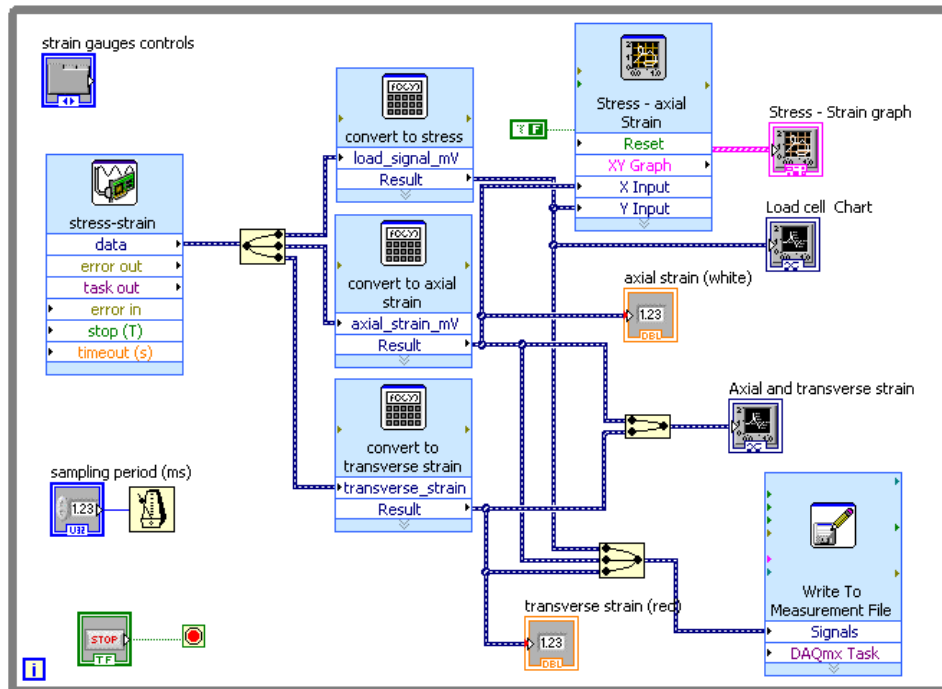




ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ
ΤΗ ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κάπρος Κωνσταντίνος

ΧΑΝΙΑ 2013



Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ



**ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ
ΤΗ ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κάπρος Κωνσταντίνος

Επιβλέπων : ***Δρ. Βασίλης Σάλτας***
Επίκουρος Καθηγητής

Επιτροπή Αξιολόγησης : ***Δρ. Βασίλης Σάλτας***
Δρ. Ιωάννης Μακρής
Δρ. Ιωάννης Φοτίλης

Ημερομηνία Παρουσίασης : / / 2013

Αύξων Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας :

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο *Εργαστήριο Γεωφυσικής και Σεισμολογίας* του Τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, κατά το χρονικό διάστημα Ιούνιος 2009 – Δεκέμβριος 2010, υπό την επίβλεψη του Επικ. Καθηγητή Βασίλη Σάλτα, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγηση και τη βοήθειά του.

Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Ι. Μακρή και Ι. Φυτίλη για και τις χρήσιμες υποδείξεις τους, οι οποίες συνέβαλαν στην τελική μορφή της παρούσας εργασίας.

Εγκατάσταση και λειτουργία πειραματικής διάταξης για τη λήψη μετρήσεων μηχανικής τάσης – παραμόρφωσης σε δείγματα πετρωμάτων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στην εγκατάσταση και λειτουργία κατάλληλων αισθητηρίων μηχανικής παραμόρφωσης (strain gauges) και ενός μετρητή δύναμης (load cell) προκειμένου να πραγματοποιηθούν πειράματα μονοαξονικής θλίψης σε διαμορφωμένα δοκίμια πετρωμάτων με τη χρήση χειροκίνητης υδραυλικής πρέσας. Η βαθμονόμηση και η λειτουργία των αισθητηρίων και μετατροπέων, καθώς και η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται μέσω του γραφικού περιβάλλοντος προγραμματισμού LabView. Η πειραματική διάταξη θα χρησιμοποιηθεί για τη λήψη μετρήσεων μηχανικής τάσης – παραμόρφωσης προκειμένου να διερευνηθούν οι μηχανικές ιδιότητες διαφόρων πετρωμάτων, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη συσχέτισή τους με μετρήσεις άλλων ιδιοτήτων τους.

Installation and operation of an experimental apparatus for stress-strain measurements in rock samples

ABSTRACT

The present work deals with the installation and operation of strain gauges and a load cell in order to carry out uniaxial compression experiments in rock samples by means of a hand-operated hydraulic press. The calibration and the operation of the sensors and transducers, as well as the data acquisition, is achieved through the LabVIEW graphical programming environment. The experimental apparatus will be used for the record of stress – strain measurements in various kind of geomaterials, in order to investigate their mechanical properties and enable their correlation with other kind of materials properties.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων υλικών	7
1.1 Γενικά περί των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών	7
1.2 Αισθητήρες μέτρησης μηχανικής παραμόρφωσης (strain gauges)	13
1.2.1 Αρχή λειτουργίας και είδη μετρητών	13
1.2.2 Συνδεσμολογίες μετρητών strain gauges	17
1.2.3 Παράγοντες σφάλματος στους μετρητές strain gauges	19
1.2.4 Εφαρμογές μετρητών μηχανικής παραμόρφωσης	21
1.2.5 Επιλογή τύπου μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης.....	22
1.3 Αισθητήρες μέτρησης πίεσης (κυψέλες φόρτισης- - load cells)	23
1.3.1 Περιγραφή και αρχή λειτουργίας μίας κυψέλης φόρτισης	23
1.3.2 Δυναμική φόρτιση και προστασία	26
1.3.3 Κυψέλη φόρτισης σε ισορροπία – Επίδραση της θερμοκρασίας	28
1.3.4 Χρήση εσωτερικού ενισχυτή σε κυψέλη φόρτισης	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης	33
2.1 Χειροκίνητη υδραυλική πρέσα ENERPACK.....	33
2.2 Χρησιμοποιούμενη κυψέλη φόρτισης	36
2.3 Συσκευή διασύνδεσης αισθητηρίων, SCXI-1520 και 1314 terminal	39
2.4 Συμπληρωματικός εξοπλισμός διαμόρφωσης δοκιμίων	43
2.4.1 Τρυπάνι εξαγωγής κυλινδρικών δοκιμίων (Diamond Core Drill)	43
2.4.2 Δισκοπρίονο κοπής και διαμόρφωσης δοκιμίων	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Διασύνδεση συσκευών μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος	
<i>LabView και λήψη μετρήσεων</i>	45
3.1 Το προγραμματιστικό περιβάλλον LabView	46
3.1.1 Σύντομη περιγραφή βασικών λειτουργιών του LabVIEW	47
3.2 Το περιβάλλον MAX (Measurement and Automation Explorer)	54
3.3 Σύνδεση των αισθητηρίων μηχανικής παραμόρφωσης και της κυψέλης φόρτισης – Υλοποίηση του προγράμματος	56
3.4 Παραμετροποίηση του VI	63
3.5 Δοκιμή της διάταξης σε δοκίμιο από Teflon	69
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών

1.1 Γενικά περί των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών

Αν σε κύβο στερεού σώματος με εμβαδό έδρας A ο οποίος ισορροπεί πάνω σε μία επιφάνεια, εφαρμόσουμε δύναμη F κάθετα στην πάνω έδρα του, τότε η δύναμη αυτή αντισταθμίζεται από μία αντίθετη δύναμη που εξασκείται στην έδρα-βάση του κύβου από την επιφάνεια στήριξης. Λέμε τότε ότι ο κύβος βρίσκεται υπό καθεστώς *τάσης* σ , η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της δύναμης προς το εμβαδόν της επιφάνειας ασκήσεώς της, δηλ. :

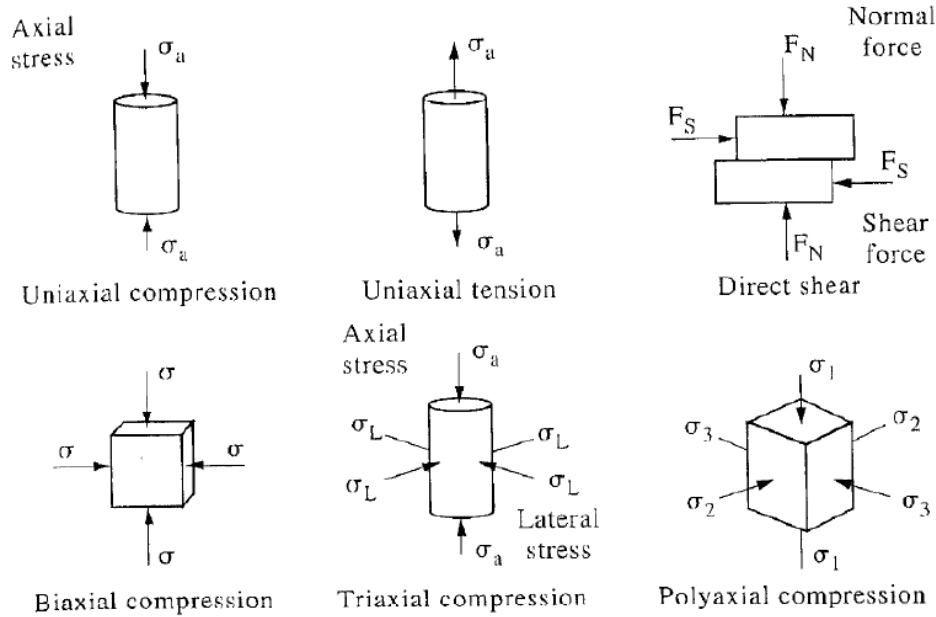
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

Όταν η ασκούμενη δύναμη τείνει να επιμηκύνει το στερεό σώμα η τάση ονομάζεται εφελκυστική, ενώ στην αντίθετη περίπτωση που το υλικό συμπιέζεται, ονομάζεται θλιπτική τάση. Όταν η δύναμη εφαρμόζεται υπό γωνία, η εφαπτομενική, στην επιφάνεια, συνιστώσα της προκαλεί μία τάση που ονομάζεται διατμητική τάση (Σχήμα 1).

Η απόκριση (αντίδραση) των υλικών στην εφαρμογή της τάσης (θλίψη ή εφελκυσμός) ονομάζεται παραμόρφωση. Η αξονική παραμόρφωση ϵ που υφίσταται ένα σώμα κατά μήκος της διεύθυνσης που εφαρμόζεται η εφελκυστική (ή θλιπτική) τάση και μεταβάλλει την αρχική του διάσταση l κατά Δl , ορίζεται ως το πηλίκο της μεταβολής Δl ως προς την αρχική διάσταση l . Δηλαδή η παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση,

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.2)$$

και εκφράζεται συνήθως σε μονάδες με (microstrain) ή μπορεί να αναχθεί σε επί τοις εκατό ποσοστό.



Σχήμα 1.1. Διαφορετικά είδη εφαρμοζόμενων τάσεων (μονοαξονική συμπίεση ή εφελκυσμός, διατμητική τάση, πολυαξονική συμπίεση).

Για παράδειγμα, αν το μήκος ενός αντικειμένου $\ell=100\text{mm}$ μεταβληθεί κατά $\Delta\ell=0,01\text{mm}$ (Σχήμα 2), η εφαρμοζόμενη μηχανική τάση θα είναι:

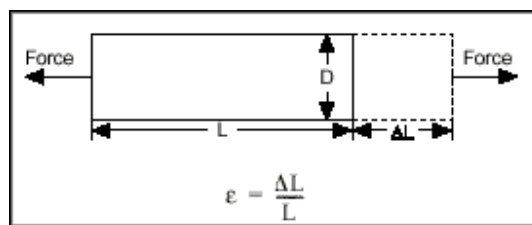
$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell} = 0,0001 \quad \varepsilon = 0,0001 \times 10^6 \text{ } \mu\text{ε} = 100 \text{ } \mu\text{ε}.$$

Μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης σε ένα ελαστικό στερεό ισχύει ο ακόλουθος γραμμικός νόμος (γνωστότερος ως νόμος του Hooke):

$$\sigma_x = \frac{F_x}{A} = E \cdot \varepsilon_x \quad (1.3)$$

όπου σ_x η εφελκυστική (ή θλιπτική) τάση που ασκείται στο σώμα κατά μήκος της x-διεύθυνσης και E το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young. Επειδή η παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος, το μέτρο ελαστικότητας έχει μονάδες τάσης. Στην πράξη μετριέται σε GPa ($=10^9$ Pa).

Η γραμμική σχέση μεταξύ τάσης – παραμόρφωσης ισχύει μέχρι το όριο ελαστικότητας, όταν δηλαδή το υλικό επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση (διάσταση), εάν καταργηθεί η εφαρμοζόμενη τάση. Τα ψαθυρά υλικά όπως το γυαλί και τα κεραμικά εμφανίζουν εκτενή γραμμική ελαστική συμπεριφορά. και πάνω από το όριο ελαστικότητας οδηγούνται στη θραύση. Στα μεταλλικά υλικά η γραμμική ελαστική



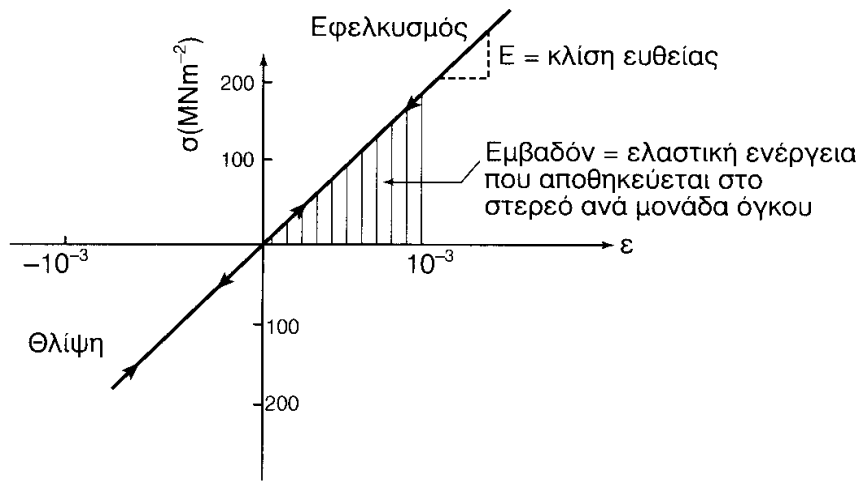
Σχήμα 1.2. Παραμόρφωση (επιμήκυνση) ενός σώματος κατά τον εφελκυσμό του.

συμπεριφορά βρίσκεται μέσα σε πολύ στενά όρια παραμόρφωσης (έως 1000με ή 0.1%). Η κλίση της ευθείας στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης ισούται με το μέτρο ελαστικότητας του υλικού (Σχήμα 3.α). Το εμβαδό της επιφάνειας κάτω από την ευθεία μας δίνει την ελαστική ενέργεια που αποθηκεύεται στο υλικό και αποδίδεται πάλι όταν καταργηθεί το φορτίο (η εφαρμοζόμενη τάση).

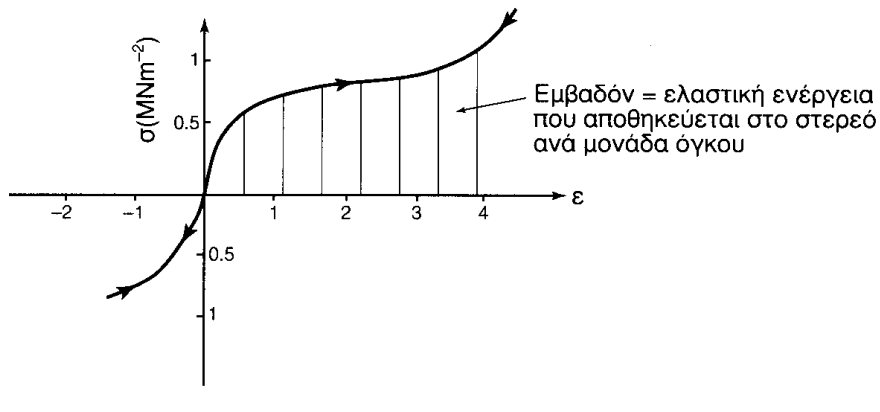
Τα ελαστομερή υλικά εμφανίζουν πολύ μεγάλες τιμές ελαστικής παραμόρφωσης (έως και 500%), αλλά στην περίπτωση αυτή, η εφαρμοζόμενη τάση από κάποια τιμή της παραμόρφωσης και πάνω, δεν εμφανίζει γραμμική μεταβολή με την παραμόρφωση (μη-γραμμική ελαστική συμπεριφορά, Σχήμα 3.β). Πολυμερή υλικά και μαλακά μέταλλα (π.χ. μόλυβδος) εμφανίζουν ανελαστική συμπεριφορά. Δηλαδή, στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (Σχήμα 3.γ), οι καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού δε συμπίπτουν, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ένας βρόγχος υστέρησης. Το εμβαδό αυτού του βρόγχου μας δίνει την ενέργεια ανά μονάδα όγκου που εκλύεται από το υλικό υπό τη μορφή θερμότητας.

Σε ένα όλκιμο υλικό (π.χ. τα περισσότερα μέταλλα), πέρα από το όριο ελαστικότητας εμφανίζεται μόνιμη παραμόρφωση (μη αντιστρεπτή μεταβολή σε σχήμα και μέγεθος) που ονομάζεται πλαστική παραμόρφωση. Η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης μέχρι και το όριο θραύσης για ένα τέτοιο υλικό φαίνεται στο Σχήμα 4. Μετά τη γραμμική περιοχή όπου το μέταλλο παραμορφώνεται ελαστικά, αρχίζει η πλαστική του παραμόρφωση, κατά την οποία ελαττώνεται το πλάτος και αυξάνεται το μήκος του υλικού. Στο σημείο μέγιστης τάσης (σημείο B) θα εμφανιστεί τοπικά ελάττωση της διατομής του υλικού, γνωστή ως δημιουργία “λαιμού” και περαιτέρω παραμόρφωση θα επιφέρει τη θραύση του υλικού εντός της περιοχής της.

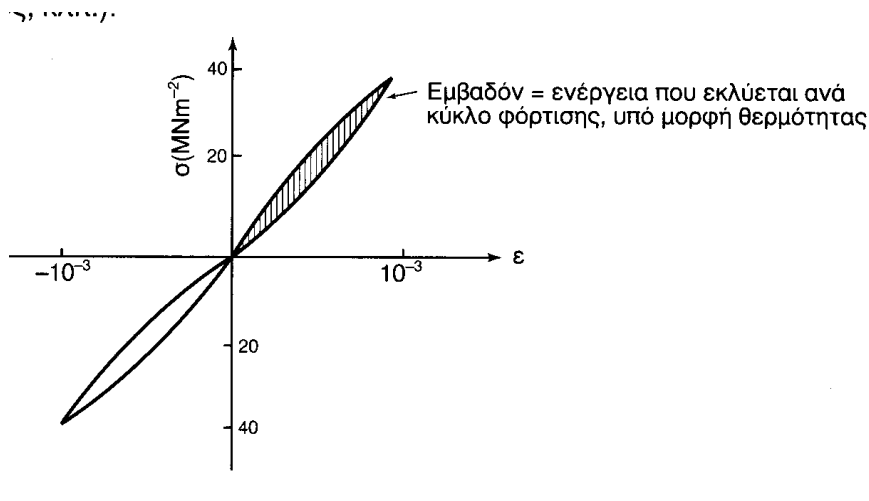
Στο διάγραμμα του Σχήματος 4, η τάση όπου αρχίζει να εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση, ονομάζεται όριο διαρροής. Για μικρότερα φορτία, το υλικό παραμορφώνεται ελαστικά. Σε διάφορα υλικά, η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή δεν είναι σημειακή (στο όριο διαρροής), αλλά γίνεται σε μία περιοχή που οριοθετείται από το ανώτερο και κατώτερο σημείο διαρροής. Ως συμβατικό όριο διαρροής ορίζουμε την τάση που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση του υλικού κατά 0.1%.



(α)

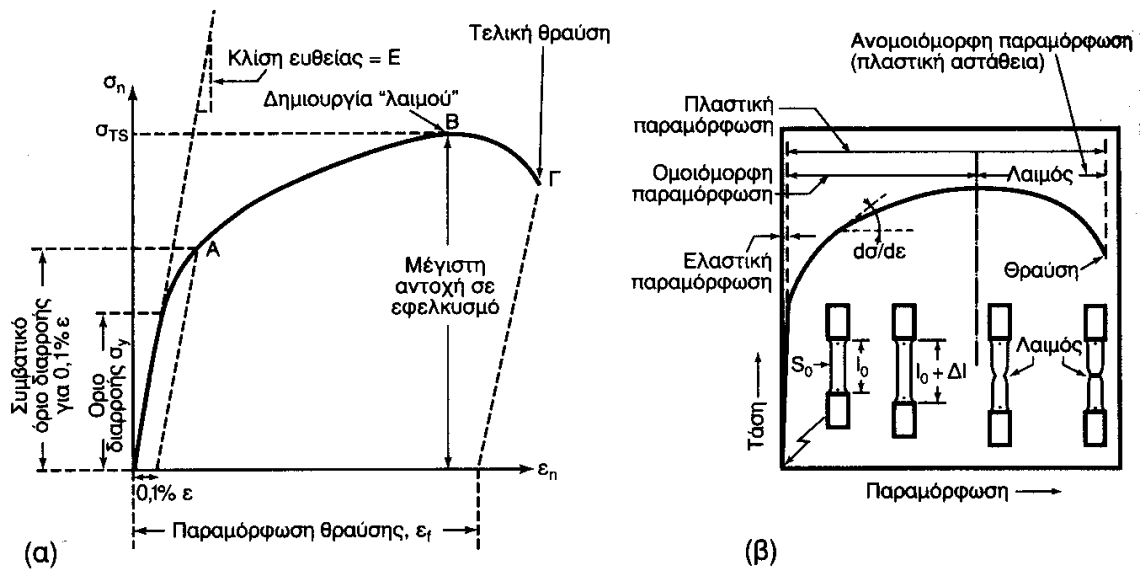


(β)



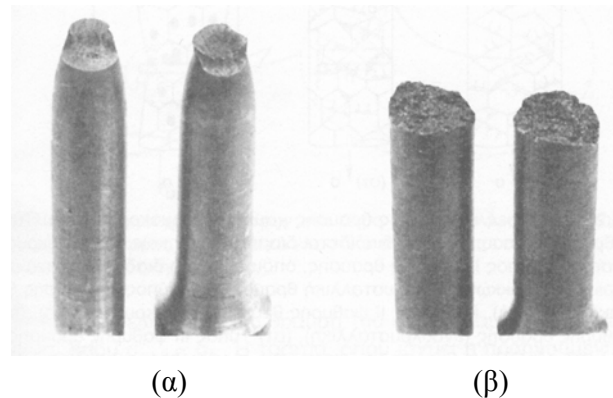
(γ)

Σχήμα 1.3. Διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης για (α) γραμμικά ελαστικό υλικό (β) ελαστομερές και (γ) ανελαστικό υλικό.



Σχήμα 1.4. Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για ένα όγκιμο μέταλλο

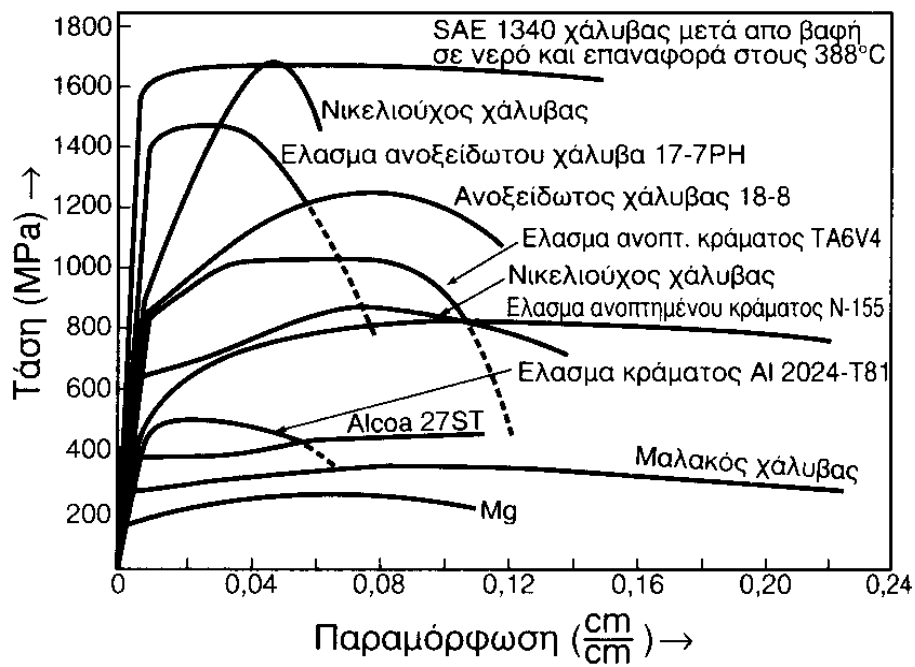
Ανάλογα με τον βαθμό της πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται της θραύσης, η εφελκυστική θραύση διακρίνεται σε ψαθυρή και όλκιμη θραύση. Κατά την όλκιμη θραύση, παρατηρείται μακροσκοπικά σημαντική ελάττωση στη διατομή του υλικού λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του (Σχήμα 1.5α), ενώ στη ψαθυρή θραύση η ελάττωση της διατομής είναι αμελητέα, χωρίς προηγούμενη μακροσκοπική πλαστική παραμόρφωση (Σχήμα 1.5β). Ψαθυρή είναι και η θραύση που υφίστανται τα διάφορα είδη πετρωμάτων (Σχήμα 1.6). Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για διάφορα μεταλλικά υλικά απεικονίζονται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.5. Αποτέλεσμα (α) όλκιμης και (β) ψαθυρής θραύσης ενός υλικού



Σχήμα 1.6. Αποτέλεσμα μονοαξονικής συμπίεσης μέχρι θραύσης σε κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος.



Σχήμα 1.7. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για διάφορα μεταλλικά υλικά.

1.2 Αισθητήρες μέτρησης μηχανικής παραμόρφωσης (strain gauges)

1.2.1 Αρχή λειτουργίας και είδη μετρητών

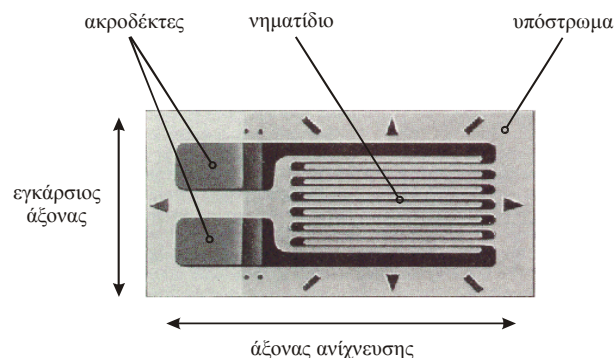
Οι μετρητές μηχανικής παραμόρφωσης (strain gauges) μετρούν τις μεταβολές του μεγέθους ενός στερεού αντικειμένου, όταν σε αυτό εξασκούνται δυνάμεις (τάσεις) συμπίεσης ή εφελκυσμού. Ο συνηθέστερος και απλούστερος τύπος μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης είναι ο μετρητής με αντίσταση, η λειτουργία του οποίου στηρίζεται στην αλλαγή της ηλεκτρικής του αντίστασης με τη μεταβολή των διαστάσεων του. Ένας απλός μετρητής μηχανικής παραμόρφωσης (με έναν άξονα ανίχνευσης) απεικονίζεται στο σχήμα 8. Αποτελείται από ένα λεπτό φύλλο πάχους μερικών μικρομέτρων (μm) πάνω στο οποίο με τη βοήθεια φωτογραφικών τεχνικών έχει σχηματισθεί μια συνεχής τεθλασμένη γραμμή σε σχήμα ζιγκ – ζαγκ (νηματίδιο). Τα υλικά κατασκευής των νηματιδίων είναι κράματα Cu – Ni ή Cr – Ni που συνδυάζουν υψηλή ειδική αντίσταση με υψηλή μηχανική αντοχή. Η όλη κατασκευή είναι στερεωμένη σε μονωτική βάση κατασκευασμένη από εποξικές ρητίνες διαφόρων τύπων ανάλογα με το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας των μετρητών.

Οι μετρητές με αντίσταση διατίθενται σε διάφορα μεγέθη (από δέκατα του χιλιοστού έως και 50 mm, Σχήμα 9) που ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή και στερεώνονται στο υπό μέτρηση αντικείμενο με τη χρησιμοποίηση μη αγωγίμων, ισχυρών συγκολλητικών κονιαμάτων (κυανο-ακρυλικές ή εποξικές κόλλες). Έτσι, όταν υπό συνθήκες συμπίεσης ή εφελκυσμού μεταβληθούν οι διαστάσεις του αντικειμένου (άρα και του μετρητή), αυτή η αλλαγή μεταφράζεται σε μεταβολή της αντίστασης του νηματιδίου του μετρητή.

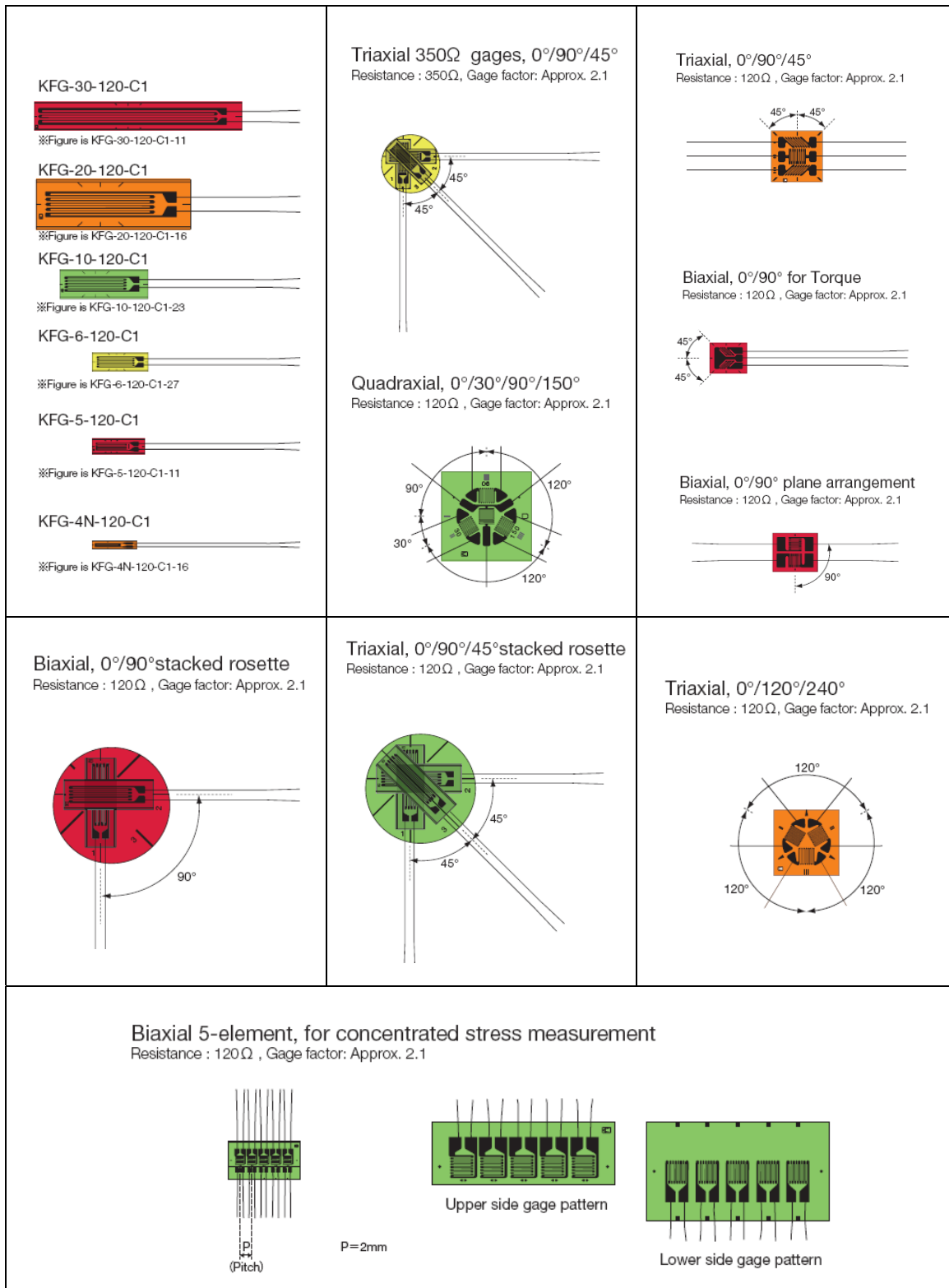
Γενικά, η αντίσταση ενός αγωγού δίνεται από τη σχέση:

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \quad (1.4)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση του υλικού σε Ωm , ℓ το μήκος του αγωγού σε m και S το εμβαδόν



Σχήμα 1.8. Κάτοψη μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης με αντίσταση



Σχήμα 1.9. Μετρητές μηχανικής παραμόρφωσης διαφόρων σχημάτων, ανάλογα με τη χρήση τους και τη διεύθυνση (εγκάρσια, διαμήκη, υπό γωνία της εφαρμοζόμενης δύναμης) των μετρούμενων παραμορφώσεων.

της διατομής του σε m^2 . Όταν λοιπόν στο υπό μέτρηση αντικείμενο ασκηθούν δυνάμεις που τείνουν να αυξήσουν το μήκος του (εφελκυσμός), θα αυξηθεί το μήκος του μετρητή με ταυτόχρονη ελάττωση του εμβαδού της διατομής του νηματιδίου προκαλώντας αύξηση στην ηλεκτρική αντίσταση R . Η αλλαγή της αντίστασης μπορεί να μετατραπεί με τη βοήθεια μιας γέφυρας Wheatstone σε μετρήσιμη διαφορά δυναμικού.

Το πηλίκο της ποσοστιαίας αλλαγής της αντίστασης R προς την ποσοστιαία αλλαγή του μήκους λόγω της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης ονομάζεται παράγοντας GF (gauge factor) και εκφράζει την ευαισθησία του αισθητήρα. Ισχύει δηλαδή:

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta \ell / \ell} = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad \text{ή} \quad GF \cdot \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \quad (1.5)$$

Ο παράγοντας G παίρνει τιμές μεταξύ 1,8 και 2,2 ενώ οι αντιστάσεις των μετρητών μηχανικής παραμόρφωσης κυμαίνονται μεταξύ 50 Ω και 2 $K\Omega$.

Με τη χρησιμοποίηση μιας γέφυρας Wheatstone (Σχήμα 10), όπου η μία εκ των τεσσάρων αντιστάσεων έχει αντικατασταθεί από ένα μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης (γέφυρα ενός τετάρτου), μπορούμε με εύκολο τρόπο να ανάγουμε τη μεταβολή της μετρούμενης τάσης εξόδου V_{out} (λόγω αλλαγής της αντίστασης R_{sg} του μετρητή) σε υπολογισμό της μεταβολής του μήκους που προκαλεί η συμπίεση ή ο εφελκυσμός στο υπό μέτρηση αντικείμενο.

Η τάση εξόδου V_{out} συναρτήσει της τάσης εισόδου V_{in} σε μια γέφυρα Wheatstone μπορεί να υπολογιστεί ως εξής: για μηδενική τάση εξόδου (γέφυρα σε ισορροπία) θα ισχύει:

$$V_{R_{sg}} = V_{R_2} \quad \text{ή} \quad I_1 R_{sg} = I_2 R_2 \quad (1.6)$$

και ανάλογα
$$V_{R_1} = V_{R_3} \quad \text{ή} \quad I_1 R_1 = I_2 R_3 \quad (1.7)$$

διαιρώντας κατά μέλη τις (1.6) και (1.7), προκύπτει:

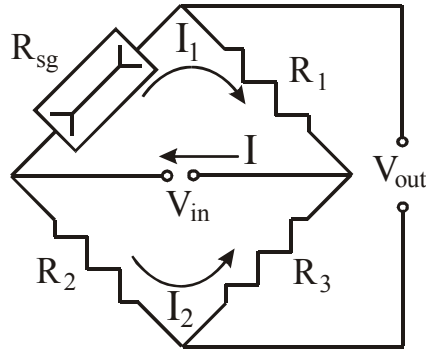
$$\frac{R_{sg}}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}$$

Στην γενική περίπτωση, για τη τάση εξόδου ισχύει ότι

$$V_{out} = I_1 R_{sg} - I_2 R_2 \quad (1.8)$$

$$\text{όπου } I_1 = \frac{V_{in}}{R_1 + R_{sg}} \quad \text{και} \quad I_2 = \frac{V_{in}}{R_2 + R_3}$$

Αντικαθιστώντας τις δύο τελευταίες σχέσεις στην (1.8), θα έχουμε τελικά:



Σχήμα 1.10. Γέφυρα Wheatstone ενός τετάρτου για μέτρηση μηχανικών τάσεων.

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{R_{sg}}{R_1 + R_{sg}} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right] \quad (1.9)$$

Αν επιλέξουμε $R_2=R_3$ και όταν δεν υπάρχει παραμόρφωση ρυθμίσουμε την R_1 έτσι ώστε $R_1 = R_{sg}$ η γέφυρα ισορροπεί και $V_{out}=0$. Υπό την εφαρμογή τάσης εφελκυσμού ή θλίψης, η αντίσταση R_{sg} θα μεταβληθεί κατά ΔR_{sg} οπότε θα εμφανιστεί τάση εξόδου η οποία σύμφωνα με την (1.9) θα είναι:

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{R_{sg} + \Delta R_{sg}}{R_1 + R_{sg} + \Delta R_{sg}} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right] \quad (1.10)$$

και εφόσον $R_2=R_3$ και $R_1 = R_{sg}$

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{R_{sg} + \Delta R_{sg}}{2R_{sg} + \Delta R_{sg}} - \frac{1}{2} \right] = V_{in} \left[\frac{\Delta R_{sg}}{4R_{sg} + 2\Delta R_{sg}} \right]$$

Χρησιμοποιώντας και από τη σχέση (1.5) ότι $GF \cdot \varepsilon = \Delta R_{sg} / R_{sg}$ προκύπτει τελικά

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{\frac{\Delta R_{sg}}{R_{sg}}}{\frac{4R_{sg} + 2\Delta R_{sg}}{R_{sg}}} \right] = V_{in} \left[\frac{GF \cdot \varepsilon}{4 + 2 \cdot GF \cdot \varepsilon} \right] = V_{in} \frac{GF \cdot \varepsilon}{4} \left[\frac{1}{1 + \frac{GF \cdot \varepsilon}{2}} \right] \quad (1.11)$$

Λόγω των μικρών μεταβολών της αντίστασης ΔR_{sg} με την παραμόρφωση του αντικειμένου, η αλλαγή της τάσης εξόδου είναι της τάξης των mV και γι αυτό συνήθως στην έξοδο χρησιμοποιείται κατάλληλος ενισχυτής σήματος. Για δεδομένη, λοιπόν, τιμή της τάσης εισόδου στη γέφυρα Wheatstone, μπορούμε μετρώντας τη μεταβολή της τάσης εξόδου να υπολογίσουμε τη μεταβολή της αντίστασης ΔR_{sg} του μετρητή και επομένως την αλλαγή στο μήκος του αντικειμένου που υφίσταται μηχανική παραμόρφωση.

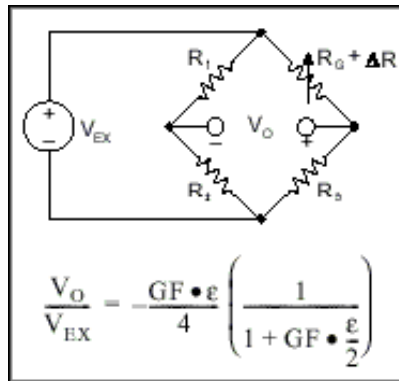
1.2.2 Συνδεσμολογίες μετρητών strain gauges

Στην πράξη, στις μετρήσεις μηχανικής παραμόρφωσης, η παραμόρφωση των δειγμάτων δεν είναι μεγαλύτερη από μερικά millistrain ($\times 10^{-3}$ ε). Επομένως, η μέτρηση της παραμόρφωσης απαιτεί την ακριβή μέτρηση των πολύ μικρών αλλαγών στην αντίσταση του μετρητή. Παραδείγματος χάριν, υποθέτοντας ότι ένα δείγμα δοκιμής υφίσταται παραμόρφωση 0.5 millistrain, ένας μετρητής strain gauge με έναν παράγοντα $GF = 2$, θα προκαλέσει μια αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση μόνον κατά $2 \cdot (0.5 \times 10^{-3}) = 0,1\%$. Για έναν μετρητή αντίστασης 120Ω, αυτό σημαίνει μια αλλαγή κατά 0,12Ω.

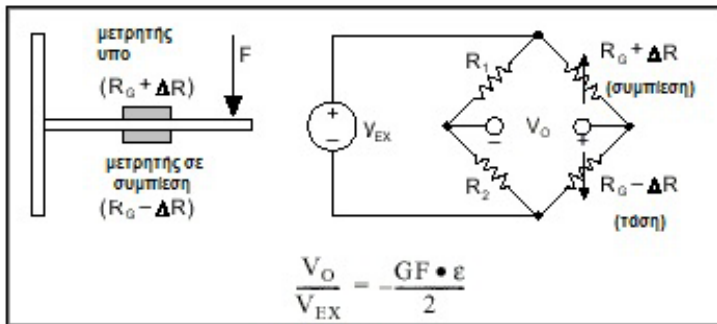
Εναλλακτικά, μπορούμε να αυξήσουμε την ευαισθησία της γέφυρας με το να χρησιμοποιήσουμε δύο ενεργούς μετρητές, τοποθετημένους σε αντίθετες κατευθύνσεις, έτσι ώστε όταν ο ένας επιμηκύνεται κατά την εφαρμογή μηχανικής τάσης, ο άλλος να συμπιέζεται. Με τη χρήση δηλαδή μίας συνδεσμολογίας γέφυρας με δύο μετρητές (γέφυρα $\frac{1}{2}$) όπου η αντίσταση του ενός αυξάνεται ($R_o + \Delta R$) ενώ του άλλου μειώνεται ($R_o - \Delta R$), η τάση εξόδου που παράγεται είναι γραμμική και περίπου διπλή από αυτή του κυκλώματος γεφυρών ενός τετάρτου.

Τέλος, μπορούμε να επιτύχουμε περαιτέρω αύξηση στην ευαισθησία του κυκλώματος με την αντικατάσταση και των τεσσάρων αντιστάσεων της γέφυρας από μετρητές μηχανικής παραμόρφωσης, εκ των οποίων οι δύο μετρητές θα υφίστανται συμπίεση και οι άλλοι δύο εφελκυσμό. Τα κυκλώματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 1.11.

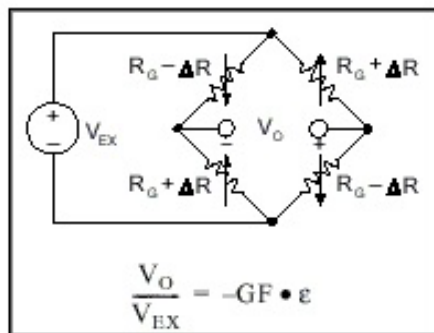
Οι εξισώσεις που δίνονται εδώ για τα κυκλώματα γεφυρών Wheatstone προϋποθέτουν μια αρχικά γέφυρα σε ισορροπία (μηδενική τάση εξόδου), όταν δεν εφαρμόζουμε πίεση. Στην πράξη εντούτοις, οι ανοχές της αντίστασης και η πίεση που προκαλούνται από την εφαρμογή των μετρητών θα παράγουν κάποια αρχική τάση (offset). Αυτή η αρχική τάση (offset) μπορεί να επαλειφθεί με δύο τρόπους. Κατ' αρχάς, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια μέθοδο μηδενισμού του offset, ή την εξισορρόπηση επεμβαίνοντας στο κύκλωμα και ρυθμίζοντας την αντίσταση στη γέφυρα ώστε να εξισορροπήσει η γέφυρα σε μια σταθερή τάση εξόδου. Εναλλακτικά, μπορούμε να μετρήσουμε την αρχική παραγόμενη τάση του κυκλώματος και να αντισταθμίσουμε επεμβαίνοντας στο λογισμικό ελέγχου και συλλογής δεδομένων.



Κύκλωμα γέφυρας ενός τετάρτου



Κύκλωμα μισής γέφυρας



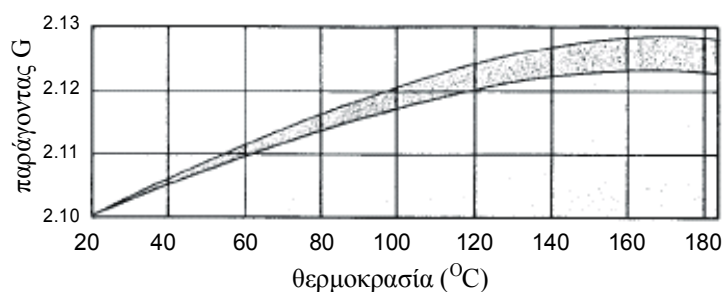
Κύκλωμα πλήρους γέφυρας

Σχήμα 1.11. Είδη συνδεσμολογιών των αντιστάσεων strain gauges που χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα γέφυρας.

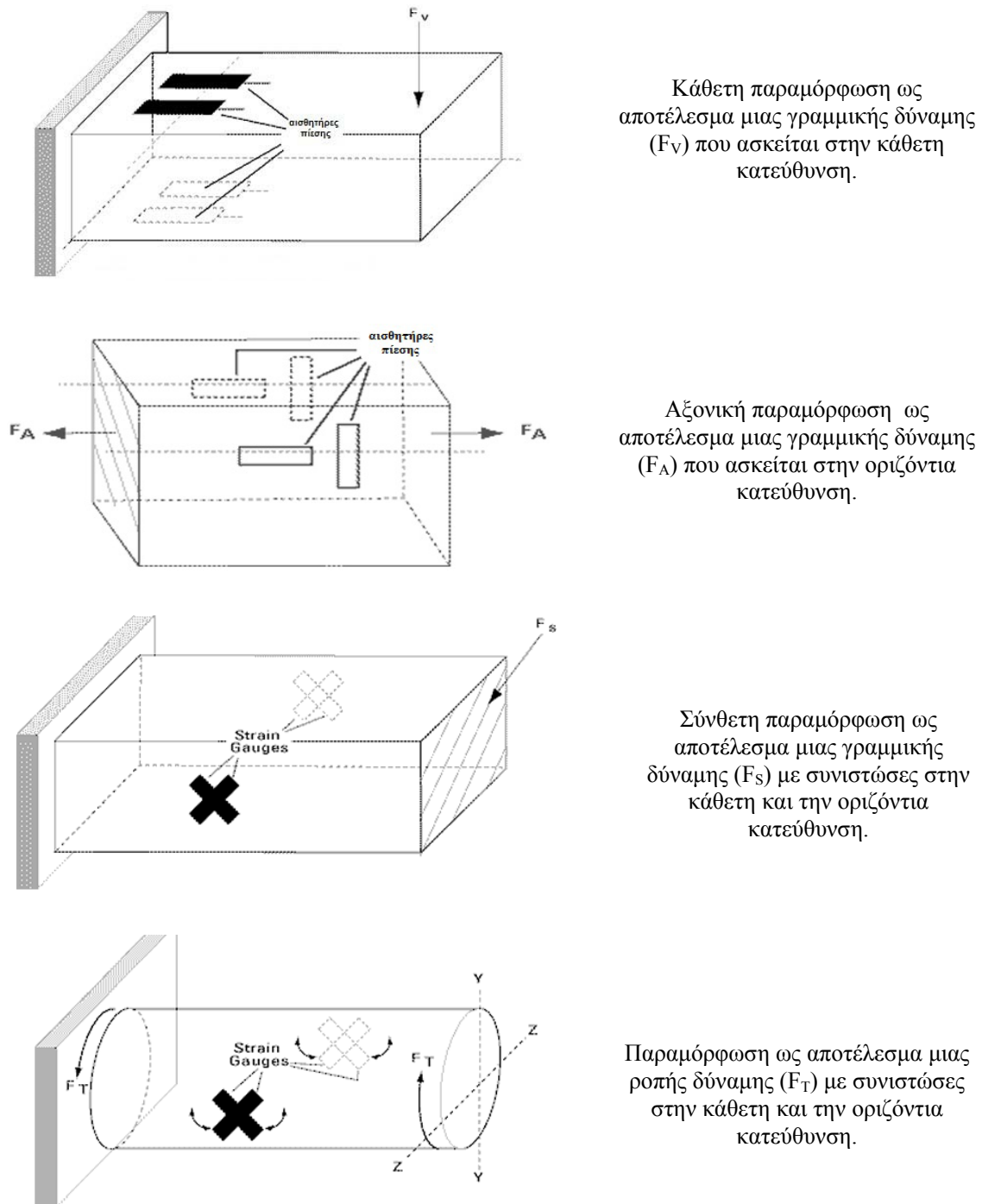
1.2.3 Παράγοντες σφάλματος στους μετρητές strain gauges

Μεγάλη σημασία για τον ακριβή υπολογισμό των μεταβολών των διαστάσεων των αντικειμένων, παίζει η ακριβής τοποθέτηση του μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης (καλή συγκόλληση και σωστός προσανατολισμός) στο υπό μέτρηση αντικείμενο. Διάφοροι τρόποι τοποθέτησης μετρητών strain gauges απεικονίζονται σχηματικά στο Σχήμα 1.13.

Σε ιδανικές συνθήκες, η αντίσταση του μετρητή αλλάζει μόνο συναρτήσει της εφαρμοζόμενης πίεσης. Εντούτοις, το μεταλλικό νηματίδιο των μετρητών παραμόρφωσης, καθώς επίσης και το υλικό του υποστρώματος ανταποκρίνονται εξίσου στις αλλαγές της θερμοκρασίας (Σχήμα 1.12). Οι κατασκευαστές μετρητών strain gauges προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν την ευαισθησία στη θερμοκρασία με την επεξεργασία του υλικού των μετρητών προκειμένου να αντισταθμίσουν τη θερμική διαστολή του υλικού που προορίζεται για το μετρητή. Ωστόσο, ενώ οι αντισταθμισμένοι μετρητές μειώνουν τη θερμική ευαισθησία, δεν την αφαιρούν εντελώς και η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να θεωρηθεί σημαντική.



Σχήμα 1.12. Μεταβολή του παράγοντα G συναρτήσει της θερμοκρασίας.

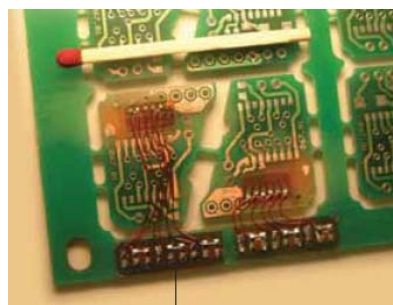


Σχήμα 1.13. Τρόποι τοποθέτησης των μετρητών μηχανικής παραμόρφωσης ανάλογα με το είδος του δείγματος και της παραμόρφωσης που θέλουμε να μετρήσουμε.

1.2.4 Εφαρμογές μετρητών μηχανικής παραμόρφωσης

Οι εφαρμογές των μετρητών μηχανικής παραμόρφωσης είναι ποικίλες. Οι μετρητές μηχανικής παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται:


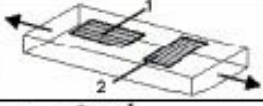


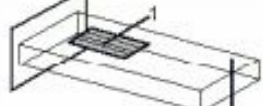
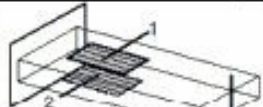
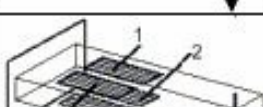


- στις κυψελίδες φόρτισης (load cells) για τον προσδιορισμό μιας άγνωστης δύναμης (φορτίου) ή μάζας (γέφυρες ζύγισης οχημάτων, βάρους υγρών σε δεξαμενές, κ.λ.π.)
- στους αισθητήρες πνευματικού βρόχου (pneumatic loop) για τον έλεγχο της οδικής κυκλοφορίας,
- σε διατάξεις για μέτρηση γραμμικής μετατόπισης,
- στην καταγραφή καταπονήσεων σε δομικά έργα, όπως οδικές και σιδηροδρομικές γέφυρες ή ψηλά κτίρια,
- στη μέτρηση μηχανικών τάσεων σε δείγματα υλικών, πρωτότυπους κινητήρες, αεροσκάφη κλπ.



Σχήμα 1.14. Τυπικές εφαρμογές μετρητών strain gauges (αεροδιαστημική, ηλεκτρονικά, κατασκευή μετατροπέων, σιδηροδρόμων, κ.ά.).

1.2.5 Επιλογή τύπου μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης

Τα δύο αρχικά κριτήρια για την επιλογή του σωστού τύπου μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης είναι η ευαισθησία και η ακρίβεια. Γενικά, εάν χρησιμοποιήσουμε περισσότερους μετρητές παραμόρφωσης, (ένα κύκλωμα πλήρους γέφυρας παρά μία γέφυρα ενός τετάρτου) η μέτρησή μας θα αποκριθεί γρηγορότερα και θα είναι ακριβέστερη. Αφ' ετέρου, το κόστος θα παίζει επίσης έναν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του τύπου μετρητή μηχανικής παραμόρφωσης. Χαρακτηριστικά, οι μετρητές πλήρων γεφυρών είναι σημαντικά ακριβότεροι από τους μετρητές γεφυρών ενός δευτέρου και γεφυρών ενός τετάρτου. Μια συνοπτική περιγραφή των διαφόρων τύπων μετρητών και του τρόπου τοποθέτησης τους, φαίνεται στον παρακάτω συνοπτικό πίνακα.

Πίεση	Εφαρμογή αισθητήρα	Τύπος γέφυρας	Ευαισθησία mV/V @1000 μΕ	Λεπτομέρειες
Αξονική		¼	0.5	Καλή απόλη στην εφαρμογή αλλά πρέπει να χρησιμοποιείται αντιστάση στην θερμοκρασία. Συναντάται και στην καμτική πίεση
		½	0.65	Καλύτερη , αντιστάθμιση θερμοκρασίας , αλλά είναι ευαίσθητη στην πίεση κάμσης
		¾	1.0	Καλύτερος, απορρίπτει την πίεση κάμσης αλλά όχι και της θερμοκρασίας. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν εικονικοί μετρητές για την αντιστάθμιση της θερμοκρασίας.
		Πλήρης	1.3	Πολύ καλύτερος. Πολύ ευαίσθητος και αντιστάθμιζε τόσο την θερμοκρασία όσο και την πίεση κάμσης
Καμτική		¼	0.5	Καλός , απόλη στην εφαρμογή αλλά πρέπει να χρησιμοποιούν εικονικό εύρος για την αντιστάθμιση της θερμοκρασίας. Αυτοσκορμεταξίδου καλά σε αξονική πίεση.
		½	1.0	Καλύτερος. Απορρίπτει την αξονική πίεση και αντιστάθμιζε στην θερμοκρασία
		Πλήρης	2.0	Τέλεια . Απορρίπτει την αξονική και αντιστάθμιζε στην θερμοκρασία. Περισσότερο ευαίσθητος στην καμτική πίεση
Στροφική-Διαμητική		½	1.0	Καλός . Οι αισθητήρες πρέπει να τοποθετηθούν σε γωνία 45 μοιρών από τον κεντρικό άξονα. Αξονικές και καμτικές δυνάμεις παράγουν ισοδύναμη πίεση και απορρίπτονται
		Πλήρης	2.0	Τέλεια. Περισσότερο ευαίσθητος πλήρη γέφυρα. Απορρίπτει αξονικές και καμτικές δυνάμεις

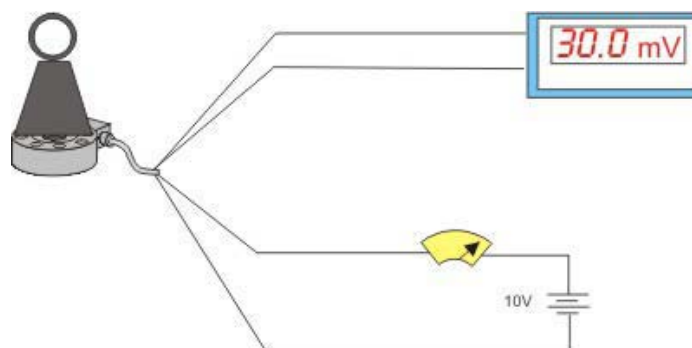
1.3 Αισθητήρες μέτρησης πίεσης (κυψέλες φόρτισης – load cells)

1.3.1 Περιγραφή και αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης φόρτισης

Η αρχή λειτουργίας της κυψέλης φόρτισης είναι απλή. Στην καρδιά της βρίσκεται ένας αισθητήρας μηχανικής παραμόρφωσης (strain gage), ο οποίος αλλάζει την αντίστασή του όταν βρίσκεται υπό τάση (εφελκυσμού ή συμπίεσης). Η ακριβής τοποθέτηση του αισθητήρα, η διαδικασία τοποθέτησης, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν μια υπολογίσιμη επίδραση στη συνολική απόδοση της κυψέλης. Ο αισθητήρας τοποθετείται στην βάση της επιφάνειας που θα εφαρμοστεί το φορτίο και αλλάζει την αντίσταση του καθώς τα λεπτά σύρματα που τον απαρτίζουν συμπιέζονται ή εκτείνονται ανάλογα του εφαρμοζόμενου φορτίου. Στις περισσότερες κυψέλες φόρτισης εφαρμόζονται αισθητήρες μηχανικής παραμόρφωσης που απαρτίζουν μια γέφυρα Wheatstone ενός τετάρτου.

Όταν μία τάση εισόδου εφαρμόζεται στη γέφυρα, η έξοδος γίνεται ανάλογη με την μηχανική φόρτιση στην κυψέλη. Όσο μεγαλύτερη μηχανική τάση εφαρμόζεται στο κελί τόσο περισσότερο η γέφυρα αποκλίνει από την ισορροπία της και άρα μεγαλώνει το σήμα εξόδου. Αυτή η έξοδος μπορεί να ενισχυθεί και να επεξεργαστεί από άλλες διατάξεις. Προκειμένου να αυξήσει την ευαισθησία της η γέφυρα, όλοι οι βραχίονές της είναι ενεργοί και οι τέσσερις αισθητήρες διατάσσονται έτσι ώστε δύο να είναι υπό συμπίεση, ενώ οι άλλοι δύο είναι υπό εφελκυσμό (κύκλωμα πλήρους γέφυρας).

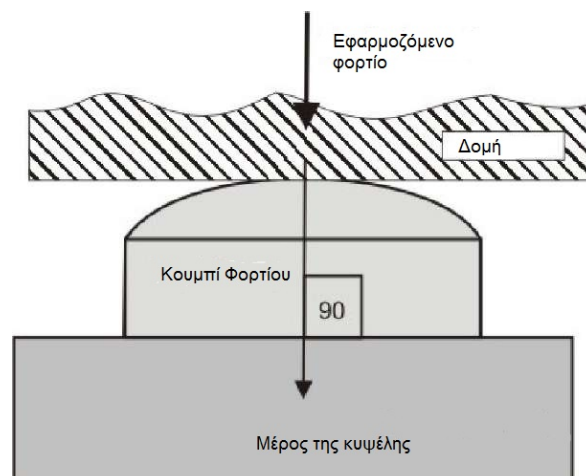
Η τάση τροφοδοσίας που εφαρμόζεται στην κυψέλη φόρτισης μπορεί να καθοριστεί από το χρήστη, αλλά αλλαγή σε αυτήν θα επιφέρει και αλλαγή στο σήμα εξόδου. Έτσι, η έξοδος συνήθως εκφράζεται σε mV/V . Για παράδειγμα κυψέλη που έχει παράγοντα βαθμονόμησης (calibration factor) $3mV/V$ θα δώσει σε πλήρες φορτίο σήμα εξόδου $30mV$ όταν η τάση τροφοδοσίας είναι $10V$, αλλά μόνον $15mV$ αν η τάση τροφοδοσίας γίνει $5V$ (Σχήμα 1.15).



Σχήμα 1.15. Για μέγιστο φορτίο κυψέλης με παράγοντα βαθμονόμησης $3mV/V$ το σήμα εξόδου θα είναι $30mV$.

Μια κυψέλη φόρτισης πρόκειται να λειτουργήσει σωστά αν γίνει η τοποθέτησή της με σωστό τρόπο. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να πληρούνται και να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη ορισμένες προϋποθέσεις. Η επιφάνεια τοποθέτησης για την κυψέλη φόρτισης θα πρέπει να είναι επίπεδη. Αυτό εξασφαλίζει ότι η κυψέλη ακουμπά ομοιόμορφα, όλο το φορτίο κατανέμεται αξονικά της κυψέλης φόρτισης (μηδενικό σφάλμα συνημίτονου) και ότι τα υψηλότερα σημεία δε δημιουργούν μια ανομοιόμορφη φόρτιση και συνεπώς άνισα επίπεδα κατανομής του φορτίου. Επίσης, η επιφάνεια στήριξης για την κυψέλη φόρτισης θα πρέπει να είναι σκληρή και άκαμπτη. Αυτό εξασφαλίζει στην επιφάνεια να μην λυγίσει και να μην συστραφεί κάτω από συνθήκες μηχανικής φόρτισης. Οι καταπονήσεις αυτές επί της επιφάνειας μπορεί να είναι σημαντικές, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούμε μικροσκοπικές κυψέλες. Φορτία των 40.000lbs ανά τετραγωνική ίντσα δεν είναι ασυνήθιστα. Αν η επιφάνεια είναι σκληρή και άκαμπτη δεν θα στρεβλωθεί και αυτό εξασφαλίζει ότι η κυψέλη φόρτισης φορτίζεται ομοιόμορφα και συνεπώς υφίσταται τα επίπεδα της μηχανικής τάσης που θέτουν οι προδιαγραφές της.

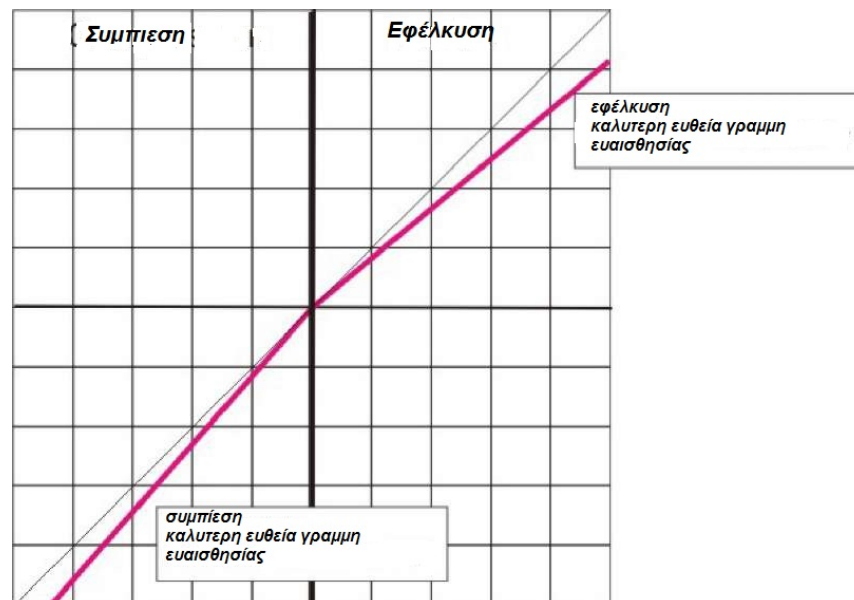
Ένα φυσικό χαρακτηριστικό των κυψελών συμπίεσης αποτελεί το κουμπί φορτίου (load button). Ένα κουμπί φορτίου είναι ένα θολωτό σημείο φόρτισης που είναι συγκολλημένο στο πλάι της κυβοειδούς κυψέλης που έχει οριστεί για να δεχτεί την εφαρμογή φορτίου. Τα κουμπιά φορτίου χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν σωστά την συμπίεση, εξαλείφοντας το δυναμικό πλευρικό φορτίο. Ένα κουμπί φορτίου όταν κατασκευάζεται στρογγυλοποιείται έτσι ώστε το φορτίο που μετριέται πάντα να στηρίζεται στο ψηλότερο σημείο του κουμπιού. Ένα κουμπί φορτίου εξασφαλίζει ότι ολόκληρο το φορτίο της εφαρμοσμένης δύναμης να ασκείται σε μια κατεύθυνση που είναι κάθετη στο κελί φορτίου.



Σχήμα 1.16. Σχηματικό διάγραμμα όπου απεικονίζεται ο τρόπος εφαρμογής φορτίου μέσω του load button που εξασφαλίζει κάθετη εφαρμογή του φορτίου.

Οι περισσότερες κυψέλες φόρτισης χρησιμοποιούνται για να μετρούν τόσο την συμπίεστική όσο και την εφελκυστική τάση. Στις κυψέλες φόρτισης που μετράμε συμπίεστική πίεση προσαρμόζεται ένα μπουτόν όπου ασκείται η πίεση ώστε να αποφευχθούν οι πλευρικές πιέσεις. Ο φυσικός σχεδιασμός μιας κυψέλης φόρτισης προσαρμόζεται ανάλογα με την υπό μέτρηση πίεση. Οι κυψέλες που πρόκειται να μετρήσουν μόνο την συμπίεστική πίεση τείνουν να έχουν μεγαλύτερο ύψος προς την διάμετρο. Ενώ στις κυψέλες που εφαρμόζονται στην εφελκυστική πίεση η διάμετρο τείνει να είναι μεγαλύτερη του ύψους.

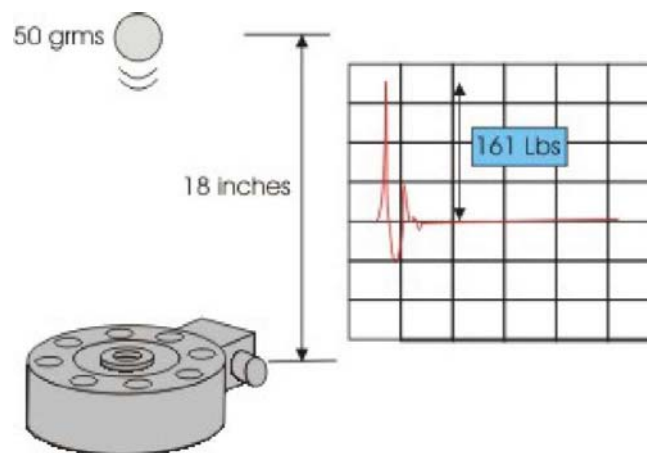
Η συμμετρία των κυψελών έχει να κάνει με το αν μια κυψέλη παρουσιάζει την ίδια ευαισθησία για χρήση μέτρησης τόσο για συμπίεση όσο και για εφελκυσμό. Όλες οι κυψέλες παρουσιάζουν μη-συμμετρική συμπεριφορά σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό. Η γραμμική απεικόνιση για τη συμπίεση σε ένα κελί φορτίου δεν είναι, εξ ορισμού, συμμετρική ως προς τη γραμμική παράσταση για τον εφελκυσμό (Σχήμα 1.16). Έτσι, όταν απεικονίζονται και οι δύο ευαισθησίες, οι καμπύλες ευαισθησίας για τη συμπίεση και τον εφελκυσμό είναι διαφορετικές και παρουσιάζουν διαφορετική κλίση. Οι περισσότερες δυναμοκυψέλες συμπίεσης – εφελκυσμού χρησιμοποιούνται σε μία μόνο κατεύθυνση σε πρακτικές εφαρμογές και επομένως το ζήτημα της συμμετρίας δεν υφίσταται. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως, οι εφαρμογές ενδέχεται να απαιτούν πραγματική συμμετρία σε ένα κελί φορτίου. Ένα παράδειγμα θα μπορούσε να είναι μια εφαρμογή, η οποία μετρά τη συμπίεση και την ένταση σε μια υδραυλική γραμμή. Σε αυτή την περίπτωση, είναι προτιμότερη η χρήση και των δύο παραγόντων βαθμονόμησης (ένας για κάθε κατεύθυνση) αντί της χρήσης ενός ενιαίου συντελεστή βαθμονόμησης. Είναι δυνατόν να επιτευχθεί πραγματική συμμετρία σε ένα κελί φορτίου αλλά αυτή η διαδικασία καθίσταται ακριβή.



Σχήμα 1.17. Καμπύλη συμμετρίας συμπίεσης – εφελκυσμού σε κυψέλη φόρτισης

1.3.2 Δυναμική φόρτιση και προστασία

Το εύρος της φόρτισης πρέπει προφανώς να είναι λίγο μεγαλύτερο από το μέγιστο φορτίο που η κυψέλη θα συναντήσει κατά τη διάρκεια της κανονικής της χρήσης. Σε όλες τις εμπορικά διαθέσιμες κυψέλες (όπως και αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία) η ικανότητα υπερφόρτωσης είναι 50%. Αυτό σημαίνει ότι αν μία κυψέλη φόρτισης έχει ονομαστικό μέγιστο φορτίο 100 lbs, μπορεί να αντέξει 150 lbs πριν να προκληθεί μόνιμη ζημιά σε αυτή. Ωστόσο, η κυψέλη φόρτισης δε θα κρατήσει τις προδιαγραφές της μεταξύ 100 και 150 lbs. Πάνω από το εύρος υπερφόρτωσης είναι μια περιοχή όπου προκαλείται προοδευτικά ζημιά. Σε περαιτέρω χρήση σε αυτή την περιοχή, η μεγαλύτερη ζημιά που μπορεί να γίνει, είναι η κυψέλη να σπάσει τελικά. Οι κυψέλες που έχουν χρησιμοποιηθεί πέραν του 150% του εύρους τους δεν είναι πάντα κατεστραμμένες έτσι ώστε να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά θα χρειάζονται μόνιμα μια ηλεκτρική αντιστάθμιση (offset). Αυτό μπορεί εύκολα να επιτευχθεί από τα ηλεκτρονικά τμήματα που είναι συνδεδεμένη η κυψέλη. Ωστόσο, λόγω αυτής της μόνιμης βλάβης της κυψέλης θα υπάρχει μικρότερη ικανότητα υπερφόρτωσης και η ζωή της θα εξαρτηθεί από το πόσο προοδευτική ήταν η βλάβη που υπέστη.

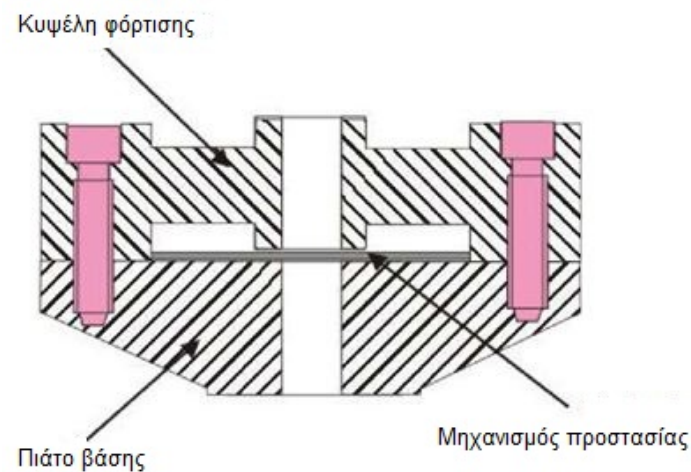


Σχήμα 1.18. Απόκριση κυψέλης φόρτισης κατά την εφαρμογή δυναμικής φόρτισης της.

Η δυναμική φόρτιση μπορεί να είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας κατά την εξέταση του εύρους φορτίου προκειμένου να επιλέξουμε μια κυψέλη φόρτισης για την εφαρμογή μας. Τα δυναμικά φορτία σε μια κυψέλη φόρτισης μπορούν να έχουν δραματική επίδραση σε αυτή και σε πολλές περιπτώσεις την καταστρέφουν, χωρίς να γίνεται αντιληπτό. Τα δυναμικά φορτία ενεργούν πολύ γρήγορα και απαιτούν υψηλής συχνότητας σήμα για να ανιχνευθούν. Εάν το σύστημα έχει σχεδιασθεί σωστά, τα άγνωστα δυναμικά φορτία δεν είναι πρόβλημα. Τα δυναμικά φορτία εμφανίζονται συχνά κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης της κυψέλης φόρτισης. Ας υποθέσουμε ότι μια κυψέλη φόρτισης 100lbs τοποθετείται στο πάτωμα. Εάν ένα 3/8inch ρουλεμάν που ζυγίζει λιγότερο από 2 ουγκιές πέσει από ύψος 18 inches στην κυψέλη, αυτή υφίσταται μία μέγιστη φόρτιση 161 lb. Αυτή η επίδραση μπορεί να

επιφέρει μόνιμη ζημιά στην κυψελίδα φόρτισης. Το σήμα που καταγράφουμε από την κυψέλη φόρτισης θα πρέπει να έχει μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας (πάνω από 300Hz) προκειμένου να ανιχνεύσουμε αυτή την αλλαγή. (Σχήμα 1.18)

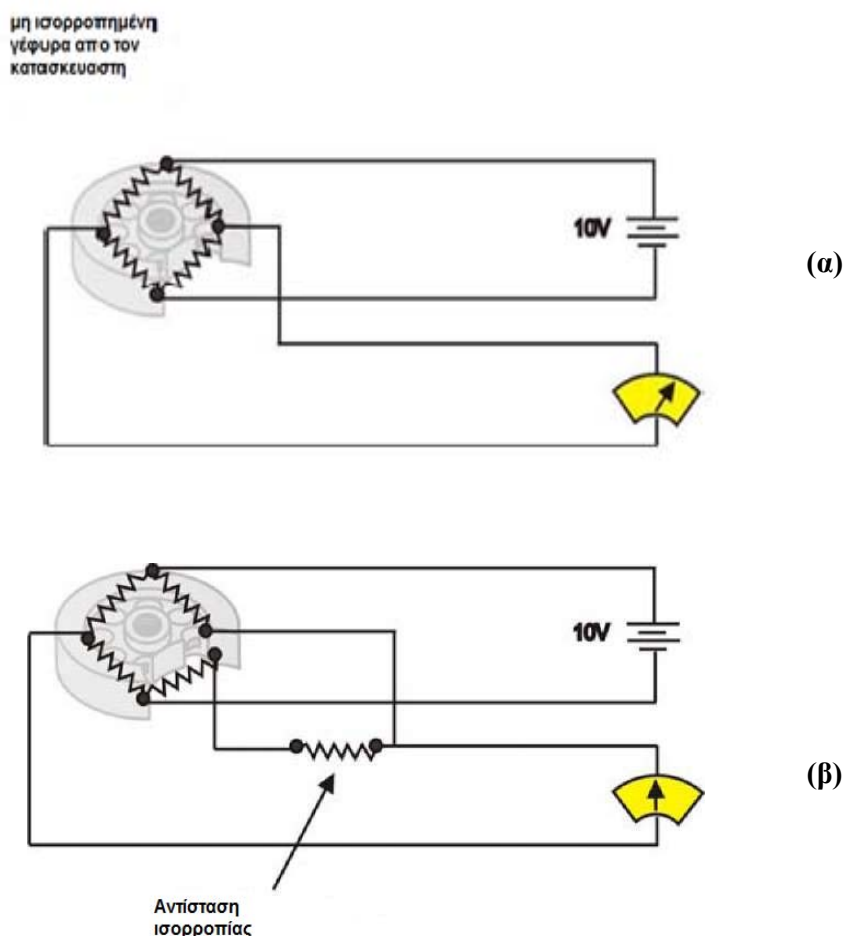
Η προστασία υπερφόρτισης γενικά αναφέρεται στο πως μπορεί μια συσκευή ή ένα σύστημα να προστατευτεί από καταστροφή που μπορεί να προέλθει όταν σε μία είσοδο εφαρμοστεί τάση που είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση εισόδου της συσκευής. Ειδικότερα, η προστασία υπερφόρτισης σε ένα κελί φόρτισης αναφέρεται στα μέσα που χρησιμοποιούνται για να αποτρέψουμε το διάφραγμα της κυψέλης να αποκλίνει πέρα από το ελαστικό του όριο βάσει της κατασκευής του. Χωρίς αυτή την προστασία της κυψέλης θα μπορούσε να προκληθεί ανεπανόρθωτη βλάβη κάτω υπό την επίρεια μεγάλης ασκούμενης τάσης εισόδου. Για να επιτευχθεί η προστασία τοποθετείται ένας μηχανισμός στην κυψέλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.19. Για τις κυψέλες φόρτισης οι οποίες δεν έχουν προστασία για υπέρβαρα φορτία, υπάρχει μια ανοχή υπερφόρτωσης περίπου στο 50%. Αυτό σημαίνει πως για μία κυψέλη φόρτισης για μέγιστο φορτίο 100 lbs χωρίς προστασία, μπορεί να αντέξει βάρος 150 λιβρών χωρίς να υποστεί κάποια βλάβη. Σημειώνεται πως στην περίπτωση που ξεπεραστεί το όριο εισόδου μιας κυψέλης φόρτισης, η έξοδος δεν επηρεάζεται περαιτέρω. Η μηχανική προστασία των κυψελών χρησιμοποιείται, λόγω κατασκευής, σε κυψέλες φόρτισης που μετρούν συμπίεση και όχι εφελκυσμό.



Σχήμα 1.19. Μηχανισμός προστασίας σε κυψέλη φόρτισης (σ' αυτή την περίπτωση ο μηχανισμός προστασίας είναι τοποθετημένος ανάμεσα στο πιάτο βάσης και την κυψέλη φόρτισης)

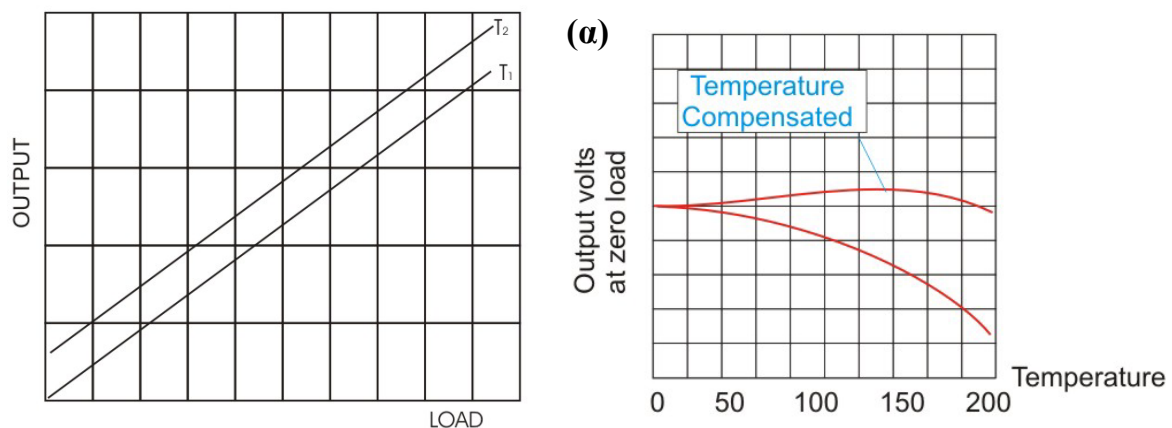
1.3.3 Κυψέλη φόρτισης σε ισορροπία – επίδραση της θερμοκρασίας

Όταν δεν εφαρμόζεται μηχανικό φορτίο σε μία κυψέλη φορτίου που τροφοδοτείται με κανονική τάση τροφοδοσίας, θα πρέπει στην ιδανική περίπτωση να δίνει μηδενικό σήμα εξόδου (κυψέλη σε μηδενική ισορροπία). Στην πράξη ωστόσο, και για διάφορους κατασκευαστικούς λόγους, το σήμα εξόδου δεν είναι ποτέ μηδενικό και γι αυτό το λόγο προσθέτονται αντιστάσεις στην διάταξη ώστε να μηδενιστεί η ένδειξη και η γέφυρα να ισορροπήσει (Σχήμα 1.20). Η αντίσταση ισορροπίας μπορεί να μεταβληθεί κατά την διάρκεια του χρόνου λειτουργίας της γέφυρας. Παράγοντες που μπορούν να επιδράσουν στην αλλαγή αυτή είναι το περιβάλλον λειτουργίας, η θερμοκρασία και η ηλικία του αισθητηρίου, καθώς και η υπερφόρτωση του. Ο περιοδικός έλεγχος εξασφαλίζει ακριβή απόδοση κατά την ζωή του μετατροπέα.

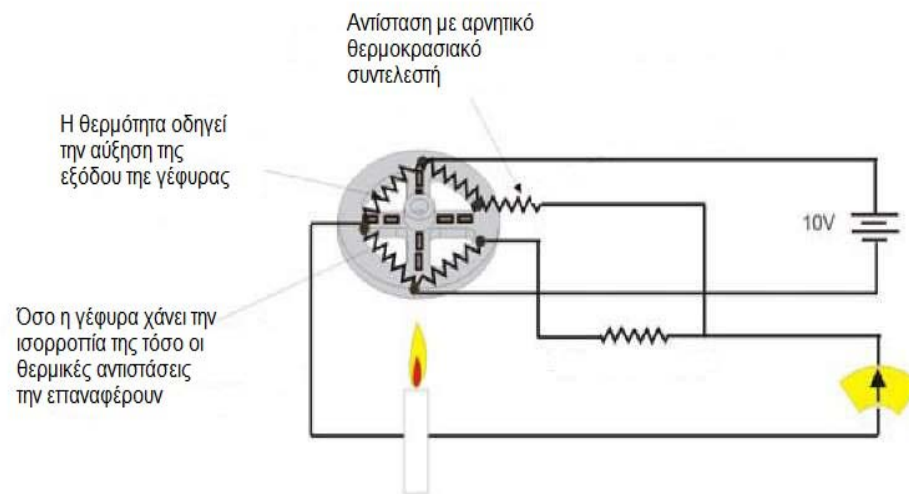


Σχήμα 1.20. Σχηματικό διάγραμμα δυναμοκυψέλης που ισορροπεί με τη χρήση επιπλέον αντιστάσεων στη συνδεσμολογία της γέφυρας.

Στις μεταβολές της θερμοκρασίας μια κυψέλη σε ισορροπία αλλάζει συμπεριφορά (Σχήμα 1.21α). Μπορούμε ωστόσο να ελαχιστοποιήσουμε τις αλλαγές αυτές εισάγοντας αντιστάσεις αντιστάθμισης στο σύστημα. Η αλλαγή της θερμοκρασίας επιφέρει αλλαγή και στην ένδειξη του οργάνου, ωστόσο οι αλλαγές αυτές οδηγούν και τις θερμικές αντιστάσεις να αλλάξουν τις τιμές τους. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η ισορροπία της γέφυρας (Σχήμα 1.21β). Η αντιστάθμιση μηδενικής ισορροπίας εκφράζεται συνήθως ως μία επί τοις εκατό αλλαγή επί ολόκληρης της κλίμακας, ανά μονάδα θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, δυναμοκυψέλη των 10000lb με 0.002% F.S./ $^{\circ}$ F, θα παρουσιάσει μετατόπιση του μηδενός κατά 0,2lb για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1° F σε σχέση με τη θερμοκρασία της βαθμονόμησης.

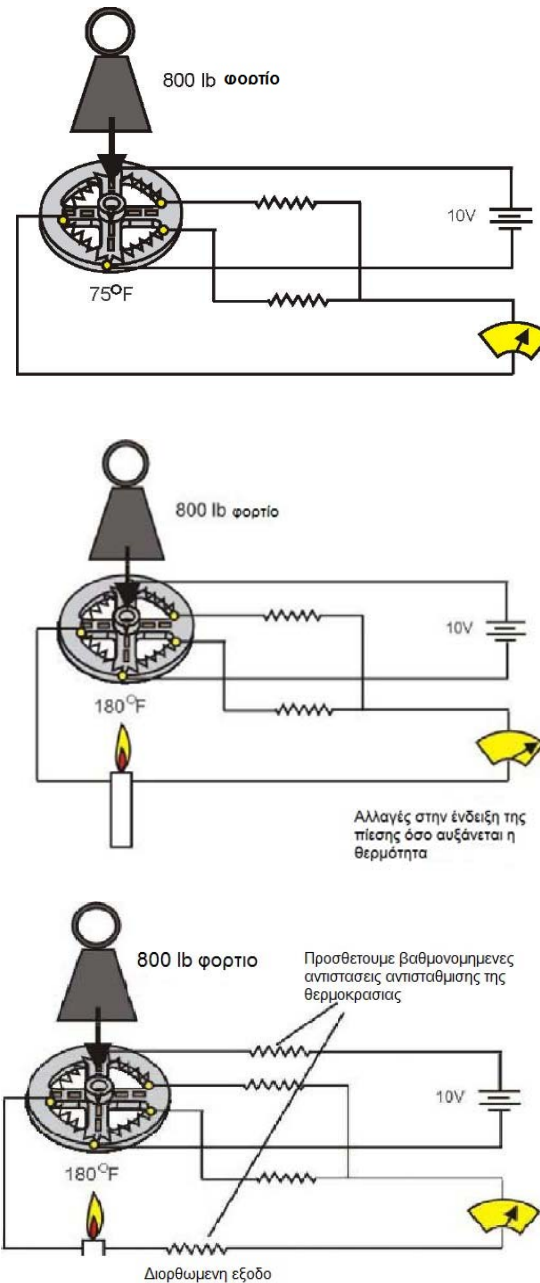


(β)



Σχήμα 1.21. Σχηματικό διάγραμμα δυναμοκυψέλης όπου επιτυγχάνεται ισορροπία με τη χρήση αντιστάσεων αντιστάθμισης.

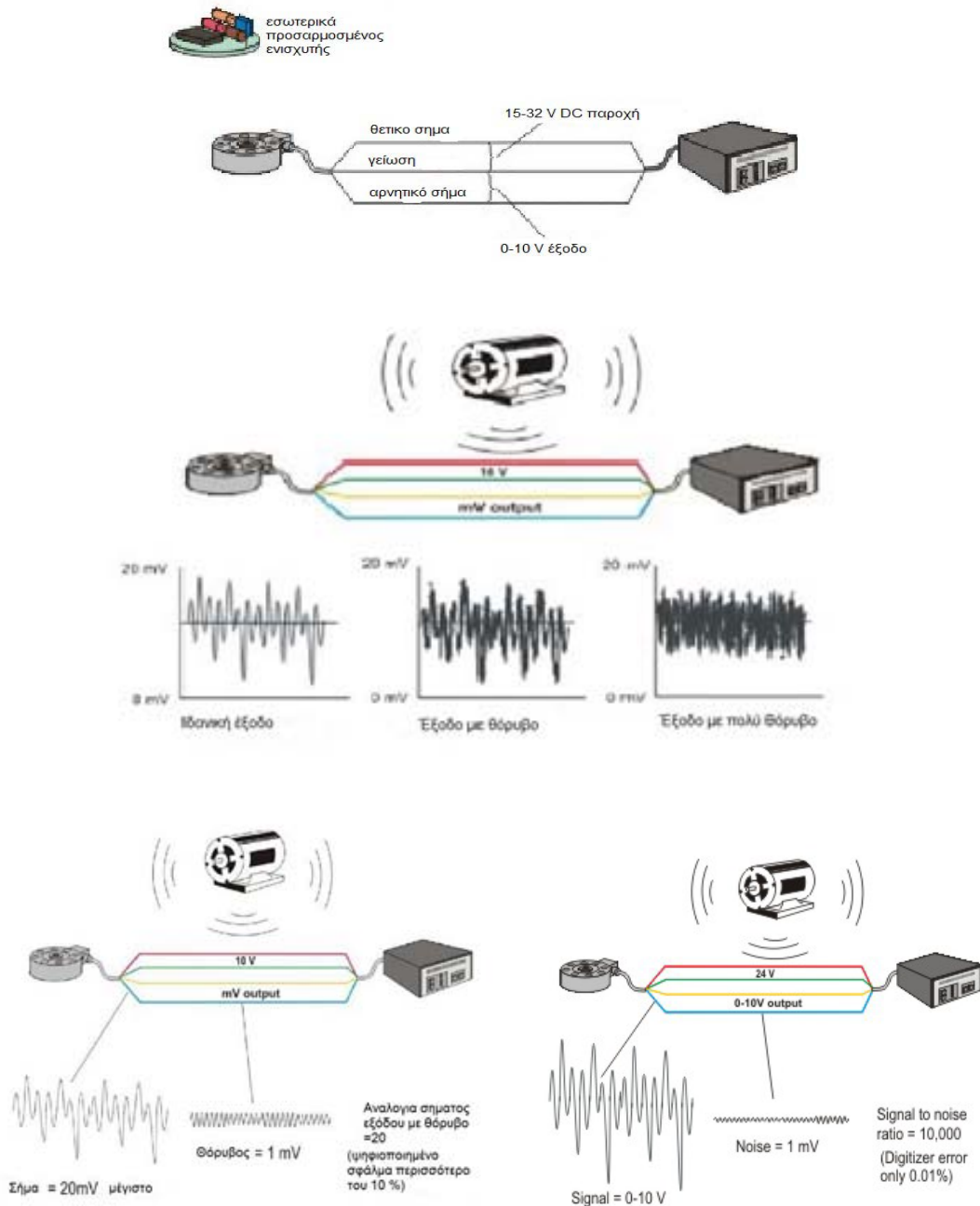
Πέρα από τη μετατόπιση του μηδενός, η αλλαγή στη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, δηλαδή όταν η δυναμοκυψέλη βρίσκεται υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου, θα επιφέρει αλλαγή στο σήμα εξόδου και θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και σε αυτή την περίπτωση κατάλληλες αντιστάσεις αντιστάθμισης των θερμοκρασιακών αλλαγών (Σχήμα 1.22).



Σχήμα 1.22. Σχηματική αναπαράσταση της επίδρασης της θερμοκρασιακής αλλαγής και των αντιστάσεων που χρησιμοποιούνται προκειμένου να αντισταθμίσουν τις μεταβολές στο σήμα εξόδου.

1.3.4 Χρήση εσωτερικού ενισχυτή σε κυψέλη φόρτισης

Κυψέλη φόρτισης χωρίς εσωτερικό ενισχυτή λαμβάνει από εξωτερική πηγή την τάση λειτουργίας της και στην έξοδο της παράγει σήμα μερικών mV. Στην περίπτωση αυτή, η επίδραση του εξωτερικού ηλεκτρικού θορύβου μπορεί να είναι σημαντική, δίνοντας λόγους



Σχήμα 1.23. Σχηματική αναπαράσταση ολοκληρωμένης μετρητικής διάταξης κυψέλης φόρτισης με ή χωρίς ενσωματωμένο προενισχυτή.

σήματος προς θόρυβο λιγότερο από 20. Η χρήση της εσωτερικής ενίσχυσης του σήματος μπορεί να βελτιώσει πολύ την κατάσταση αυτή και γι αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ενσωματωμένοι ενισχυτές στη μονάδα της κυψέλης φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό η ενίσχυση του χαμηλού σήματος της γέφυρας πραγματοποιείται στο εσωτερικό του μετατροπέα κάνοντας το σύστημα λιγότερο ευάλωτο στον εξωτερικό ηλεκτρικό θόρυβο και αυξάνοντας αισθητά το λόγο σήματος προς θόρυβο.

Ωστόσο, οι εσωτερικοί ενισχυτές σε πολλές εφαρμογές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Υπάρχει περιορισμός όταν η συσκευή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε ακραία περιβάλλοντα, όπως υψηλή θερμοκρασία ή όταν ο αισθητήρας τοποθετείται σε χώρο μη προσβάσιμο από τον χρήστη, όπως σε τοξικά ή ραδιενεργά περιβάλλοντα ή γενικά σε περιορισμένους χώρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

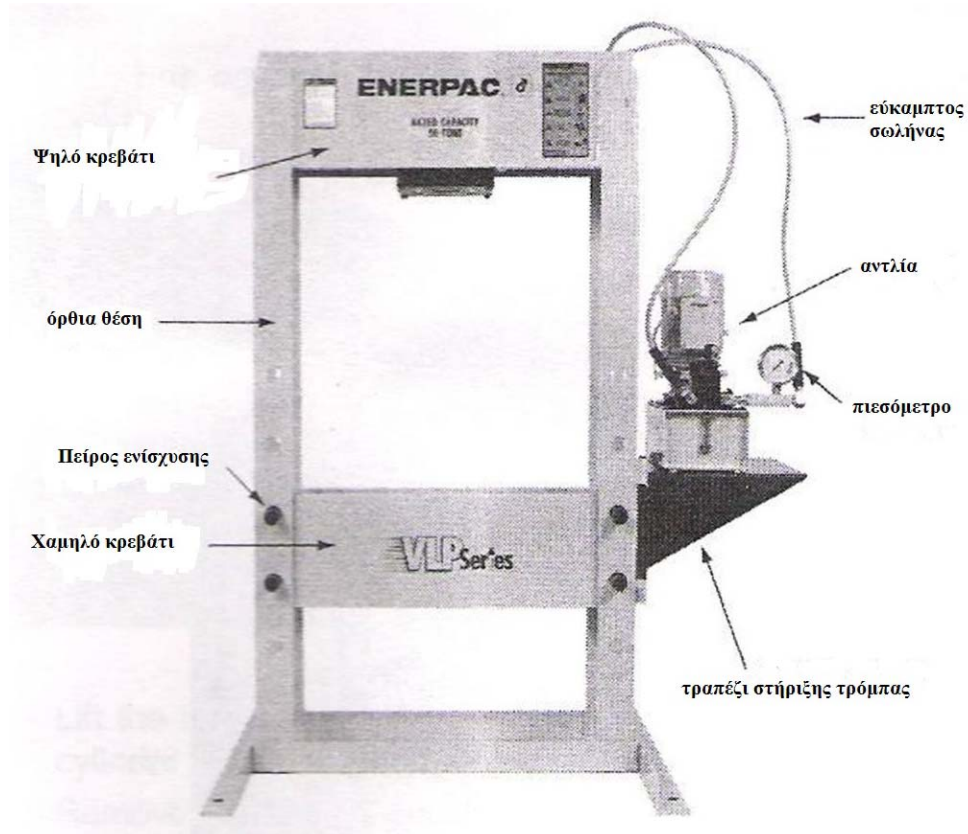
2.1 Χειροκίνητη υδραυλική πρέσα ENERPACK

Για τη μηχανική φόρτιση των διαφόρων διαμορφωμένων δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε χειροκίνητη υδραυλική πρέσα μοντέλο VLP106, του οίκου ENERPAC σαν και αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Τα βασικά μέρη της αντλίας είναι το σιδερένιο πλαίσιο, η χειροκίνητη αντλία λαδιού που μεταφέρει υδραυλικά την πίεση, ο αναλογικός μετρητής πίεσης και το έμβολο μέσω του οποίου εφαρμόζεται η δύναμη.

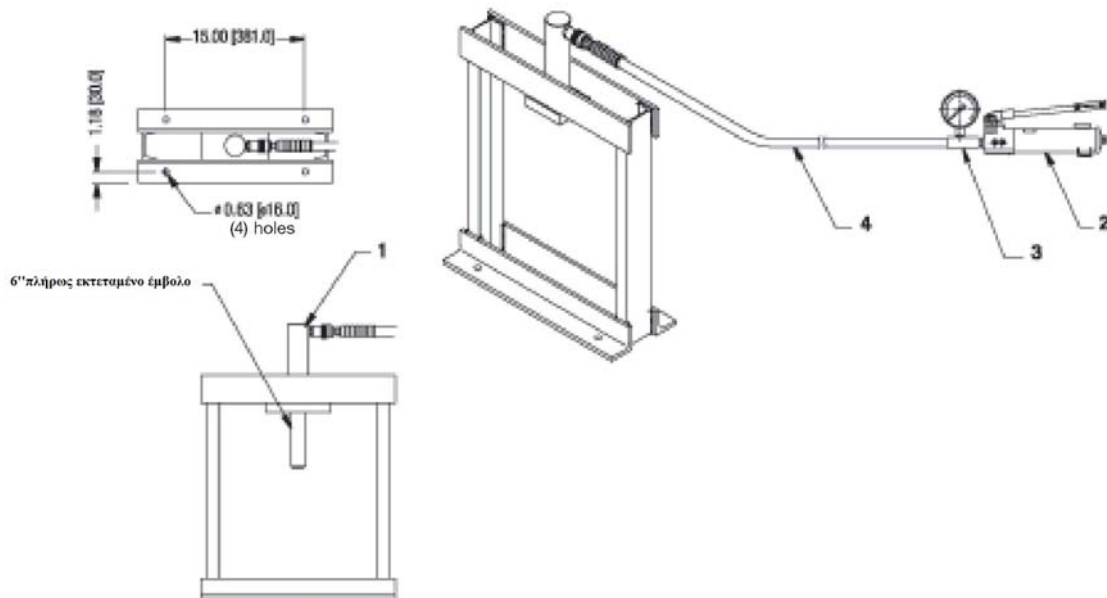
Προκειμένου να καταστεί χρηστική για την φόρτιση δειγμάτων μικρών διαστάσεων, η βάση στήριξης ανυψώθηκε και σταθεροποιήθηκε ώστε η μέγιστη διαδρομή του εμβόλου να επαρκεί για την εφαρμογή της επιθυμητής πίεσης σε δείγματα όπου το μέγιστο ύψος δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα 10cm.

Πίνακας 2.1. Τεχνικές προδιαγραφές της αντλίας P-202

Τύπος αντλίας	Χωρητικότητα λαδιού(cm ³)	Διαδρομή εμβόλου	Βαθμός πίεσης (bar)		Μετατόπιση λαδιού ανά διαδρομή (cm ³)		Μέγιστη προσπάθεια ανά λαβή (kg)
			1 ^ο στάδιο	2 ^ο στάδιο	1 ^ο στάδιο	2 ^ο στάδιο	
2 ταχυτήτων	901	12,7mm	13	700	3,62	0,90	28,6



Σχήμα 2.1. Μηχανοκίνητη υδραυλική πρέσα σειράς VLP του οίκου Enerpac.



Σχήμα 2.2. Επιμέρους λεπτομέρειες της χειροκίνητης πρέσας



Ελαφριά και συμπαγούς σχεδίασης.
 Βάση από αλουμίνιο για μέγιστη αντοχή στη διάβρωση.
 Η ταχύτητα λειτουργίας ελαττώνει τα κτυπήματα λαβής κατά 78% σε σχέση με άλλες αντλίες.
 Μικρή προσπάθεια του χειριστή.
 Κλείδωμα λαβής για ελαφριά και εύκολη μεταφορά
 Μεγάλες χωρητικότητες ελαίου για τροφοδότηση ευρέως φάσματος κυλίνδρων και εργαλείων.
 Μη αγωγήμη λαβή από fiberglass για την ασφάλεια του χειριστή.
 Εσωτερική βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης για προστασία από υπερφόρτωση.

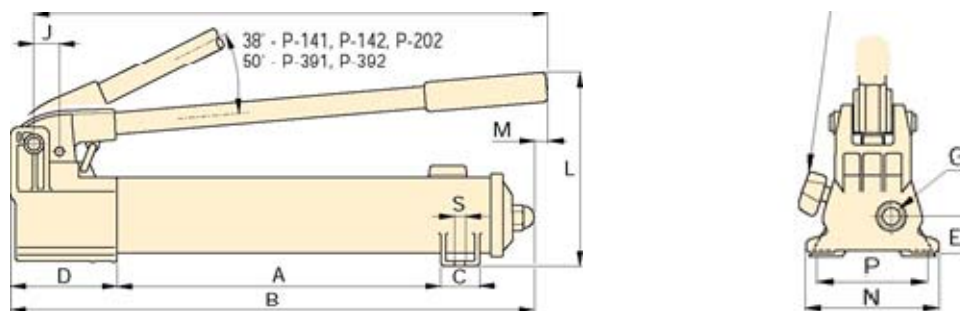


Ο εύκαμπτος σωλήνας Enerpac προσφέρει μια πλήρη γραμμή υψηλής ποιότητας υδραυλικής μεταφοράς



Αναλογικός μετρητής που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο της υπερφόρτωσης και εξασφαλίζει μεγάλη αξιοπιστία κατά τη χρήση

Σχήμα 2.3. Χαρακτηριστικά λειτουργίας της χειροκίνητης αντλίας P-202.



Διαστάσεις (mm)	A	B	C	D	E	G	H	J	L	M	N	P	Q	S
	344	509	36	85	28	¼"-18	400	19	144	16	95	-	-	-
Βάρος	3,4kg													

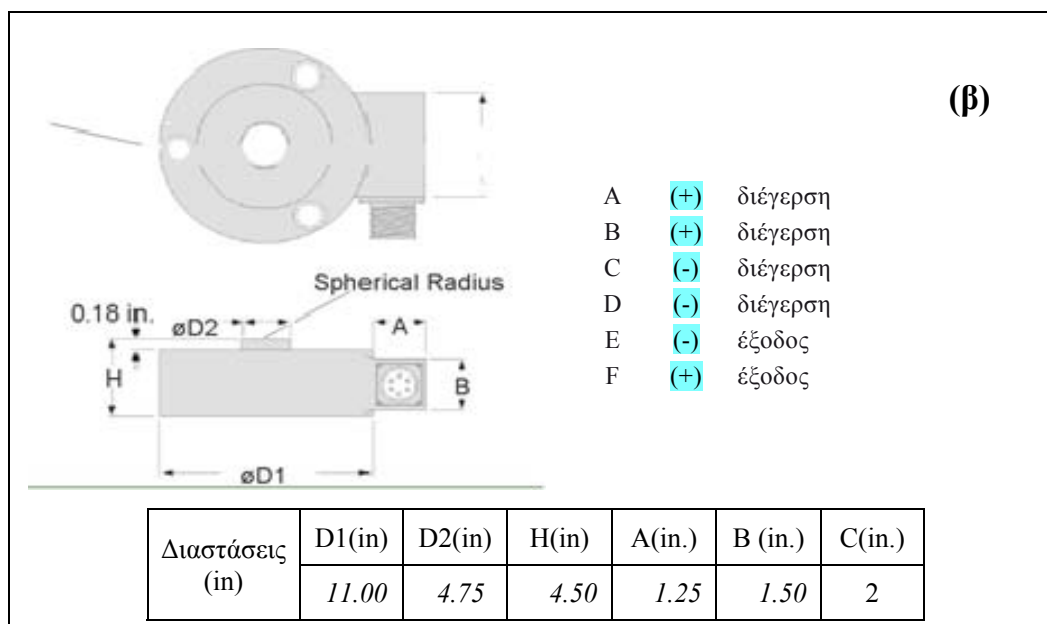
Σχήμα 2.4. Σχηματικό διάγραμμα της αντλίας

2.2 Χρησιμοποιούμενη κυψέλη φόρτισης

Η κυψέλη φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη είναι του οίκου Sensotec (μοντέλο 43) και πρόκειται για μία χαμηλού προφίλ κυψέλη φόρτισης από ανοξείδωτο χάλυβα, κατασκευασμένη μόνον για φορτία συμπίεσης, μεγάλης ακρίβειας (0.1%) και εύρος μετρούμενων τιμών 5 – 500 000lb. Στους πίνακες και τα σχήματα που ακολουθούν παρατίθενται οι τεχνικές προδιαγραφές και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της εν λόγω κυψέλης φόρτισης.

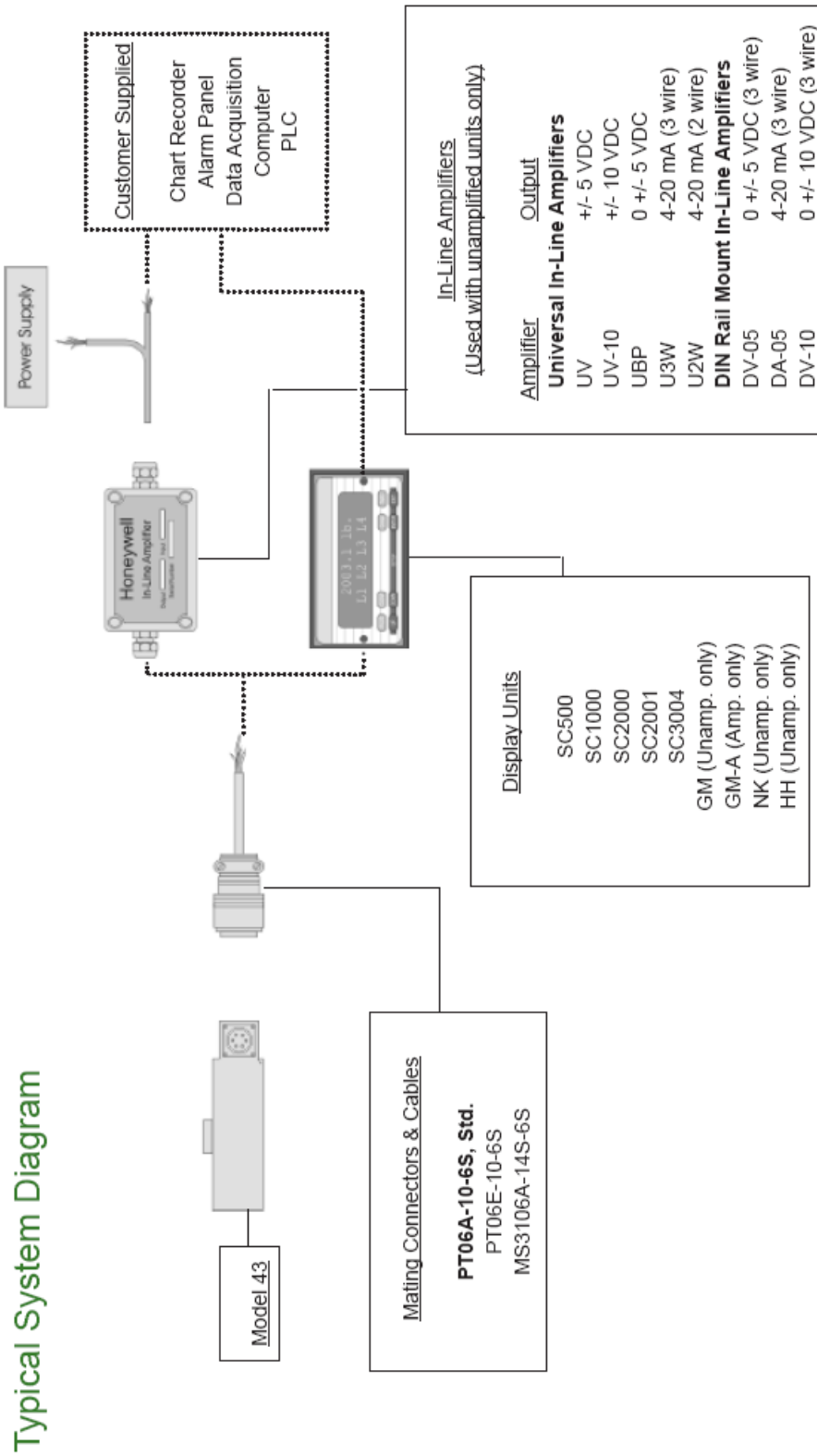


(α)



(β)

Σχήμα 2.5. (α) η κυψέλη φόρτισης και (β) σχηματικό διάγραμμα με διαστάσεις και συνδεσμολογία του ακροδέκτη.



Σχήμα 2.6. Σχηματική αναπαράσταση τοπικής συνδεσμολογίας της χρησιμοποιούμενης κοπέλης φόρτισης

Πίνακας 2.1. Προδιαγραφές λειτουργίας της κυψέλης φόρτισης Sensotec 43.

		Model 41 (Tension/Compression) Order Code AL111	Model 43 (Compression only) Order code AL112
PERFORMANCE	Load Ranges.....	5 to 500,000 lb.	5 to 500,000 lb.
	Non-Linearity (max)		
	5 to 25 lb.....	±0.2% F.S.	±0.2% F.S.
	50 to 500,000 lb.....	±0.1% F.S.	±0.1% F.S.
	Hysteresis (max)		
	5 to 25 lb.....	±0.1% F.S.	±0.1% F.S.
	50 to 500,000 lb.....	±0.08% F.S.	±0.08% F.S.
	Non-Repeatability (max)		
	5 to 25 lb.....	±0.1% F.S.	±0.1% F.S.
	50 to 500,000 lb.....	±0.03% F.S.	±0.03% F.S.
Output (standard)			
5 to 25 lb.....	2mV/V	2mV/V	
50 to 500,000 lb.....	3mV/V	3mV/V	
Resolution	Infinite	Infinite	
ENVIRONMENTAL	Temperature, Operating.....	-65° F to 250° F	-65° F to 250° F
	Temperature, Compensated.....	60° F to 160° F	60° F to 160° F
	Temperature Effect		
	- Zero (max)	0.002% F.S./° F	0.002% F.S./° F
- Span (max)	0.002% Rdg./° F	0.002% Rdg./° F	
ELECTRICAL	Strain Gage Type.....	Bonded foil	Bonded foil
	Excitation (calibration).....	10VDC	10VDC
	Excitation (acceptable).....	Up to 15VDC or AC	Up to 15VDC or AC
	Insulation Resistance.....	5000 megohms @ 50VDC	5000 megohms @ 50VDC
	Bridge Resistance.....	350 ohms	350 ohms
	Shunt Calibration Data.....	Included	Included
	Wiring Code (std).....	#2 (See P. AP-8)	#2 (See Pg. AP-8)
	Electrical Termination (std)		
	5 to 5,000 lbs	PTIH-10-6P or equiv. (Hermetic stainless)	PTIH-10-6P or equiv. (Hermetic stainless)
	7,500 to 500,000 lbs	MS3102E-14S-6P or equiv.	MS3102E-14S-6P or equiv.
Mating Connector (not incl.)			
5 to 5,000 lbs	PT06A-10-6S or equiv.	PT06A-10-6S or equiv.	
7,500 to 500,000 lbs	MS3106A-14S-6S or equiv.	MS3106A-14S-6S or equiv.	
MECHANICAL	Static Overload Capacity	50% over capacity	50% over capacity
	Thread Size.....	See "T" Dimension Info	N/A
	Maximum Extraneous Forces without damage.....	See table below	See table below
	Deflection-Full Scale.....	0.003"	0.003"
	Casing Material		
5 to 200,000 lbs	17-4PH Stainless	17-4PH Stainless	
300,000 to 500,000 lbs	4340 Painted	17-4PH Stainless	
INTERNALLY AMPLIFIED UNITS* (Optional)	Outputs Available.....	±5VDC, 4-20mA	0-5VDC, 4-20mA

NOTES: *Standard calibration for tension/compression load cells is in tension only. Internal amplifiers are available for all ranges. Internal amplification for ranges <5,000 lb. ("H" dimension <1.80") may increase height. Using an in-line amplifier will avoid this height increase.

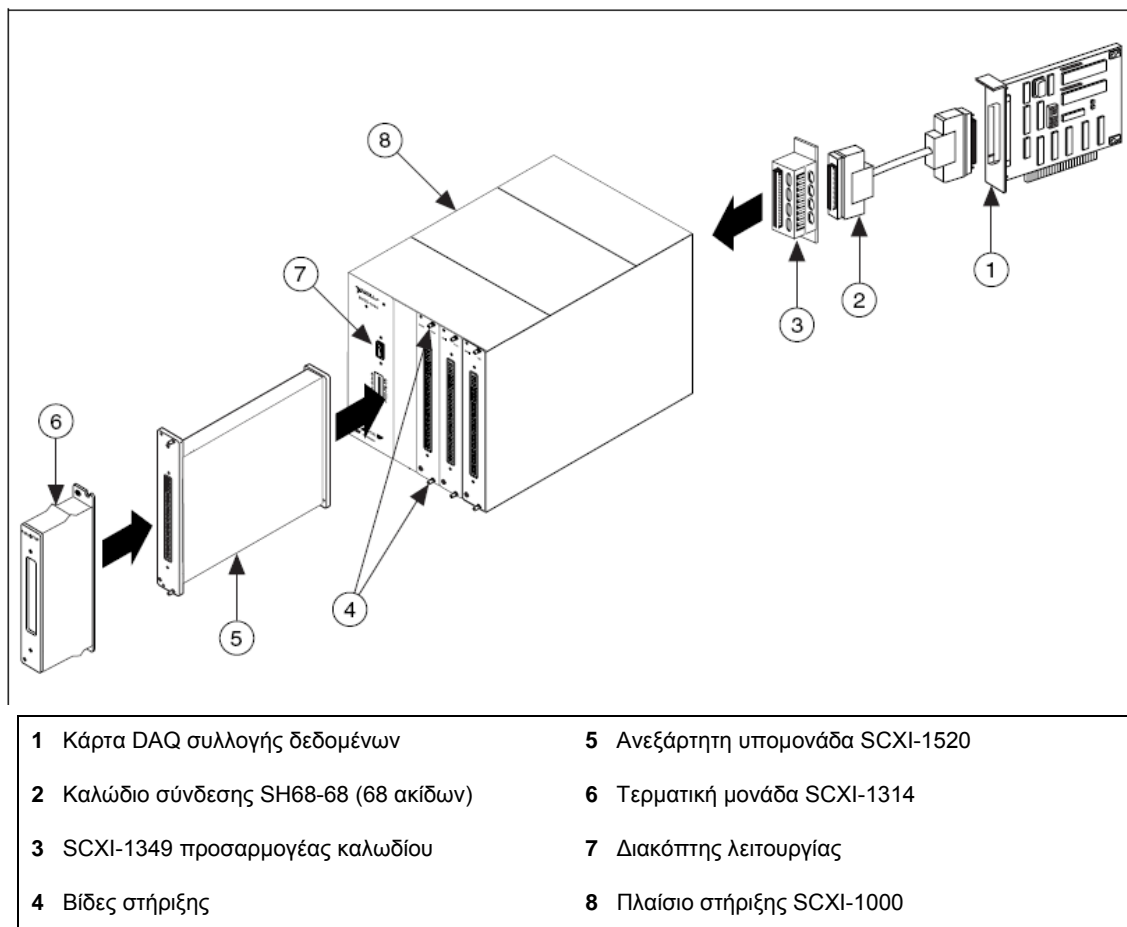
ALLOWABLE EXTRANEIOUS FORCE WITHOUT DAMAGE (% of load capacity)

Ranges	Side Load (lb.)	Bending (in-lb)	Torque (in-lb)	Total Extraneous Force
5; 10; 25; 50; 100; 250; 500 lb.	50%	40%	25%	100%
1000; 2000; 3000; 4000; 5000 lb.	30%	25%	25%	100%
10,000; 15,000; 20,000; 30,000; 50,000 lb.	20%	20%	15%	100%
100,000; 150,000; 200,000; 300,000; 400,000; 500,000 lb.	20%	20%	10%	100%

2.3 Συσσκευή διασύνδεσης αισθητηρίων, SCXI-1520 και 1314 terminal block

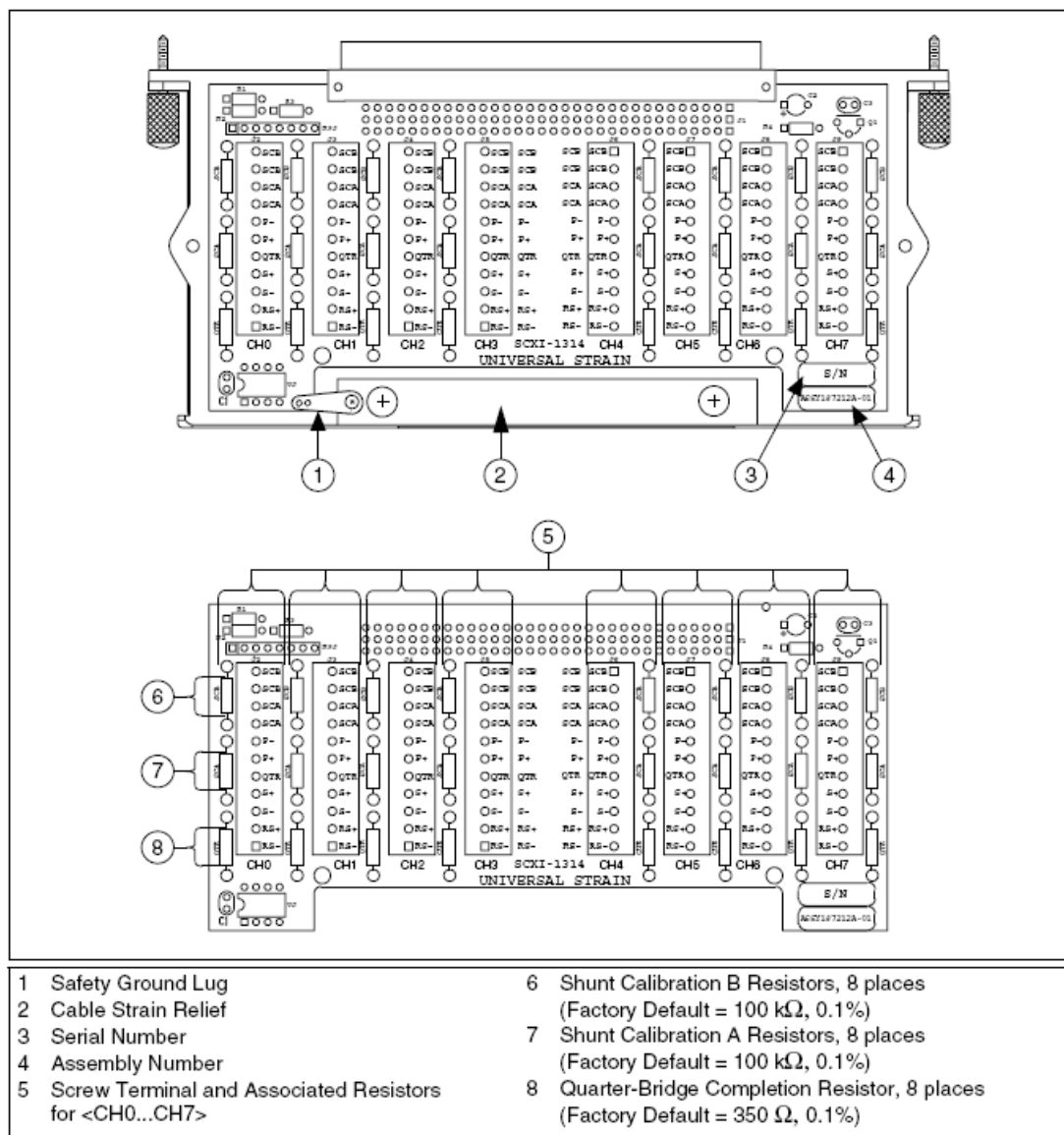
Για τη λήψη μετρήσεων της πίεσης από την κυψέλη φόρτισης και των μηχανικών παραμορφώσεων από τους μετρητές strain gauges, υλοποιήθηκε η διασύνδεση των αισθητηρίων μέσω της μονάδας SCXI-1520 και της τερματικής μονάδας SCXI-1314 που βρίσκονται συνδεδεμένες πάνω στην κεντρική μονάδα SCXI-1000 που επικοινωνεί με την κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) του H/Y (Σχήμα 2.7, 2.8).

Η μονάδα SCXI-1520 του οίκου National Instruments είναι μία μονάδα εισόδου 8-καναλιών μετρητών μηχανικής τάσης που προσφέρει όλα τα χαρακτηριστικά που χρειαζόμαστε για τη χρήση αισθητηρίων που βασίζονται σε μετρητές μηχανικής παραμόρφωσης. Με την ενιαία αυτή μονάδα μπορούμε να διαβάσουμε σήματα από μετρητές πίεσης, παραμόρφωσης, δύναμης, ροπής, κ.ά. και γενικότερα το αναλογικό σήμα στην έξοδο οποιουδήποτε αισθητήρα. Το SCXI NI-1520 περιλαμβάνει ένα ενσωματωμένο σύστημα αναφοράς για την αυτόματη βαθμονόμηση σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα.



Σχήμα 2.7. Το ολοκληρωμένο σύστημα SCXI που συνδέεται στον H/Y μέσω της κάρτας DAQ. Στην τερματική μονάδα 1314 συνδέονται οι αισθητήρες που θα χρησιμοποιήσουμε.

Για ακριβείς μετρήσεις μηχανικής παραμόρφωσης η μονάδα SCXI-1520 προσφέρει ένα προγραμματιζόμενο ενισχυτή και προγραμματιζόμενο τετραπολικό φίλτρο Butterworth σε κάθε κανάλι. Κάθε κανάλι έχει επίσης μια ανεξάρτητη προγραμματιζόμενη πηγή διέγερσης από 0 έως 10 V για την τροφοδοσία των συνδεδεμένων αισθητηρίων. Επιπλέον, το σύστημα SCXI-1520 περιλαμβάνει κυκλώματα γέφυρας ½ και μια αντίσταση 350Ω για κύκλωμα γέφυρας ¼ πάνω στην τερματική μονάδα SCXI-1314. Το SCXI-1520 διαθέτει ένα αυτόματο κύκλωμα αντιστάθμισης και δύο κυκλώματα βαθμονόμησης ανά κανάλι. Μπορεί επίσης να πολυπλέξει τα σήματα εισόδου των αισθητήρων του και να τα διοχετεύσει σε ένα ενιαίο κανάλι προς την συσκευή ελέγχου και επεξεργασίας των δεδομένων. Τα ακριβή χαρακτηριστικά λειτουργίας (ενίσχυση σήματος, φίλτρα, κλπ) παρατίθενται αναλυτικά στον Πίνακα 2.1 και το μπλοκ διάγραμμα της διάταξης δίνεται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.8. Σχηματική Εσωτερική κάτοψη της πλακέτας της υπομονάδας SCXI-1314 των 8 καναλιών.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά λειτουργίας της μονάδας SCXI-1520**Analog Input Characteristics**

Number of channels.....	8
Voltage gain settings.....	X1 to X1000 with the following gain settings: 1; 1.15; 1.3; 1.5; 1.8; 2; 2.2; 2.4; 2.7; 3.1; 3.6; 4.2; 5.6; 6.5; 7.5; 8.7; 10; 11.5; 13; 15; 18; 20; 22; 24; 27; 31; 36; 42; 56; 65; 75; 87; 100; 115; 130; 150; 180; 200; 220; 240; 270; 310; 360; 420; 560; 650; 750; 870; 1,000

Input signal ranges	See Complete Accuracy table
Input coupling	DC
Maximum working voltage	Either input should remain within ± 10 V of ground. Both inputs should be within ± 10 V of one another.
Oversvoltage protection	± 35 V powered on, ± 25 V powered off
Inputs protected.....	<0...7>

Transfer Characteristics

Nonlinearity.....	Better than 0.02%
Gain error	$\pm 35\%$ of setting, $+0.1\%$ of EEPROM value
Offset error	
Gain>20.....	150 μ V maximum
Gain<20.....	3 mV maximum

Filter Characteristics

Lowpass filter type	4-pole Butterworth (24 dB octave rolloff)
Lowpass filter settings	10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, or bypass
Bandwidth, filter bypassed.....	-3 dB at 20 kHz

Track and Hold Characteristics

Hold mode settle time	1 μ s typical
Interchannel skew.....	± 200 ns typical
Intermodule skew	± 250 ns typical
Droop rate	30 mV/s typical, 100 mV/s maximum

Analog Input Stability

Recommended warm-up time.....	15 minutes
Gain drift	± 40 ppm/ $^{\circ}$ C maximum
Offset drift	
Gain ≥ 20	± 2 μ V/ $^{\circ}$ C typical, ± 5 μ V/ $^{\circ}$ C maximum
Gain<20.....	± 10 μ V/ $^{\circ}$ C typical, ± 25 μ V/ $^{\circ}$ C maximum

Null Compensation Characteristics

Range	$\pm 4\%$ of excitation voltage, 20,000 counts of resolution ($\pm 80,000$ μ e, 4 μ e resolution for quarter-bridge, GF = 2.0)
-------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Excitation Characteristics

Type	Constant voltage
Settings	0.0 to 10.0 V in 0.625 V increments
Error	± 20 mV + 3% absolute $\pm 0.1\%$ of EEPROM setting
Short circuit current limit.....	50 mA minimum
Regulation, no load to 120 Ω load	
With remote sense.....	$\pm 0.003\%$
Without remote sense.....	$\pm 0.08\%$
Temperature Drift.....	$\pm 0.005\%/^{\circ}$ C ± 30 μ V/ $^{\circ}$ C maximum
Noise	DC to 10 kHz: 200 μ V
Remote sense	Error less than $\pm 0.02\%$ / Ω of lead resistance, both leads
Protection	Surge arrestors in parallel with excitation terminals, shunt to ground

Amplifier Characteristics

Input impedance (DC).....	>1 G
Input bias current.....	± 20 nA maximum
Input offset current	± 20 nA maximum
Output range	± 10 V
Output impedance	
Parallel	200
Mux	91

NMR (Normal-Mode Rejection Ratio)

Filter	NMR at 60 Hz
10 Hz	-62 dB typical

CMRR (Common-Mode Rejection Ratio)

Gain	CMRR DC to 60 Hz
<20	60 dB
≥ 20	85 dB

Dynamic Characteristics

Multiplexer performance

Module	Scan Interval (Per Channel, Any Gain and Multiplexed Mode)		
	Settle to $\pm 0.0125\%$	Settle to $\pm 0.006\%$	Settle to $\pm 0.0019\%$
SCXI-1520	3 μ s	10 μ s	20 μ s

System noise.....	Complete Accuracy table
Noise RTI, gain=200, 0.1 to 10 Hz.....	2.0 μ V _{pp}
Spot noise RTI, gain=200, 1000 Hz.....	16 nV/ \sqrt{f} Hz

Bridge Completion¹

Half-bridge	5 k Ω precision resistor network internal to module
Quarter-bridge	Resistor in SCXI-1314 accessory terminal block

Shunt Calibration²

Type	2 independent points
Resistor	In terminal block
Switch resistance	32 Ω
Switch off leakage.....	<1 nA
Switch breakdown voltage	± 60 VDC

Physical

Dimensions.....	3.0 by 17.2 by 20.3 cm (1.2 by 6.9 by 8.0 in.)
-----------------	------------------------------------------------

Environment

Operating temperature	0 to 50 $^{\circ}$ C
Storage temperature.....	-20 to 70 $^{\circ}$ C
Relative humidity	10 to 90% noncondensing

Certifications and Compliances**European Compliance**

EMC	EN 61326 Group I Class A, 10 m, Table 1 Immunity
Safety	EN 61010-1

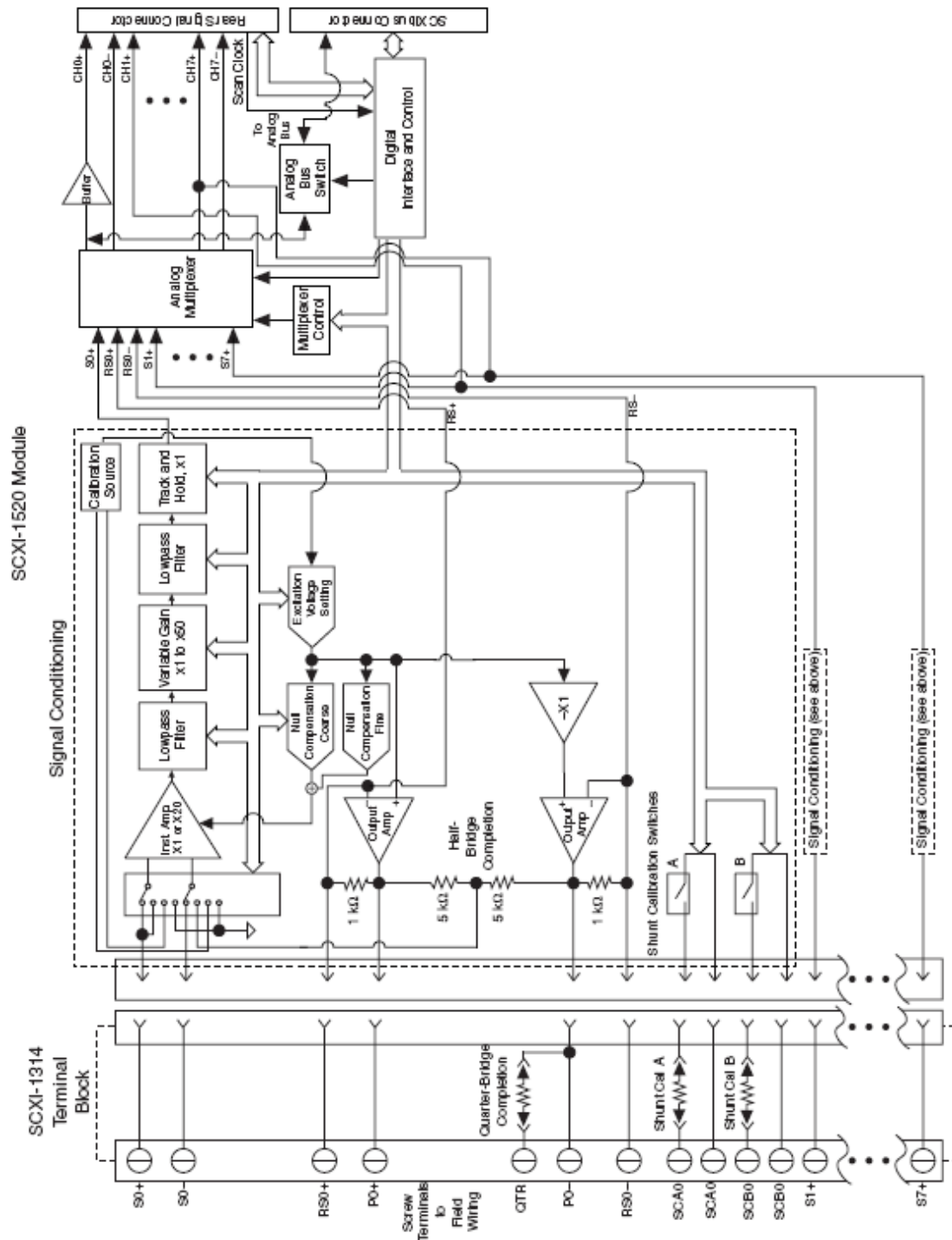
North American Compliance

EMC	FCC Part 15 Class A using CISPR
-----------	---------------------------------

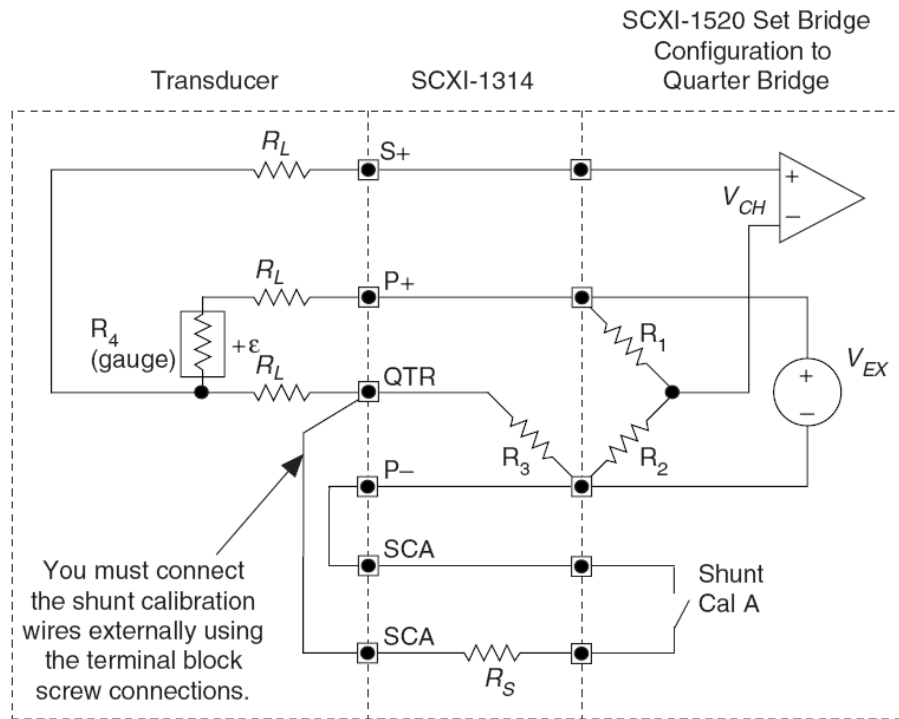
Australia and New Zealand Compliance

EMC	AS/NZS 2064.1/2 (CISPR-11)
-----------	----------------------------

¹Half-bridge completion is inside the module and configured under software control. Quarter-bridge completion resistor is in SCXI-1314 terminal block and socketed. Resistors shipped with SCXI-1314 are 120 Ω and 390 Ω RN-55 style (0.25 W). Tolerance is $\pm 0.1\%$. Temperature coefficient is ± 10 ppm/ $^{\circ}$ C max. ²Shunt calibration resistors are in SCXI-1314 terminal block and socketed. Resistors shipped with SCXI-1314 are 100 k Ω RN-55 style (0.25 W). Tolerance is $\pm 0.1\%$. Temperature coefficient is ± 10 ppm/ $^{\circ}$ C max. For a definition of specific terms, visit ni.com/glossary.



Σχήμα 2.9. Μπλοκ διάγραμμα των μονάδων SCXI-1520 και SCXI-1314.



Signal Name	Περιγραφή
P+	Θετικό σήμα διέγερσης
P-	Αρνητικό σήμα διέγερσης
S+	Θετικό σήμα εισόδου
S-	Αρνητικό σήμα εισόδου
QTR	Αντίσταση σύνδεσης ολοκλ. Πλήρους γέφυρας
RS+	Θετικό σήμα απομακρυσμένου αισθητηρίου
RS-	Αρνητικό σήμα απομακρυσμένου αισθητηρίου
SCA (2 terminals)	Σήμα A παράλληλης βαθμονόμησης
SCB (2 terminals)	Σήμα B παράλληλης βαθμονόμησης

Σχήμα 2.10. Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης των μετρητών strain gauges στους ακροδέκτες της τερματικής μονάδας SCXI-1314.

2.4 Συμπληρωματικός εξοπλισμός διαμόρφωσης δοκιμίων

2.4.1 Τρυπάνι εξαγωγής κυλινδρικών δοκιμίων (Diamond Core Drill)

Για την κατάλληλη διαμόρφωση των δειγμάτων που θα υποστούν μηχανική φόρτιση στην υδραυλική μονοαξονική πρέσα, χρησιμοποιήθηκε ένα τρυπάνι στο οποίο μπορούν να προσαρμοστούν διαφορετικές κεφαλές για την εξαγωγή κυλινδρικών καρότων από όγκους διαφόρων πετρωμάτων. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 2.2.

Το εν λόγω τρυπάνι δύναται να χρησιμοποιηθεί για διάτρηση σε σκυρόδεμα με χρήση νερού ή για διάτρηση σε τούβλα χωρίς χρήση νερού. Διαθέτει σύστημα ομαλής εκκίνησης, θερμικό κύκλωμα προστασίας, διακόπτη δύο ταχυτήτων (αργή - γρήγορη), ρυθμιστή στροφών, δυνατότητα επιλογής λειτουργίας κρούσης, σταθεροποίηση της ταχύτητας ανεξάρτητα από το φορτίο, δυνατότητα διάτρησης υπό γωνία 45°.



Σχήμα 2.11. Το τρυπάνι που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή κυλινδρικών δοκιμίων από διάφορα πετρώματα.

2.4.2 Δισκοπρίονο κοπής και διαμόρφωσης δοκιμίων

Τα πετρώματα αφού συλλεχθούν και μεταφερθούν στο εργαστήριο αρχίζει η επεξεργασία τους. Πρώτα διαμορφώνονται σε σχήμα κυλίνδρου με την καροτιέρα και έπειτα κόβονται σε συγκεκριμένες διαστάσεις με το δισκοπρίονο (Σχήμα 2.12). Το επιδαπέδιο δισκοπρίονο που χρησιμοποιήθηκε πραγματοποιεί την κοπή με ροή νερού από δεξαμενή που

διαθέτει με χρήση κλειστού κυκλώματος μέσω αντλίας νερού. Στον ίδιο χώρο συλλέγονται τα απόβλητα της κοπής. Οριζόντια ενσωματωμένη τράπεζα μας παρέχει τη δυνατότητα προσαρμογής του δοκιμίου και ρύθμισης του μήκους κοπής.

Πίνακας 2.2. Τεχνικές προδιαγραφές του διαμαντοτρύπανου

ΤΥΠΟΣ	DCD-120
ΙΣΧΥΣ (Watt)	1100
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΙΑΜΑΝΤΟΚΟΡΩΝΑΣ (mm)	27-120
ΔΙΑΔΡΟΜΗ (mm)	350
ΤΑΧΥΤΗΤΑ (R.P.M)	1000
ΒΑΡΟΣ (Kg)	7,8
ΣΠΕΙΡΩΜΑ ΑΞΟΝΑ (A)	1"1/4 UNC



Σχήμα 2.12. Το δισκοπρίονο που χρησιμοποιήθηκε για την κοπή των δοκιμίων σε καθορισμένο μήκος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Διασύνδεση των συσκευών μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος LabVIEW

3.1 Το προγραμματιστικό περιβάλλον LabVIEW

Το LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) είναι μία πανίσχυρη γλώσσα προγραμματισμού χρήσης οργάνων και ανάλυσης για υπολογιστές. Μπορεί να τρέξει σε διαφορετικά λειτουργικά συστήματα (Windows, Solaris, Macintosh, κλπ) και ξεφεύγοντας από την παραδοσιακή φύση των γλωσσών προγραμματισμού, εισάγει τον χρήστη σε ένα γραφικό περιβάλλον χρήσης οργάνων με μεγάλη ποικιλία εργαλείων για συλλογή μετρήσεων, έλεγχο αυτόνομων οργάνων, ανάλυση και παρουσίαση αποτελεσμάτων. Σε αυτή τη γραφική γλώσσα προγραμματισμού που λέγεται “G”, μπορούμε να φτιάξουμε το πρόγραμμά μας σε διαγραμματικά μπλοκ, κάτι πολύ φυσικό για μηχανικούς και επιστήμονες. Αφού φτιάξουμε τα διαγράμματά μας, το LabVIEW τα μεταφράζει σε κώδικα μηχανής. Το LabVIEW αποτελεί ένα ενιαίο σύστημα συλλογής μετρήσεων, ανάλυσης, ελέγχου και παρουσίασης. Για την συλλογή μετρήσεων και έλεγχο οργάνων, το LabVIEW υποστηρίζει διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως RS-232/422/485, IEEE488(GPIB), VISA, VXI, καθώς επίσης και κάρτες δειγματοληψίας. Μία ολοκληρωμένη βιβλιοθήκη από drivers για όργανα, διευκολύνει τον έλεγχο αυτόνομων οργάνων. Για την ανάλυση δεδομένων, υπάρχουν ρουτίνες Επεξεργασίας Σήματος, Φίλτρων, Στατιστικής, Παρεμβολής, Γραμμικής Άλγεβρας κ.ο.κ. Τέλος, όντας γραφικό στην φύση του, το LabVIEW παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σαν σύστημα παρουσίασης αποτελεσμάτων.

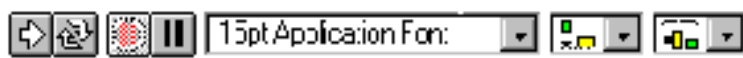
3.1.1 Σύντομη περιγραφή βασικών λειτουργιών του LabVIEW




Καλούμε Εικονόργανο (Virtual Instrument ή πιο απλά VI) οποιοδήποτε πρόγραμμα έχει γραφτεί στην γλώσσα LabVIEW. Κάθε VI αποτελείται από τρία διαφορετικά τμήματα, το παράθυρο των γραφικών ή αλλιώς Front Panel, το παράθυρο του διαγράμματος ή Block Diagram, και το παράθυρο του Κοννέκτορα και της Εικόνας αλλιώς γνωστό ως Icon/Connector. Το Front Panel, αποτελεί το τμήμα εκείνο όπου ο χρήστης βλέπει τις εισόδους και εξόδους του προγράμματός του. Μπορούμε να το παρομοιάσουμε με το Panel ενός πραγματικού οργάνου, όπου έχουμε στην διάθεσή μας κουμπιά, διακόπτες, γράφους και άλλες ενδείξεις που μας επιτρέπουν να προγραμματίζουμε το όργανο. Τα ίδια ακριβώς αντικείμενα, παρέχονται και στο Front Panel του LabVIEW και τα διαχωρίζουμε σε Controls και Indicators. Χρησιμοποιούμε αυτά τα αντικείμενα για να κάνουμε το Panel όσο το δυνατόν πιο κατανοητό, εύχρηστο και φιλικό στον χρήστη.

Κάθε front panel συνοδεύεται και από ένα Μπλόκ Διάγραμμα (block diagram) το οποίο είναι το πραγματικό πρόγραμμα του VI. Κατασκευάζουμε το διάγραμμα με την βοήθεια της γραφικής γλώσσας προγραμματισμού G. Μπορούμε να παρομοιάσουμε το διάγραμμα σαν το κώδικα μιας οποιασδήποτε γλώσσας προγραμματισμού. Τα διάφορα μέρη του διαγράμματος αποτελούν κόμβους του προγράμματος, όπως For Loops ή αριθμητικές ρουτίνες. Συνδέουμε τα μέρη αυτά μεταξύ τους προσδιορίζοντας έτσι την ροή των δεδομένων μέσα στο πρόγραμμα.




Χρησιμοποιούμε την Εικόνα / Κοννέκτορα ώστε να μπορέσουμε να μετατρέψουμε τον VI σε μία υπορουτίνα, έναν υπό-VI τον οποίο μπορούμε έτσι να καλέσουμε στο διάγραμμα οποιοδήποτε άλλου προγράμματος. Η εικόνα αναπαριστά γραφικά τον υπό-VI στο μπλοκ διάγραμμα άλλων VIs, ενώ οι ακροδέκτες του Κοννέκτορα προσδιορίζουν πού πρέπει να συνδέσουμε τις εισόδους και εξόδους της εικόνας. Μπορούμε να αντιληφθούμε τους ακροδέκτες ως τις παραμέτρους λειτουργίας του υπό-VI, τις οποίες θα πρέπει να προσδιορίσει ο χρήστης όταν καλεί τον υπό-VI από κάποιο άλλο πρόγραμμα. Οι ακροδέκτες αντιστοιχούν στους Controls και Indicators του Front Panel του VI. Ο Κοννέκτορας είναι συνήθως κρυμμένος κάτω από την εικόνα.


Το Front Panel αλλά και το μπλόκ διάγραμμα διαθέτουν εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούμε για να ελέγχουμε την λειτουργία των VIs. Τα παρακάτω εργαλεία βλέπουμε στην κορυφή του παράθυρου του Front Panel.




-  Το κουμπί Run το πατάμε για να τρέξουμε το VI. Όταν ο VI τρέχει το κουμπί αλλάζει σε
-  εάν ο VI είναι ο κύριος VI(top-level) ή
-  εάν πρόκειται για έναν υπό-VI ο οποίος καλείται από κάποιο VI σε ανώτερο επίπεδο.

Όταν ο VI εκτελείται, εμφανίζεται το κουμπί Stop.  Πατώντας το, σταματάμε το τρέξιμο του προγράμματος αμέσως.

-  Το κουμπί σπασμένης λειτουργίας (Broken-Run). Αντικαθιστά το κουμπί Run και υποδηλώνει ότι ο VI δεν μπορεί να τρέξει λόγω σφαλμάτων στο διάγραμμα.
- Πατώντας το κουμπί, βλέπουμε ποιά ακριβώς είναι τα σφάλματα.
-  Το κουμπί Συνεχούς Λειτουργίας (Continuous Run). Πατώντας το, ο VI εκτελείται συνεχώς.
-  Το κουμπί Προσωρινής Διακοπής (Pause). Πατώντας το ξανά, επαναφέρουμε τον VI στην κανονική του λειτουργία.






 Η επιλογή φόντου. Εδώ, διαλέγουμε τον τύπο, μέγεθος, στυλ, χρώμα.

 Η επιλογή Ευθυγράμμισης. Μπορούμε εδώ, να επιλέξουμε την μέθοδο ισοστοίχισης αντικειμένων : Κάθεται, Οριζόντια, Αριστερή Άκρη κ.ο.κ.

 Επιλογή Ισοστοίχισης Αντικειμένων.

Τα επιπλέον εργαλεία που βρίσκει κανείς στο μπλοκ διάγραμμα είναι τα ακόλουθα



-  Το κουμπί Αργής Κίνησης (Execution Highlighting). Πατώντας το, παρακολουθούμε την ροή των δεδομένων μεταξύ των κόμβων σε αργή κίνηση, και μπορούμε εύκολα να διαγνώσουμε λάθη στον προγραμματισμό του διαγράμματος.
-  Το κουμπί - Single Step/Step Over. Πατώντας το, τρέχουμε το πρόγραμμα από κόμβο σε κόμβο. Φτάνοντας σε έναν κόμβο, μπορούμε να αποφύγουμε να τον τρέξουμε, για να γλυτώσουμε χρόνο με το κουμπί Step Over, όπως για παράδειγμα σε ένα Loop 1000 κύκλων.
-  Το κουμπί Step Into, αντίθετα με το Step Over μας επιτρέπει να εισχωρήσουμε στον κόμβο και να παρακολουθήσουμε την λειτουργία του.
-  Το κουμπί Step Out μας επιτρέπει έχοντας εισχωρήσει μέσα στον κόμβο με το Step Into να εξέλθουμε.
-  Η Ένδειξη Προειδοποίησης (Warning Indicator). Παρουσιάζεται όταν υπάρχει πιθανό πρόβλημα στο διάγραμμα, αλλά παρόλα αυτά ο VI μπορεί να τρέξει.

Σχεδόν όλα τα αντικείμενα που χρησιμοποιούμε για την κατασκευή ενός VI έχουν Pop-Up Μενού. Τα μενού εμφανίζονται όταν ο κέρσορας βρίσκεται πάνω από το αντίστοιχο αντικείμενο ή παράθυρο και πατήσουμε το δεξί ποντίκι.

Η μπάρα στην κορυφή της οθόνης του LabVIEW περιέχει τα ακόλουθα Pull-Down μενού:

Μενού Αρχείων(File Menu)

Χρησιμοποιούμε τις επιλογές σε αυτό το μενού κυρίως για να αποθηκεύσουμε, ανοίξουμε, κλείσουμε, εκτυπώσουμε VIs. Άλλες χρήσιμες επιλογές είναι οι εξής :

Edit VI Library : Μπορούμε να προσθέσουμε ή αφαιρέσουμε VIs από μία βιβλιοθήκη.

Mass Compile : Κάνει Compile όλα τα VIs μιας βιβλιοθήκης.

Convert CVI FP : Μετατρέπει υπάρχουσες CVI DLLs σε LabVIEW VIs.

Μενού Αλλαγών(Edit Menu)

Remove Bad Wires : Σβήνει άχρηστες ή ελαττωματικές συνδέσεις

Preferences : Επιλογές για μνήμη, γραφικά, κ.ά.

Set User Name : Επιλογή Ονόματος Χρήστη σε Περιβάλλον πολλών Χρηστών

Edit Control and Function Palettes : Επιλογή των επιθυμητών παλετών ανάλογα με την εφαρμογή.

Μενού Λειτουργίας(Operate Menu)

Data Logging : Επιλογές για καταγραφή των δεδομένων

Make Current Values Default : Θέτει τις τωρινές τιμές ως αρχικές τιμές λειτουργίας στο μέλλον

Μενού Εφαρμογών

DAQ Channel Wizard : Το πρόγραμμα αυτό μας βοηθά να προσδιορίσουμε τα χαρακτηριστικά των καναλιών συλλογής μετρήσεων

SubVI Hierarchy : Εδώ βλέπουμε την ιεραρχία των υπό VIs

Show Profile Window : Εδώ βλέπουμε αν το πρόγραμμα είναι βέλτιστα γραμμένο

Μενού Παραθύρων(Windows Menu)

Show VI Info. : Μας δίνει πληροφορίες για τον αντίστοιχο VI.

Show Functions / Tools Palette : Εμφανίζει τις διάφορες παλέτες

Tile Left and Right : Τα παράθυρα του Front Panel και Διαγράμματος μοιράζονται την οθόνη

Μενού Βοήθειας(Help Menu)

Simple Help : Συνοπτική Βοήθεια On-Line

Online Reference : Πλήρης Βοήθεια On-Line

Internet Links : Σύνδεση με το Web Site της National Instruments











Παλέτες

Το LabVIEW διαθέτει γραφικές παλέτες που μας βοηθούν στην σχεδίαση και λειτουργία των VIs. Οι τρεις παλέτες είναι οι εξής : Αυτή των **Tools (Εργαλείων)**, των **Controls (Αντικειμένων)**, και των **Functions (Ρουτινών)**.

Η Παλέττα των Εργαλείων(Tools)

Μπορούμε με τα εργαλεία που μας παρέχει αυτή η παλέττα να σχεδιάσουμε και να αλλάξουμε τα VIs. Αν η παλέττα δεν είναι ορατή επιλέγουμε **Show Tool Palette** από το μενού **Windows**. Με την επιλογή ενός εργαλείου ο Κέρσορας παίρνει το ανάλογο σχήμα. Ακουμπώντας οποιοδήποτε εργαλείο από την παλέττα των **Tools** πάνω από υπόVIs ή ρουτίνες στο μπλοκ διάγραμμα, βλέπουμε την βοήθεια On-Line για αυτό το αντικείμενο. Θα πρέπει πρώτα να έχουμε επιλέξει **Show Help Window** από το μενού **Windows**.



-  **Operating Tool.** Ο Δείκτης χρησιμεύει για την επιλογή θέσεων και τιμών για αντικείμενα του Front Panel.
-  **Positioning tool** (Εργαλείο Τοποθέτησης). Αυτό το εργαλείο μας βοηθά να επιλέξουμε ένα αντικείμενο, να το μετακινήσουμε, να το μεγεθύνουμε. Για την μεγένθυση ενός αντικειμένου πρέπει να τοποθετήσουμε το Εργαλείο σε μία από τις γωνίες του αντικειμένου.
-  **Labeling tool** (Εργαλείο Ονομασίας). Με αυτό το εργαλείο μπορούμε να ονομάσουμε τα διάφορα αντικείμενα ή και να τοποθετήσουμε ετικέτες από μόνες τους τόσο στον χώρο του Front Panel όσο και στο μπλόκ Διάγραμμα.
-  **Wiring tool** (Εργαλείο Σύνδεσης). Με αυτό το εργαλείο συνδέουμε τους διάφορους κόμβους μεταξύ τους στο Διάγραμμα. Τοποθετώντας το εργαλείο αυτό πάνω από οποιοδήποτε καλώδιο, βλέπουμε τον τύπο των δεδομένων που μεταφέρει το καλώδιο αυτό. Θα πρέπει πρώτα να επιλέξουμε **Show Help Window** από το μενού **Windows**.
-  **Object pop-up menu tool.** Με το εργαλείο αυτό ανοίγουμε το μενού pop-up ενός αντικειμένου πατώντας το αριστερό ποντίκι.
-  **Scrolling tool.** Κάνουμε εύκολα Scroll μεταξύ διαφόρων Παραθύρων.
-  **Breakpoint tool.** Με αυτό το εργαλείο θέτουμε Breakpoints στην λειτουργία VIs και ρουτινών.
-  **Probe tool.** Τοποθετείται πάνω σε καλώδια, και χρησιμεύει για την απεικόνιση των δεδομένων που ρέουν σε αυτά κατά την λειτουργία ενός VI.
-  **Color Copy tool.** Χρησιμεύει για την αντιγραφή χρωμάτων.
-  **Coloring tool.** Χρησιμοποιείται για τον χρωματισμό ενός αντικειμένου.

Παλέττες Αντικειμένων (Controls) και Ρουτινών (Functions)











Οι Παλέττες αυτές αποτελούνται από υπο-παλέττες, καθεμία εκ των οποίων εσωκλείει μέσα της πλήθος από προγραμματιζόμενα αντικείμενα – εικόνες που χρησιμοποιούμε στην κατασκευή ενός VI. Η πρόσβαση σε αυτά τα αντικείμενα γίνεται πατώντας την εικόνα της κάθε υπο-παλέττας. Ταυτόχρονα, αν θέλουμε να επιλέγουμε από μερικές υποπαλέττες μπορούμε να τις καρφώσουμε, ώστε να παραμείνουν στο χώρο του Front Panel ή του Διαγράμματος.

Η Παλέττα των Αντικειμένων (Controls)

Τοποθετούμε Controls και Indicators αντικείμενα στο Front Panel μέσα από αυτήν την παλέττα, η οποία διαιρείται σε συγκεκριμένες υποπαλέττες που περιέχουν καθορισμένους τύπους αντικειμένων. Εάν η παλέττα δεν είναι ορατή, επιλέγουμε **Show Controls Palette** από το μενού **Windows**. Εναλλακτικά, μπορούμε να ανοίξουμε την παλέττα των **Controls** πατώντας το δεξί ποντίκι οπουδήποτε στο χώρο του Front Panel.



Σημείωση : Η παλέττα των Controls είναι διαθέσιμη, μόνο όταν το Front Panel είναι ενεργό.















-  Η Υποπαλέττα **Numeric**. Περιέχει controls και indicators για αριθμητικά δεδομένα (ακέραιους, δεκαδικούς).
-  Η Υποπαλέττα **Boolean**. Περιέχει controls και indicators για λογικά/ψηφιακά δεδομένα.
-  Η Υποπαλέττα **String**. Περιέχει controls και indicators για κείμενο μορφής ASCII ή Binary.
-  Η Υποπαλέττα **List & Ring**. Περιέχει controls και indicators για δημιουργία μενού εναλλακτικών επιλογών.
-  Η Υποπαλέττα **Array & Cluster**. Περιέχει controls και indicators για ομαδοποίηση δεδομένων.
-  Η Υποπαλέττα **Graph**. Περιέχει indicators για γραφική απεικόνιση δεδομένων.
-  Η Υποπαλέττα **Path & Refnum**. Περιέχει controls και indicators για επεξεργασία αρχείων.
-  Η Υποπαλέττα **Decorations**. Περιέχει γραφικά για εξωρραισμό των Front Panels.
-  Η Υποπαλέττα **User Controls**. Εδώ τοποθετεί ο χρήστης τα δικά του Controls.
-  Η Υποπαλέττα **Select a Control**. Μας δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε και να φορτώσουμε άλλα Controls.

Η Παλέττα των Ρουτινών (Functions)

Κατασκευάζουμε το Μπλόκ Διάγραμμα με την βοήθεια της παλέττας των ρουτινών. Αντίστοιχα με την προηγούμενη παράγραφο και αυτή η παλέττα υποδιαιρείται σε υποπαλέττες που περικλείουν συγκεκριμένους τύπους από προγραμματιζόμενα αντικείμενα-εικόνες. Αν η παλέττα δεν είναι ορατή, επιλέγουμε **Show Functions Palette** από το μενού **Windows**. Εναλλακτικά, μπορούμε να ανοίξουμε την παλέττα των **Functions** πατώντας το δεξί ποντίκι οπουδήποτε στο χώρο του Front Panel.

Σημείωση : Η παλέττα των *Functions* είναι διαθέσιμη, μόνο όταν το Μπλόκ Διάγραμμα είναι ενεργό.



-  Υποπαλέττα **Boolean**. Περιέχει VIs για λογικές πράξεις.
-  Υποπαλέττα **String**. Περιέχει VIs για επεξεργασία κειμένου σε μορφή ASCII ή Binary.
-  Υποπαλέττα **Array**. Χρησιμοποιείται για την επεξεργασία πινάκων.
-  Υποπαλέττα **Cluster**. Περιέχει ρουτίνες για την επεξεργασία δομών από ανομοιογενή στοιχεία. Οι Δομές αυτές στο LabVIEW καλούνται Clusters.
-  Υποπαλέττα **Comparison**. Περιέχει ρουτίνες για την σύγκριση στοιχείων, τα οποία μπορεί να είναι αριθμητικά, λογικά, text.
-  Υποπαλέττα **Time & Dialog**. Χρησιμοποιείται για Διαλογικά Παράθυρα, Χρονισμό.
-  Υποπαλέττα **File I/O**. Πολύ χρήσιμη για καταχώρηση δεδομένων και επεξεργασία αρχείων.
-  Υποπαλέττα **Communication**. Περιέχει VIs για επικοινωνία με πρωτόκολα όπως TCP, OLE, DDE.
-  Υποπαλέττα **Instrument I/O**. Χρησιμοποιείται για επικοινωνία με αυτόνομα όργανα και υποστηρίζει πρωτόκολα όπως GPIB, RS-232, VISA.
-  Υποπαλέττα **Data Acquisition**. Περιέχει VIs για έλεγχο καρτών συλλογής μετρήσεων.
-  Υποπαλέττα **Analysis**. Περιέχει 600 διαφορετικούς VIs ανάλυσης δεδομένων.
-  Υποπαλέττα **Tutorial**. Περιέχει διάφορα VIs που χρησιμοποιούνται στο LabVIEW tutorial.
-  Υποπαλέττα **Advanced**. Περιέχει διάφορες ρουτίνες για προχωρημένους χρήστες.
-  Υποπαλέττα **Select a VI...**. Εμφανίζει ένα διαλογικό παράθυρο για την εύρεση και επιλογή υπό VIs.



Υποπαλέττα **Users Library**. Εδώ μπορεί ο χρήστης να τοποθετήσει τα δικά του VIs.



Υποπαλέττα **Instrument Drivers**. Εδώ τοποθετούνται συνήθως Driver VIs για επικοινωνία με όργανα.



Υποπαλέττα **Structures**. Περιέχει προγραμματιστικές δομές όπως While & For Loops.



Υποπαλέττα **Numeric**. Περιέχει ρουτίνες αριθμητικές, λογαριθμικές, τριγωνομετρικές.

Βιβλιοθήκες από VIs(VI Libraries)

Μπορούμε να φορτώσουμε και να καταχωρήσουμε VIs σε μία ειδική δομή αρχείου στο labVIEW την οποία ονομάζουμε VI Library (Βιβλιοθήκη VIs). Συνήθως αυτό το αρχείο έχει την επέκταση .lib. Τα πλεονεκτήματα χρήσης βιβλιοθηκών είναι αρκετά:

- Με τα VI libraries, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μέχρι 255 χαρακτήρες για να ονομάσουμε τα VIs μας.
- Τα VI libraries συμπιέζουν τα VIs και γλυτώνουν χώρο στο σκληρό δίσκο.
- Έχοντας πολλά VIs μέσα σε ένα μοναδικό αρχείο είναι πιο εύκολη η μεταφορά αρχείων μεταξύ υπολογιστών.

Σημείωση :

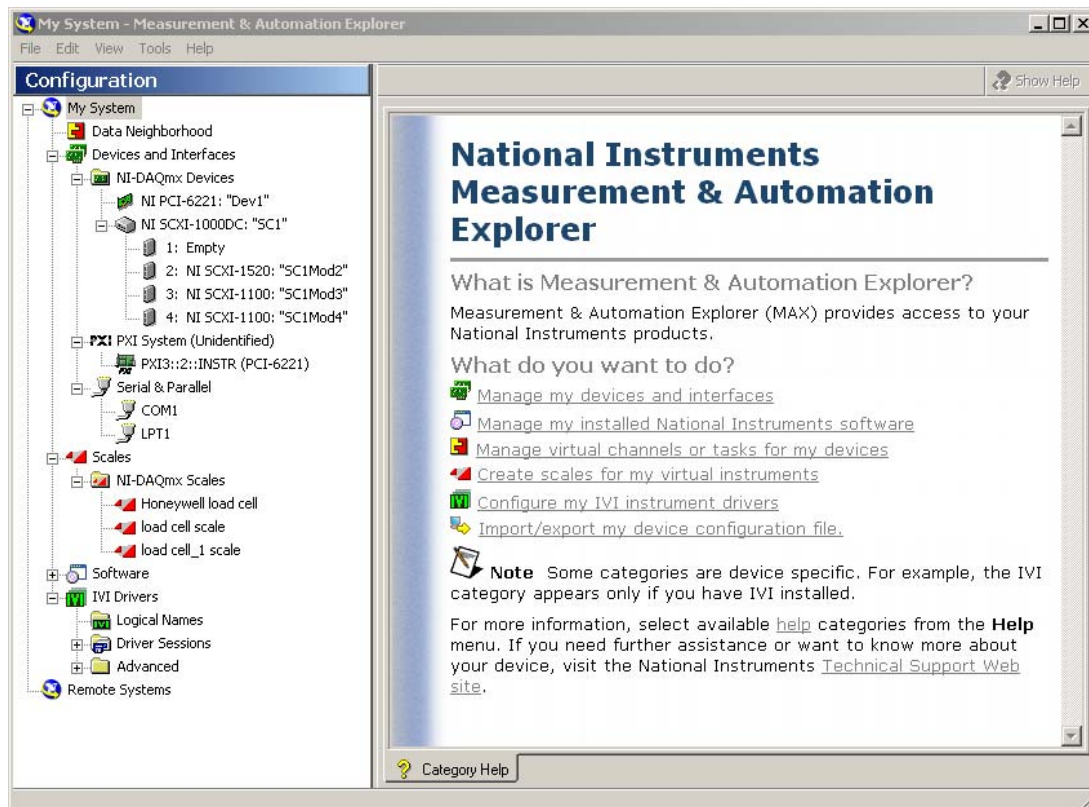
- Τα VI libraries δεν είναι ιεραρχικά. Δηλαδή, δεν είναι δυνατόν να υπάρχει ένα VI Library μέσα σε άλλο VI library.
- Η καταχώρηση VIs απευθείας στο δίσκο είναι πιο γρήγορη από ότι μέσα σε ένα VI Library.

3.2. Το περιβάλλον MAX (Measurement and Automation Explorer)

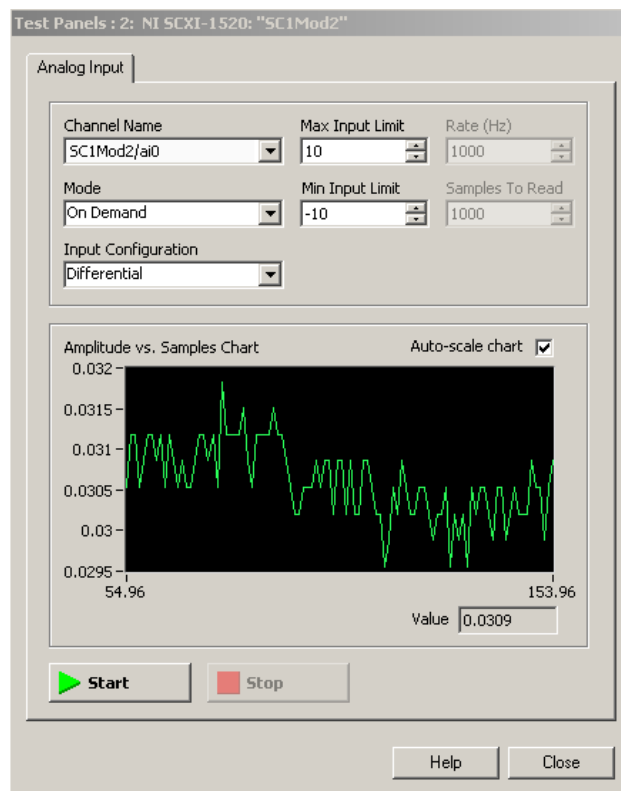
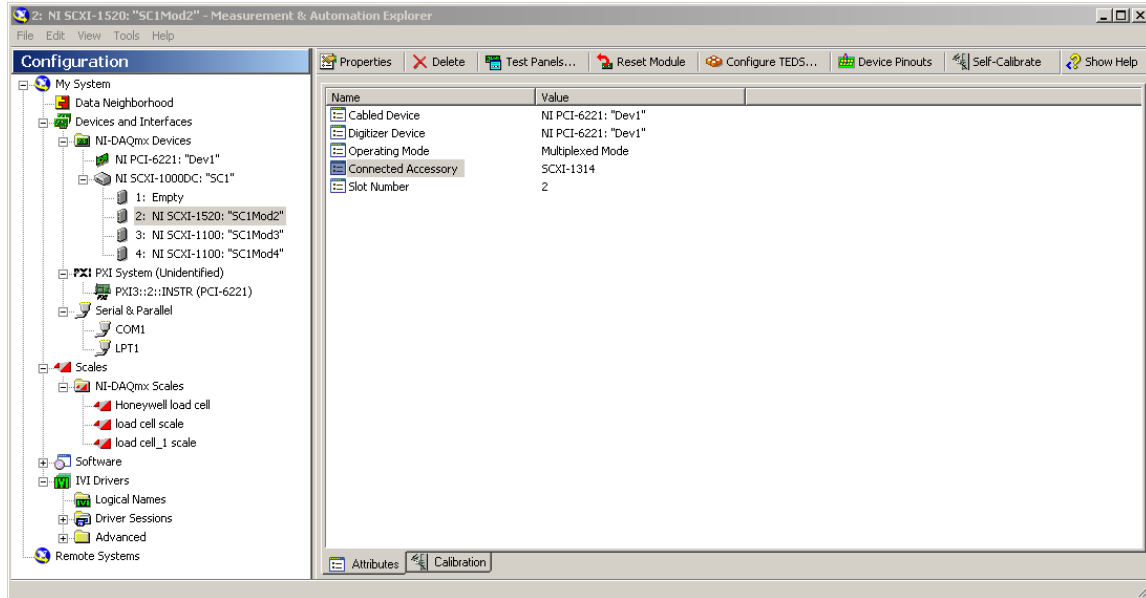
Προκειμένου το LabVIEW να μπορεί να ελέγξει τα αυτόνομα όργανα λήψης μετρήσεων που είναι συνδεδεμένα στον υπολογιστή μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων, θα πρέπει να είναι προεγκατεστημένο το λογισμικό MAX (Measurement and Automation Explorer). Μέσω αυτού επιτυγχάνεται η αναγνώριση των διασυνδεδεμένων συσκευών με τον υπολογιστή καθώς και η βαθμονόμηση τους σε περίπτωση που υποστηρίζονται από το πρόγραμμα με κατάλληλους οδηγούς (drivers).

Ενεργοποιώντας το MAX, εμφανίζεται αρχικά το γραφικό περιβάλλον του Σχήματος 3.1, όπου παρατίθενται όλες οι διαθέσιμες συσκευές (Devices and Interfaces) που έχουν εγκατασταθεί και είναι έτοιμες προς χρήση μέσω του LabVIEW. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εμφανίζεται η κάρτα συλλογής δεδομένων DAQ NI PCI-6221 καθώς και η μονάδα SCXI-1000 όπου μεταξύ των άλλων, στη θύρα 2 είναι συνδεδεμένη η μονάδα 1520 των 8 καναλιών για τον έλεγχο και τη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες (strain gauges και load cell).

Αφού πραγματοποιηθεί ο έλεγχος λειτουργίας της κάρτας και της ολοκληρωμένης μονάδας SCXI-1520, μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε μέσα από το LabVIEW για τον προγραμματισμό του ελέγχου τους και της συλλογής δεδομένων.



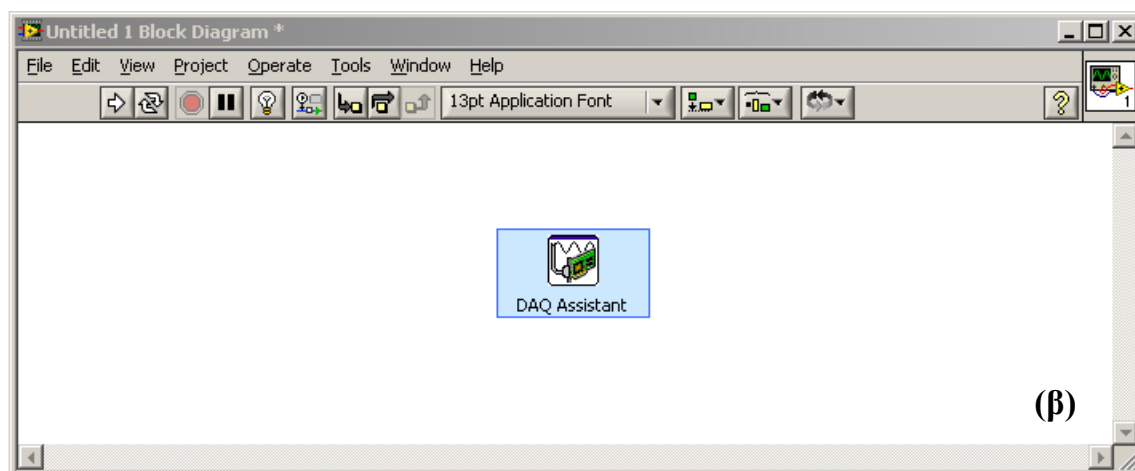
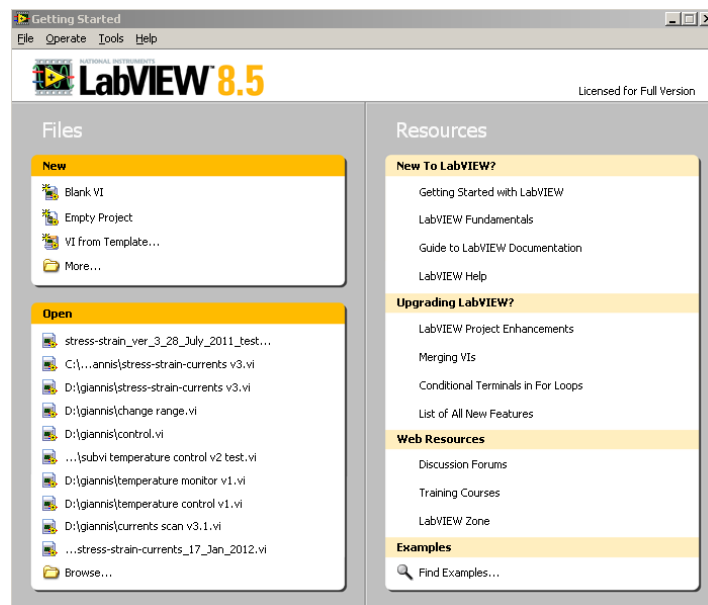
Σχήμα 3.1. Το γραφικό περιβάλλον του MAX όπου φαίνονται όλες οι διασυνδεδεμένες συσκευές.



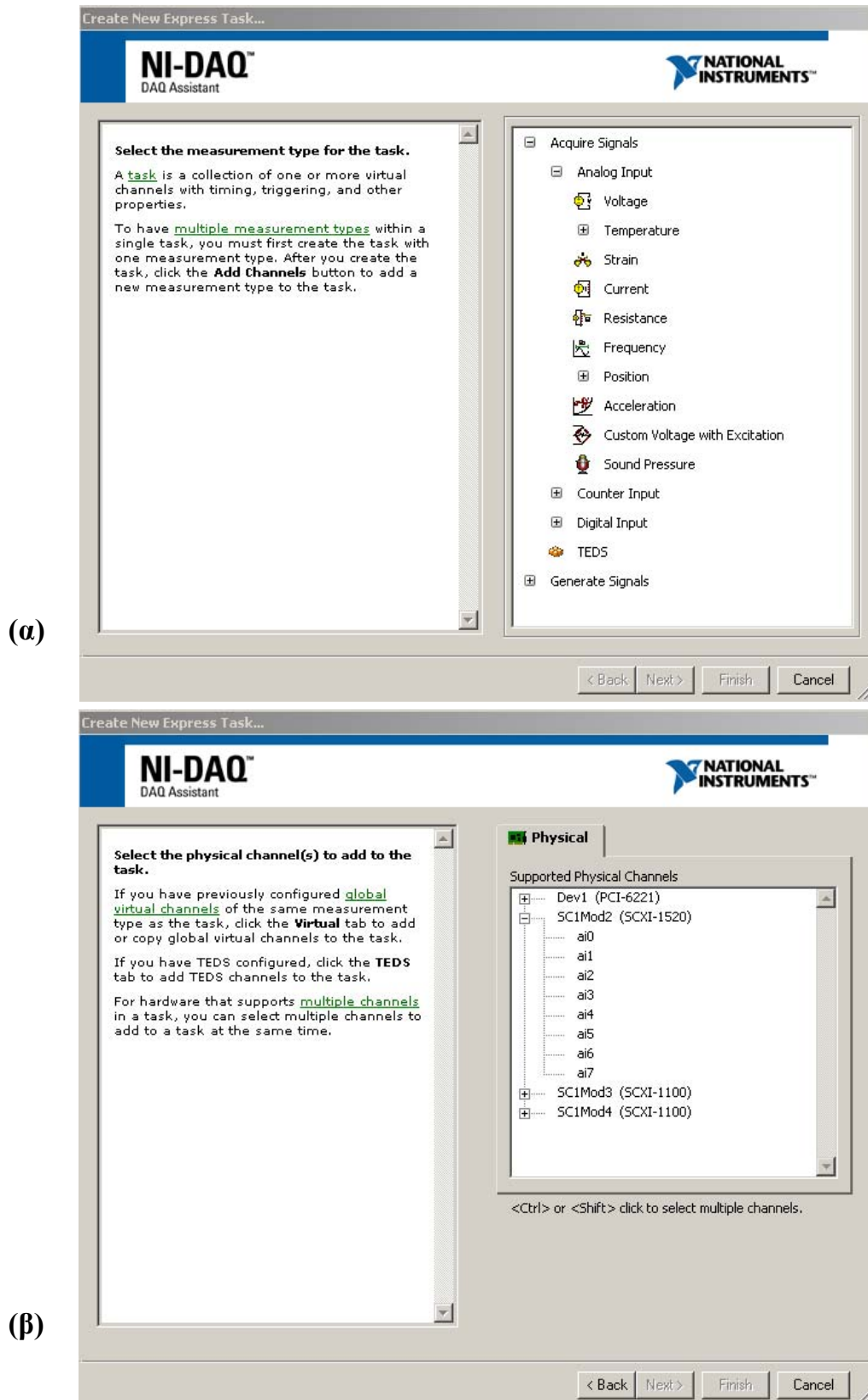
Σχήμα 3.2. Με επιλογή της συσκευής που μας ενδιαφέρει (SCXI-1520), έχουμε τη δυνατότητα να πάρουμε πληροφορίες για αυτή, να την επαναριθμήσουμε, να ελέγξουμε τον τρόπο σύνδεσης και της σωστής λειτουργία της, κ.ά.

3.3. Σύνδεση των αισθητηρίων μηχανικής παραμόρφωσης και της κυψέλης φόρτισης – Υλοποίηση του προγράμματος

Αφού έγινε ο απαραίτητος έλεγχος σωστής λειτουργίας των χρησιμοποιούμενων συσκευών στο MAX, ενεργοποιήθηκε το LabVIEW 8.5, που διαθέτει το Εργαστήριο Γεωφυσικής & Σεισμολογίας. Από την αρχικά εμφανιζόμενη οθόνη (Σχήμα 3.3) επιλέγουμε τη δημιουργία ενός κενού VI και στη συνέχεια στο εμφανιζόμενο Block Diagram, από την παλέτα Functions, επιλέγουμε το DAQ Assistant. Στο εμφανιζόμενο οδηγό (Σχήμα 3.4) έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε από την αναλογική είσοδο, τον μετρητή μηχανικής



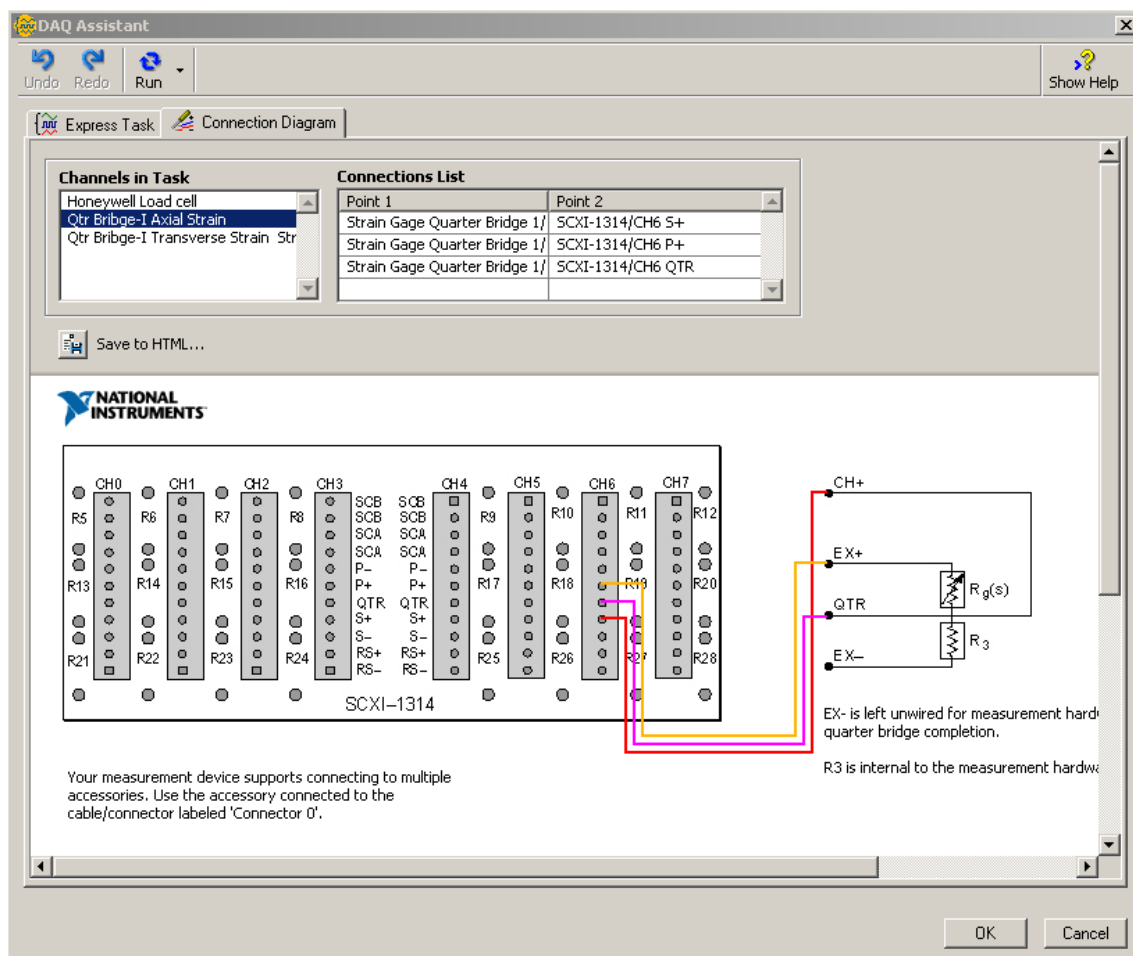
Σχήμα 3.3. (α) Αρχικό παράθυρο εμφάνισης του LabVIEW και (β) Μπλοκ διάγραμμα όπου έχουμε τοποθετήσει τον οδηγό σύνδεσης - χρήσης σημάτων στην είσοδο της μονάδας SCXI-1520 που χρησιμοποιούμε.



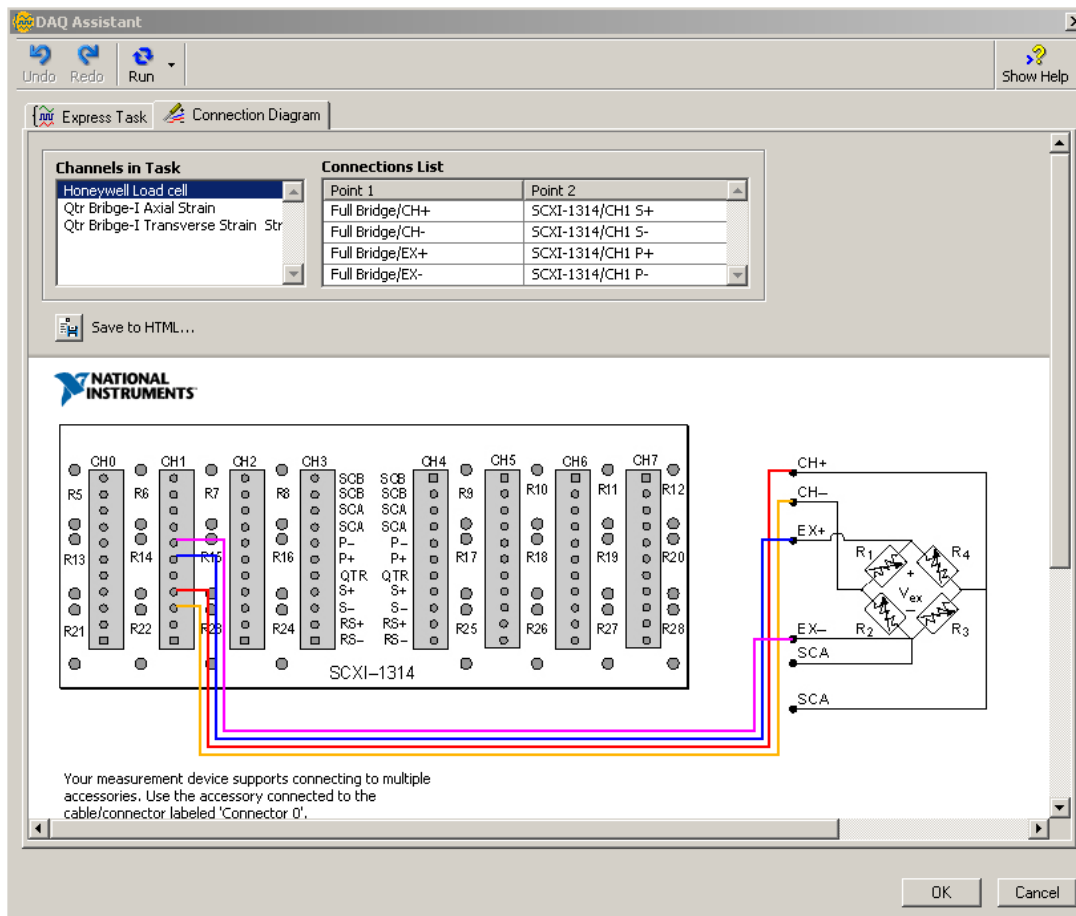
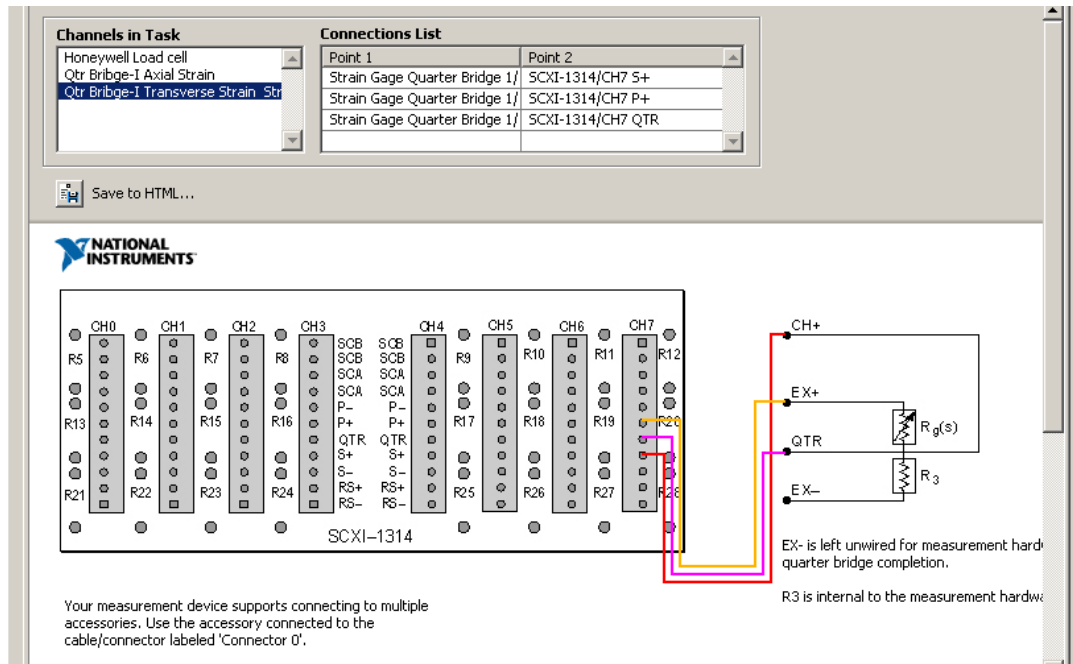
Σχήμα 3.4. (α) Οδηγός επιλογής του σήματος εισόδου και (β) του καναλιού φυσικής διασύνδεσης της μονάδας SCXi-1520, με χρήση του οδηγού NI-DAQ Assistant.

παραμόρφωσης (Strain) και στη συνέχεια το κανάλι της φυσικής διασύνδεσης από τα 8 διαθέσιμα κανάλια της τερματικής μονάδας 1314 του SCXI-1520. Λόγω χρήσης δύο μετρητών μηχανικής παραμόρφωσης (ένας για την οριζόντια και ένας για την κατακόρυφη διεύθυνση σε σχέση με την εφαρμοζόμενη πίεση), επιλέγουμε τη χρήση 2 εκ των 8 διαθέσιμων καναλιών. Επιπλέον, ένα κανάλι δεσμεύτηκε για την είσοδο του αναλογικού σήματος εξόδου της κυπέλης φόρτισης. Πολύ χρήσιμη είναι η δυνατότητα απεικόνισης του τρόπου σύνδεσης των αισθητήρων πάνω στους ακροδέκτες της πλακέτας της μονάδας 1314 που μας δίνεται στον DAQ Assistant, ώστε να αποφύγουμε τυχόν λάθη και να μπορούμε να ελέγχουμε τη συνδεσμολογία μας κάθε φορά που αντικαθίστανται οι μετρητές strain gauges, αφού είναι μίας χρήσης. Οι συνδεσμολογίες αυτές απεικονίζονται στα Σχήματα 3.5 και 3.6.

Σημειωτέον ότι ανά πάσα στιγμή έχουμε τη δυνατότητα να επιστρέψουμε στον DAQ Assistant διπλοπατώντας στο αντίστοιχο εικονίδιο και να αλλάζουμε οποιαδήποτε ρύθμιση κρίνουμε σκόπιμο.



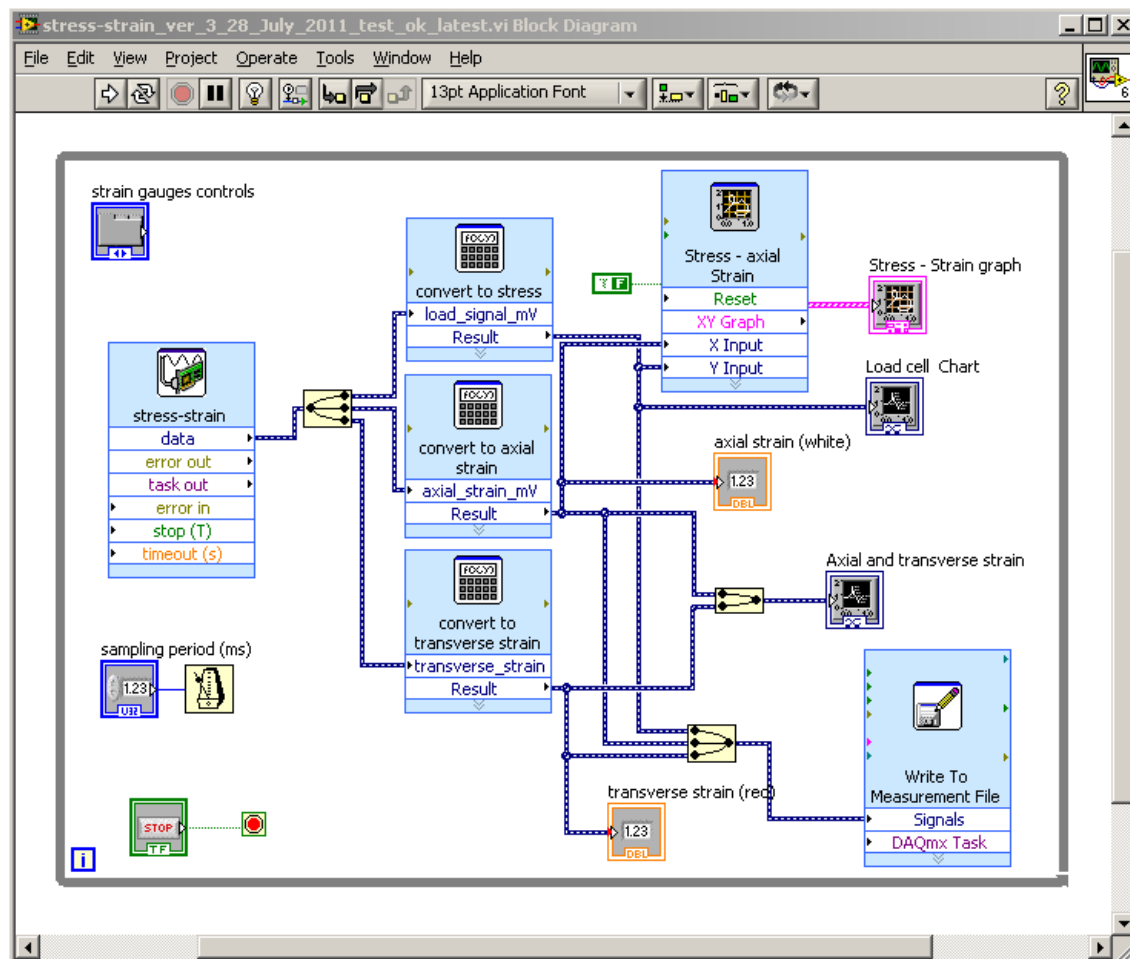
Σχήμα 3.5. Επιλογή της καρτέλας συνδέσεων όπου απεικονίζεται ο τρόπος συνδεσμολογίας του μετρητή αξονικής παραμόρφωσης (γέφυρα 1/4) στο κανάλι 6 (ch6).



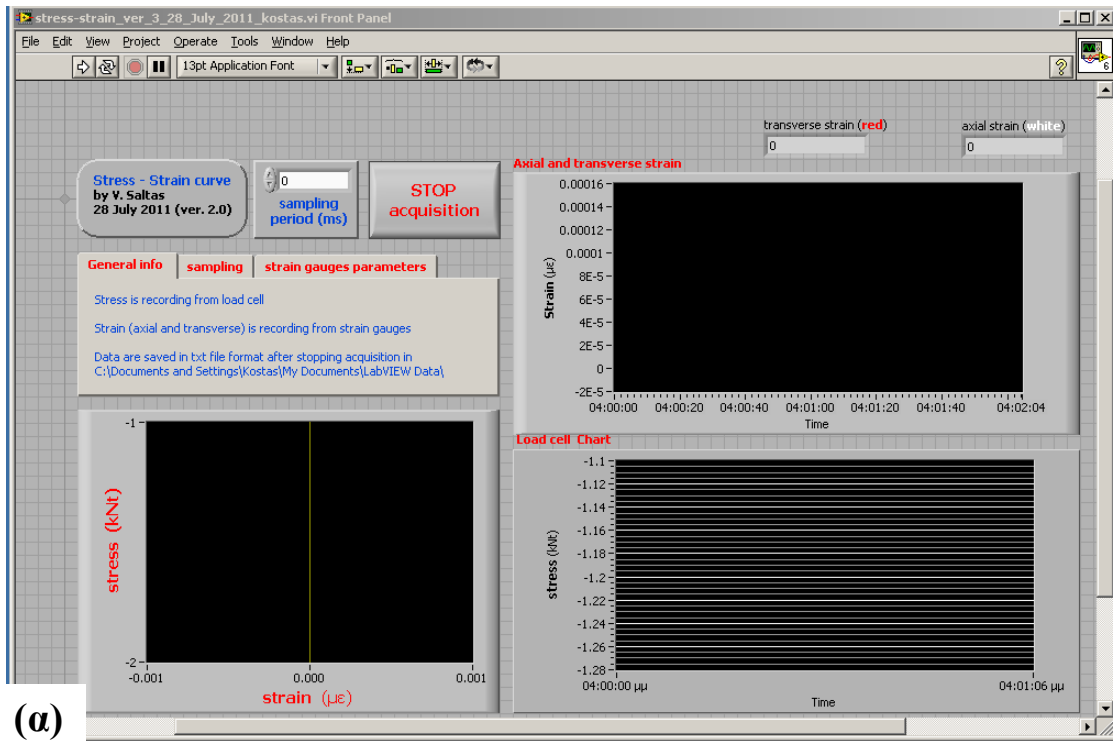
Σχήμα 3.6. Επιλογή της καρτέλας συνδέσεων όπου απεικονίζεται ο τρόπος συνδεσμολογίας του μετρητή εγκάρσιας παραμόρφωσης (γέφυρα $\frac{1}{4}$) στο κανάλι 7 (ch7) και της κυπέλης φόρτισης στο κανάλι 1 (ch1).

Το μπλοκ διάγραμμα του προγράμματος που υλοποιήθηκε για τον έλεγχο και τη συλλογή των δεδομένων δύναμης – παραμόρφωσης, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7. Το αντίστοιχο παράθυρο γραφικών (front panel) που χρησιμοποιείται για τη συλλογή και αποθήκευση των δεδομένων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8α,β.

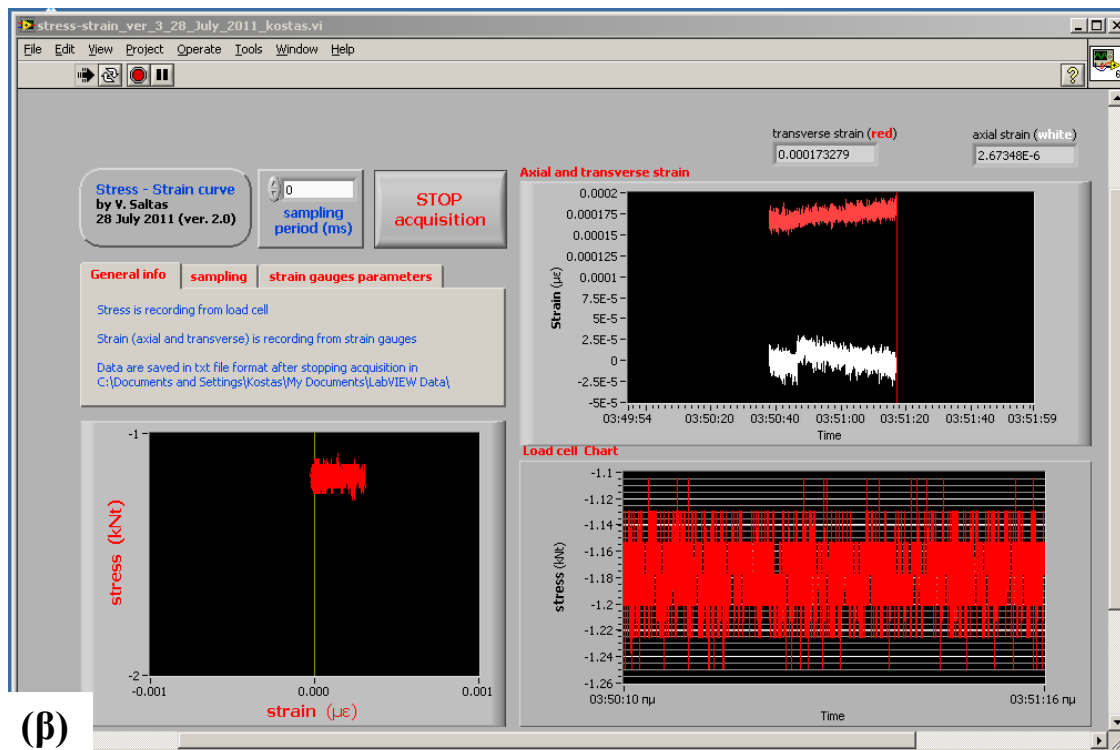
Όλη η διαδικασία βρίσκεται μέσα σε ένα βρόχο προκειμένου να επαναλαμβάνεται η διαδικασία λήψης των σημάτων των 3 εισόδων, με ρυθμό δειγματοληψίας που καθορίζεται, πριν την εκτέλεση του προγράμματος, από το χρήστη. Η διαδικασία σταματάει από το χρήστη (κουμπί STOP acquisition) και τα δεδομένα έχουν αποθηκευτεί στη διαδρομή που έχει προκαθοριστεί. Στο front panel καθόλη τη διάρκεια λήψης μετρήσεων, απεικονίζονται σε γραφήματα τόσο η δύναμη, όσο και οι δύο παραμορφώσεις του δείγματος (εγκάρσια και αξονική) συναρτήσει του χρόνου. Δύο ενδείκτες μας δίνουν επίσης, την αριθμητική τιμή της αξονικής και της εγκάρσιας παραμόρφωσης. Καρτέλα με σημαντικές πληροφορίες βρίσκεται στο front panel, προκειμένου να είναι διαθέσιμες στον χρήστη για τις βασικές ρυθμίσεις που απαιτούνται προκειμένου να εκτελεστεί το πρόγραμμα.



Σχήμα 3.7. Το μπλοκ διάγραμμα του προγράμματος.



(α)

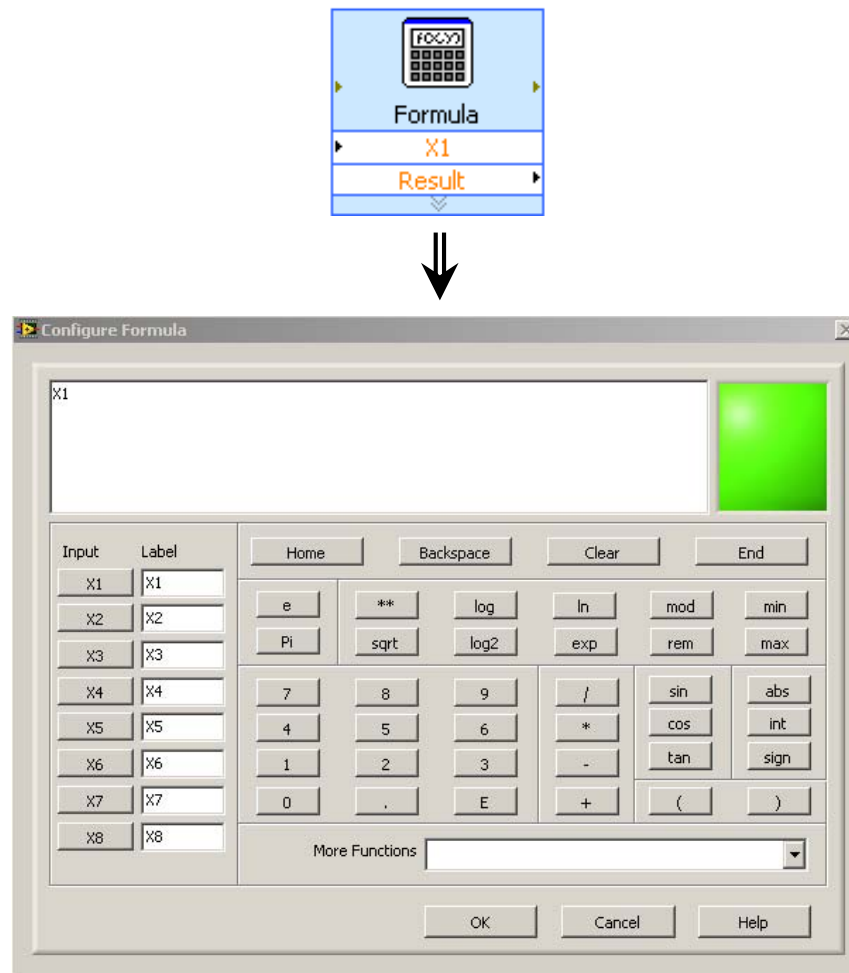


(β)

Σχήμα 3.8. Το παράθυρο γραφικών (front panel) που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση και την απεικόνιση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο (α) σε κατάσταση ετοιμότητας και (β) και σε κατάσταση εκτέλεσης - συλλογής δεδομένων.

Για την τροποποίηση των σημάτων από το load cell και τα strain gauges που εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω του DAQ Assistant, χρησιμοποιήθηκε η ρουτίνα **Formula** που είναι διαθέσιμη στην υποπαλέτα **Arithmetic and Comparison** της κύριας παλέτας των ρουτινών **Functions** (Σχήμα 3.9). Διπλοπατώντας πάνω στο εμφανιζόμενο εικονίδιο που τοποθετήσαμε στο διάγραμμα Block, έχουμε τη δυνατότητα να καθορίσουμε τη συνάρτηση μετατροπής του σήματος στο μέγεθος που θέλουμε. Με τον τρόπο αυτό, στην έξοδο της ρουτίνας λαμβάνουμε το τροποποιημένο σήμα που αφορά στην προκειμένη περίπτωση στη τιμή της δύναμης που εφαρμόζεται στο δείγμα και καταγράφει το load cell. Η μετατροπή αυτή έγινε μέσω του παράγοντα βαθμονόμησης (calibration factor) του χρησιμοποιούμενου load cell.

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο τροποποιήθηκαν και τα σήματα από τα strain gauges προκειμένου να μετατραπούν σε μονάδες με (microstrain).



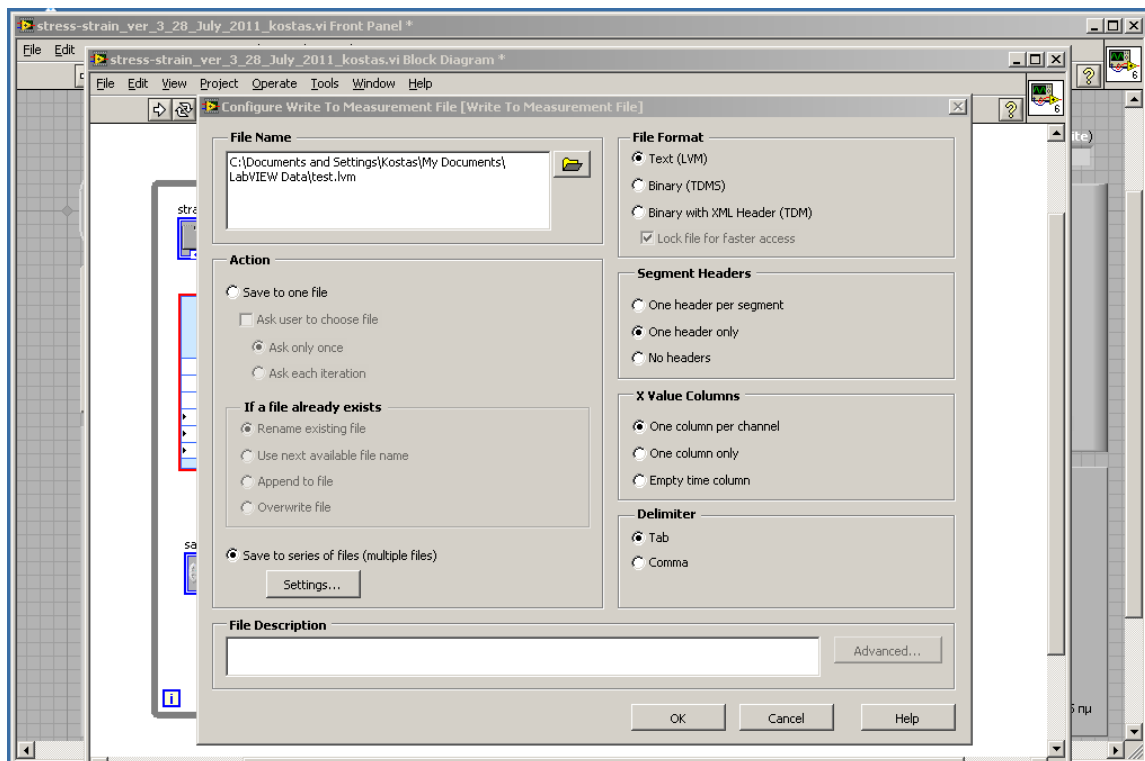
Σχήμα 3.9. Το παράθυρο καθορισμού της συνάρτησης μετατροπής του σήματος εισόδου στο μέγεθος που μας ενδιαφέρει.

Για το διαχωρισμό των σημάτων στην έξοδο του DAQ Assistant καθώς και για την επανένωση τους όπου ήταν απαραίτητο προκειμένου να απεικονιστούν σε γραφήματα και να εξαχθούν σε αρχείο δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν οι ρουτίνες *Split Signals* και *Merge Signals* από την παλέτα υπορουτινών *Signal Manipulation* της κύριας παλέτας των ρουτινών *Functions*.

3.4. Παραμετροποίηση του VI

Οι ρυθμίσεις που θα πρέπει να γίνουν πριν την εκτέλεση του προγράμματος αφορούν :

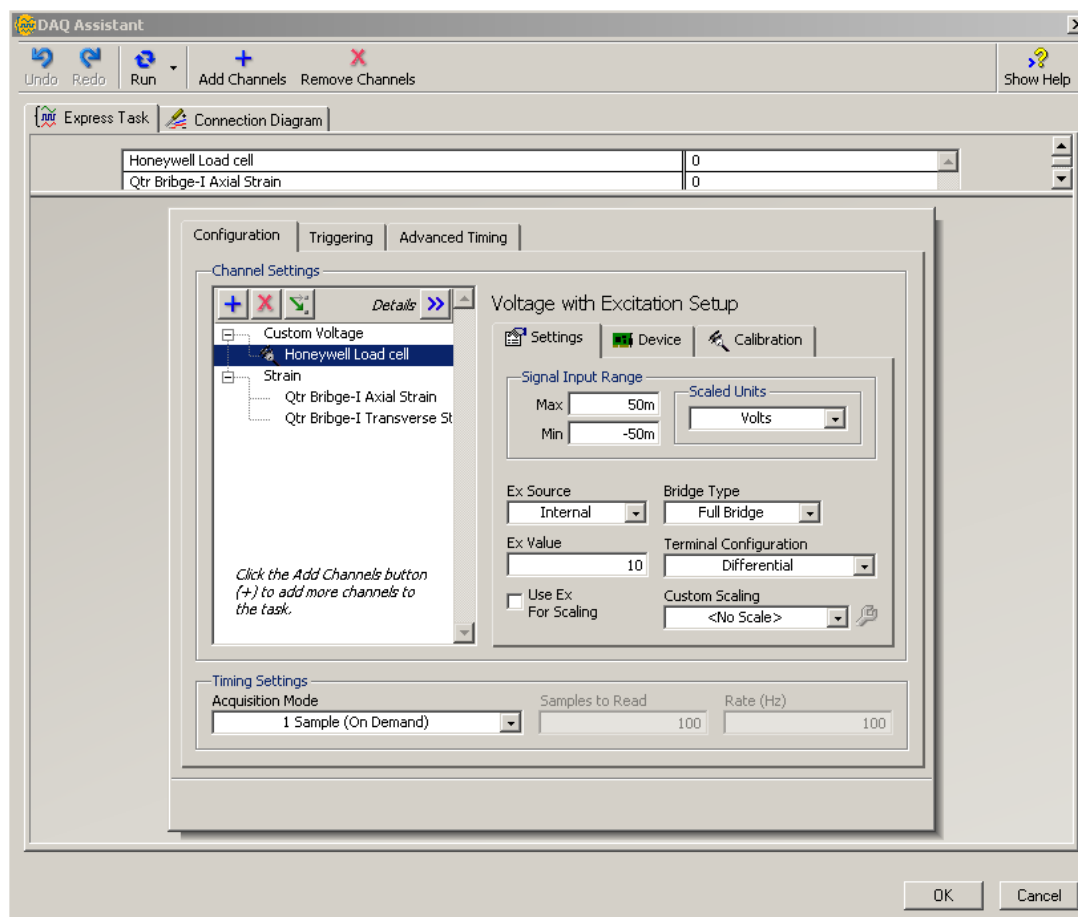
1. στον καθορισμό της δειγματοληψίας που επιτυγχάνεται από το αντίστοιχο πεδίο στο Front panel (**sampling period**) όπου καθορίζουμε την περίοδο δειγματοληψίας σε ms. Για την τιμή 0ms, η δειγματοληψία γίνεται με τον ταχύτερο δυνατό ρυθμό.
2. στον καθορισμό της διαδρομής αποθήκευσης του αρχείου δεδομένων, μέσω της ρουτίνας *Write to Measurement File* (Σχήμα 3.10).
3. στον καθορισμό της τάσης λειτουργίας (excitation voltage) του load cell και των παραμέτρων των strain gauges (Σχήμα 3.11).



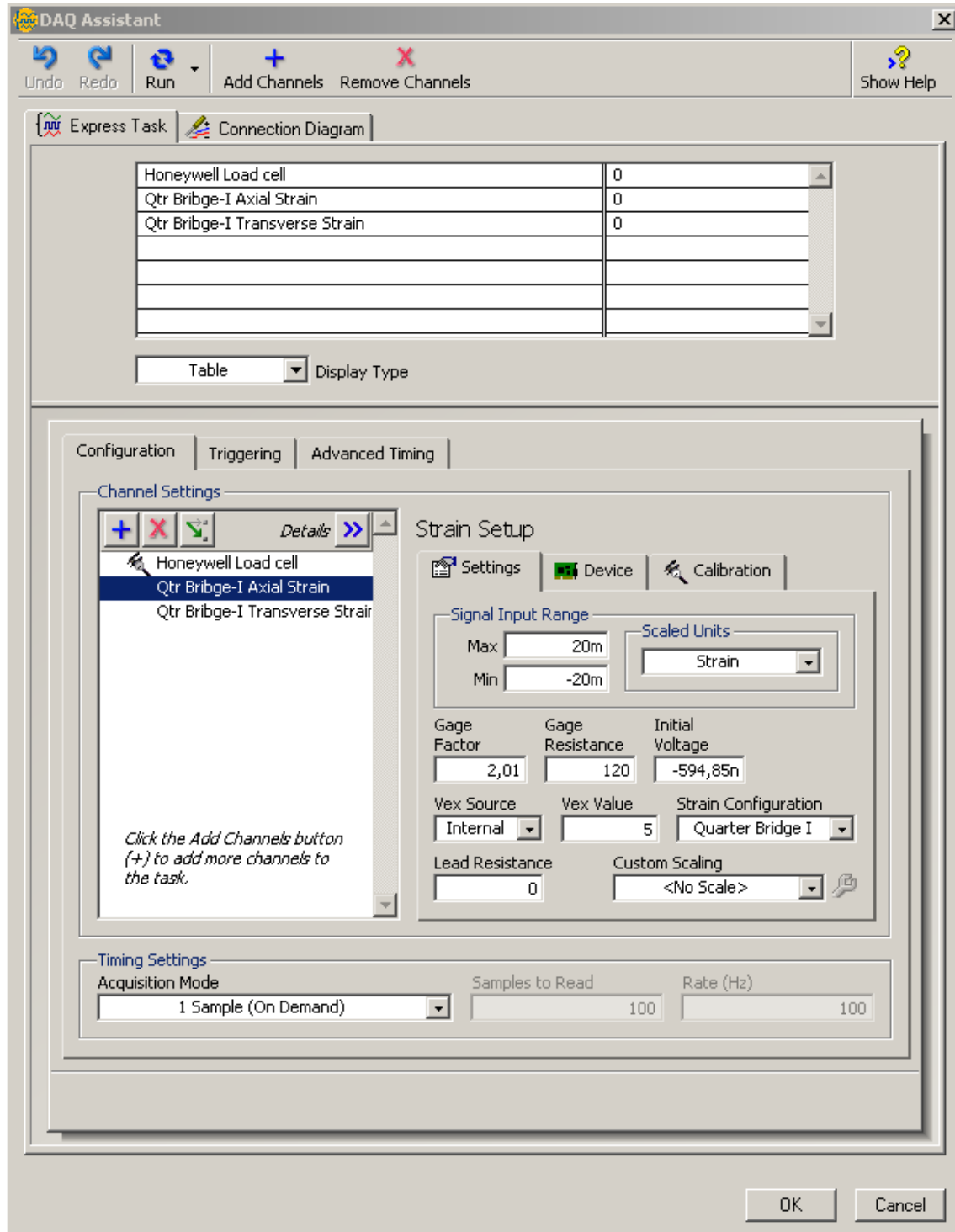
Σχήμα 3.10. Το παράθυρο που καθορίζουμε τη διαδρομή αποθήκευσης των δεδομένων.

Συγκεκριμένα, διπλοπατώντας πάνω στο εικονίδιο του DAQ Assistant, ανοίγει το παράθυρο του Σχήματος 3.11, όπου μεταξύ των άλλων, έχουμε τη δυνατότητα να καθορίσουμε την τάση τροφοδοσίας του load cell (επιλογές Internal, 10V), να ρυθμίσουμε σε διαφορική είσοδο σήματος (Terminal Configuration: Differential) και να επιλέξουμε τύπο γέφυρας (full Bridge) που είναι απαραίτητο για τον τρόπο με τον οποίο έχουμε συνδέσει το load cell στην τερματική μονάδα 1413.

Οι παραπάνω ρυθμίσεις αφορούν μόνον στο σήμα εισόδου από την κυψέλη φόρτισης (Επιλογή: Honeywell Load cell) που έχουμε εισάγει με τη βοήθεια του DAQ Assistant. Ανάλογες ρυθμίσεις θα πρέπει να γίνουν και για τους δύο αισθητήρες μηχανικής παραμόρφωσης (Σχήμα 3.12). Επιλέγοντας κάθε ένα ξεχωριστά από τα δύο αυτά σήματα στον DAQ Assistant, στην αντίστοιχη καρτέλα των ρυθμίσεων, μπορούμε να καθορίσουμε την ωμική αντίσταση του μετρητή strain (120Ω), το gage factor (2.01, εργοστασιακή τιμή), τον τύπο της γέφυρας (γέφυρα 1/4), εσωτερική τροφοδοσία, κλπ.

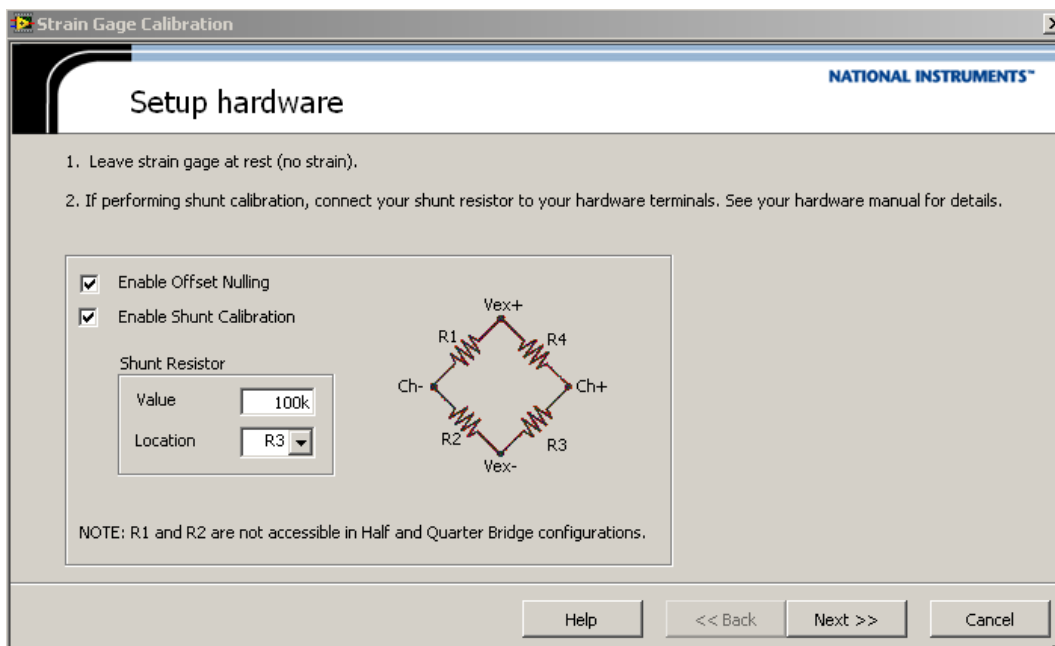
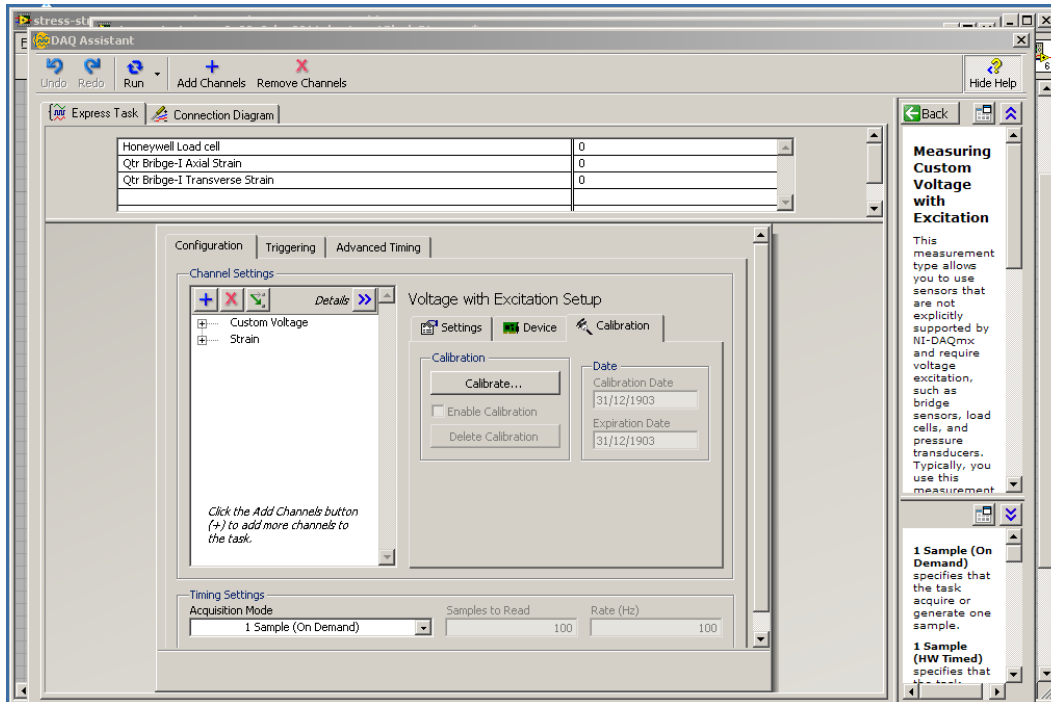


Σχήμα 3.11. Το παράθυρο παραμετροποίησης των διασυνδεδεμένων αισθητηρίων (DAQ assistant) όπου έχει επιλεχθεί η καρτέλα με τις ρυθμίσεις του load cell.

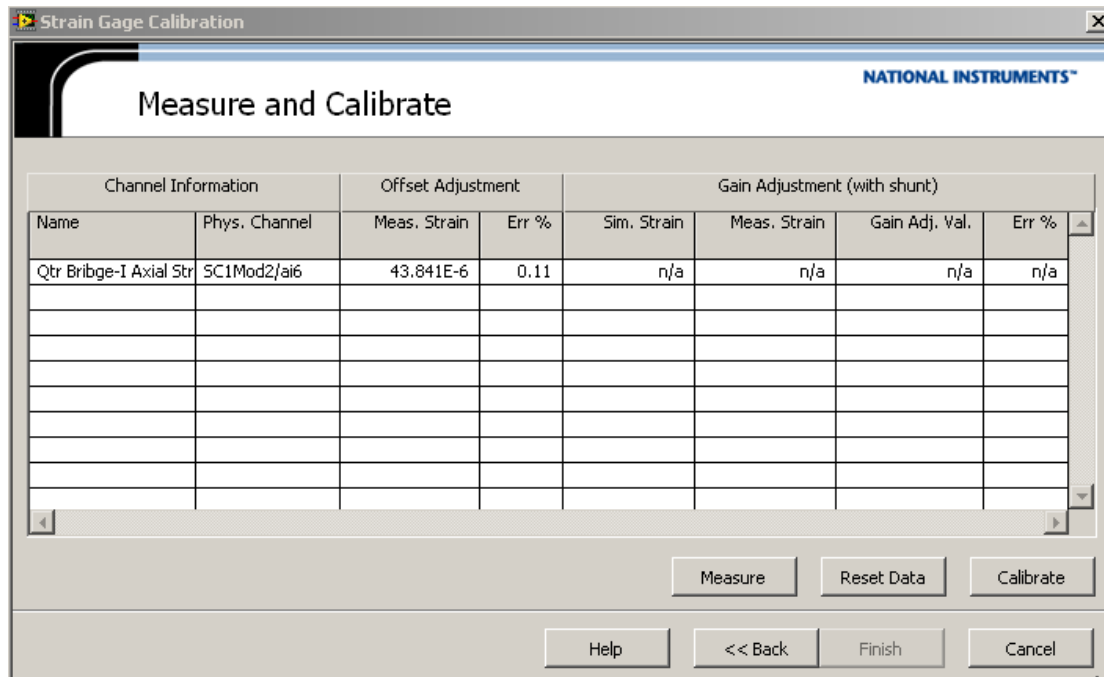


Σχήμα 3.12. Το παράθυρο παραμετροποίησης του DAQ assistant όπου έχει επιλεγθεί η καρτέλα με τις ρυθμίσεις των strain gauges.

Τέλος, στην καρτέλα Calibration, για κάθε ένα από τους 2 μετρητές strain, θα πρέπει κάθε φορά να προβούμε στη διαδικασία βαθμονόμησης, προκειμένου να αφαιρέσουμε το offset που παρουσιάζεται στην αρχική μετρούμενη τάση, χωρίς την εφαρμογή μηχανικού φορτίου (Σχήμα 3.13 και 3.14).



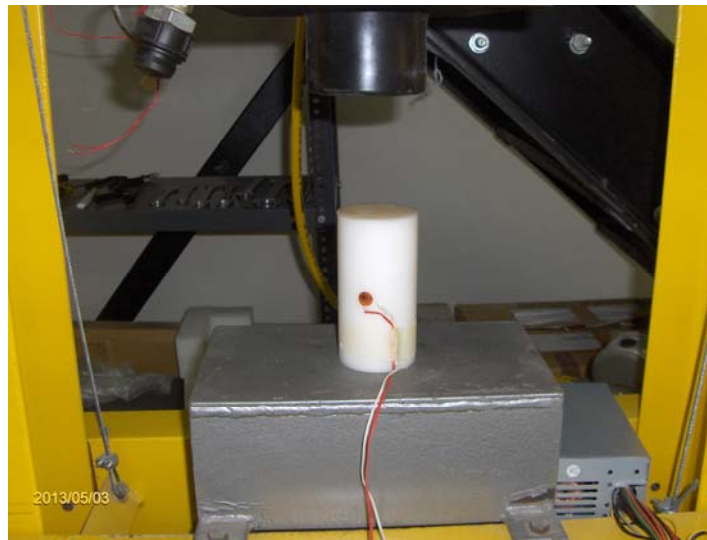
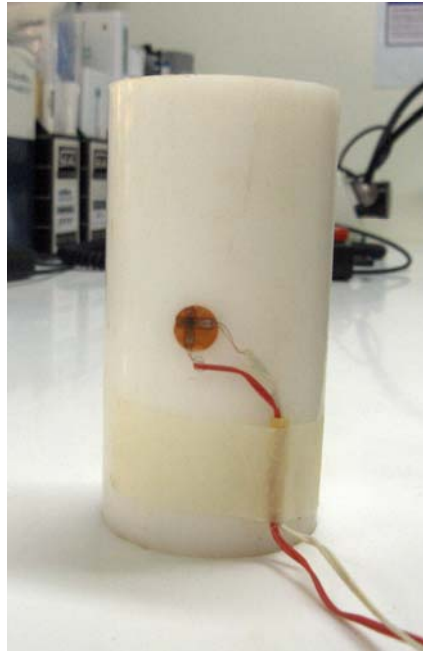
Σχήμα 3.13 . Τα παράθυρα που χρησιμοποιούμε για τη αρχική βαθμονόμηση των strain gauges.



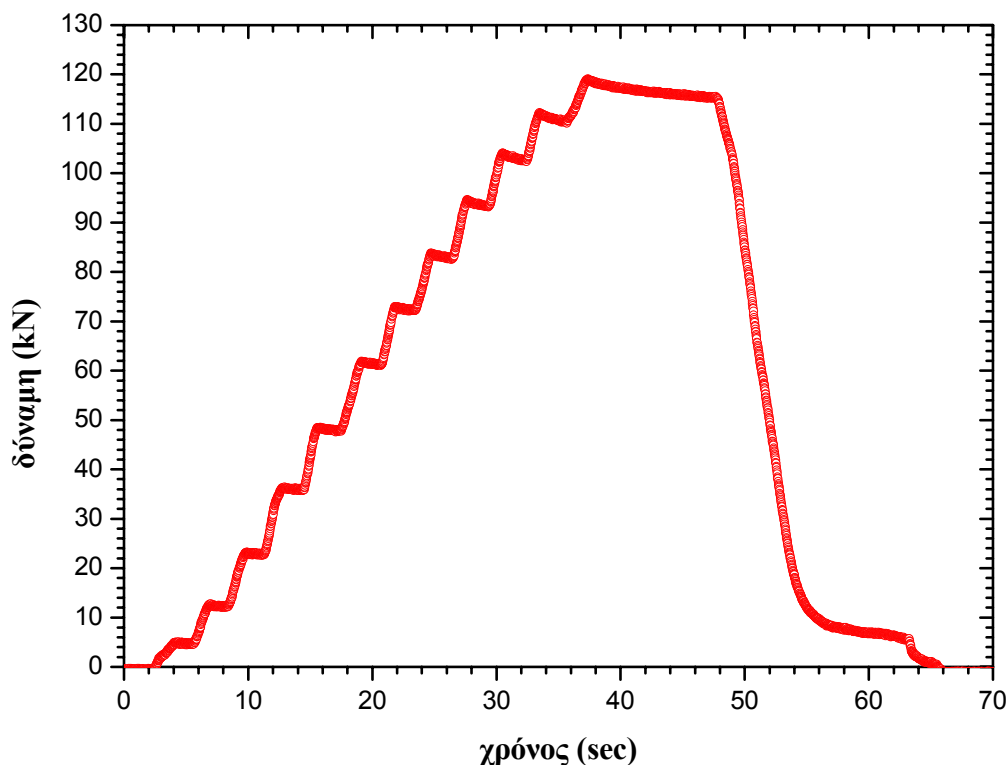
Σχήμα 3.14 .Το παράθυρο βαθμονόμησης των strain gauges που χρησιμοποιούμε για να αφαιρέσουμε το μετρούμενο offset κάθε καναλιού.

3.5 Δοκιμή της πειραματικής διάταξης σε δοκίμιο τεφλόν

Προκειμένου να ελεγχθεί η πειραματική διάταξη τόσο ως προς τη χρηστικότητα της πρέσας, όσο και ως προς τη σωστή λειτουργία του προγράμματος που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον LabVIEW, διαμορφώθηκε κυλινδρικό δοκίμιο από τεφλόν (Σχήμα 3.19) που παρουσιάζει μεγάλη ελαστικότητα και αντοχή, προκειμένου να πραγματοποιηθούν αλληπάλλληλα δοκιμαστικά πειράματα, χωρίς τον κίνδυνο καταστροφής του δείγματος.



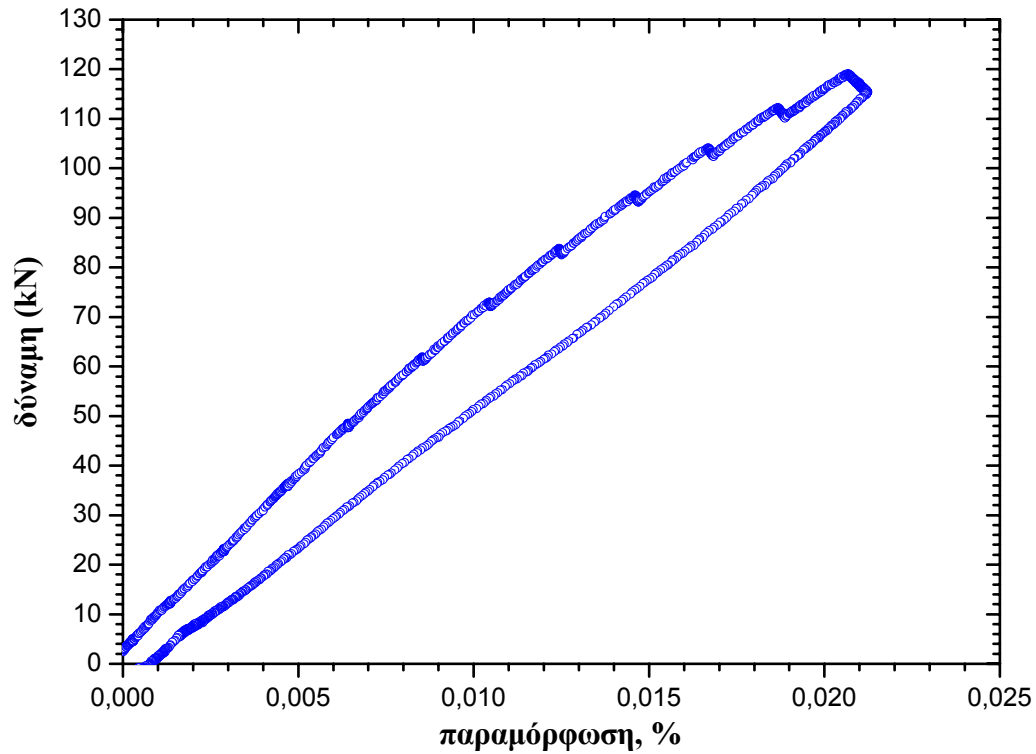
Σχήμα 3.15. Το κυλινδρικό δείγμα τεφλόν που χρησιμοποιήθηκε για το δοκιμαστικό έλεγχο της πειραματικής διάταξης. Διακρίνεται ο αισθητήρας strain gauge κολλημένος στην επιφάνεια του.



Σχήμα 3.16. Γραφική παράσταση της εφαρμοζόμενης δύναμης συναρτήσει του χρόνου σε κυλινδρικό δείγμα τεφλόν. Η δύναμη εφαρμόστηκε σταδιακά μέσω της χειροκίνητης αντλίας με βήμα περίπου 10kN.

Στο δείγμα κολλήθηκε με κυανοακρυλική κόλλα στο κέντρο ο διπλός αισθητήρας strain gauge (σε σχήμα ροζέτας) και σταθεροποιήθηκαν με ταινία τα καλώδια του, προκειμένου να μην ξεκολλήσουν κατά την τοποθέτηση στη θέση φόρτισης. Αφού το δείγμα τοποθετήθηκε κατάλληλα στη πρέσα και συνδέθηκαν οι ακροδέκτες των stain gauges στην τερματική μονάδα SCXI-1314 και πραγματοποιήθηκαν όλες οι ρυθμίσεις που αναφέρονται στην προηγούμενη ενότητα.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε στο δείγμα σταδιακά, πίεση μέσω της χειροκίνητης αντλίας, προσπαθώντας οι κινήσεις να είναι όσο το δυνατό ίδιας διάρκειας και πίεσης. Η δύναμη που καταγράφηκε απεικονίζεται στο Σχήμα 3.16. η επαναλαμβανόμενη κίνηση στην αντλία αντιστοιχεί στα σκαλοπάτια της δύναμης των 10kN περίπου που παρατηρούμε. Μετά τα 50s, η δύναμη καταργείται και επιστρέφουμε στην αρχική κατάσταση. Η αντίστοιχη καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.17. Παρατηρούμε απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά μετά τα 60kN, γεγονός που υποδηλώνει ότι το δείγμα εισέρχεται



Σχήμα 3.17. Γραφική παράσταση της εφαρμοζόμενης δύναμης συναρτήσει της παραμόρφωσης του δείγματος τεφλόν.

στην πλαστική περιοχή, η οποία ωστόσο είναι αρκετά εκτενής λόγω της μεγάλης ελαστικότητας του υλικού. Στα 120kN, η δύναμη καταργείται και η καμπύλη παρουσιάζει το βρόχο υστέρησης λόγω της μικρής μόνιμης παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αφορούσε στην προσαρμογή κατάλληλων αισθητηρίων μέτρησης μηχανικής παραμόρφωσης και δύναμης σε διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια, προκειμένου να καταστεί δυνατή η καταγραφή της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης.

Η πρέσα που χρησιμοποιήθηκε για να ελεγχθεί η πειραματική διάταξη, λειτουργεί χειροκίνητα με αποτέλεσμα η μηχανική φόρτιση του δείγματος να μην μπορεί να γίνει με γραμμική αύξηση της πίεσης και βάσει διεθνών προτύπων μέτρησης και καταγραφής των καμπύλων μηχανικής τάσης – παραμόρφωσης σε υλικά. Ωστόσο, μικρά επαναλαμβανόμενα βήματα μπορούν να πραγματοποιηθούν και η προκύπτουσα καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης αποδίδει σε πολύ καλό βαθμό την πραγματική συμπεριφορά του υλικού σε γραμμική φόρτιση, όπως προέκυψε από τη δοκιμή που έγινε σε δείγμα τεφλόν. Επίσης, η θερματική μονάδα SCXI-1314 που χρησιμοποιήθηκε έχει τη δυνατότητα σύνδεσης έως και 8 καναλιών μέτρησης από αισθητήρες strain gauges αλλά και άλλα απαραίτητα αισθητήρια, όπως μετρητές πίεσης ή δύναμης.

Η διάταξη ακριβούς μέτρησης του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου με τη χρήση κυψέλης φόρτισης και των μηχανικών παραμορφώσεων του δείγματος με μετρητές strain gauges μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανεξάρτητη διάταξη σε οποιαδήποτε άλλη πρέσα που διαθέτει σερβο-υδραυλικό μηχανισμό ακριβείας, όπως στη βιομηχανικού τύπου μονοαξονική συσκευή ανεμπόδιστης θλίψης των 3000kN του γερμανικού οίκου FORM+TEST του εργαστηρίου Γεωφυσικής και Σεισμολογίας. Με τον ακριβή έλεγχο της εφαρμοζόμενης πίεσης στην περίπτωση αυτή, καθίσταται δυνατή η λήψη μετρήσεων τάσης – παραμόρφωσης μεγάλης ακρίβειας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1/ Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Γ. Δ. Χρυσουλάκης και Δ. Ι. Παντελής, Εκδ. Παπασωτηρίου, 1996.
- 2/ Σημειώσεις εργαστηρίων μετρολογίας, Β. Σάλτας, Χανιά, 2005
- 3/ https://measurementsensors.honeywell.com/ProductDocuments/Load/Model_43_Datasheet.pdf
- 4/ <http://www.enerpac.com/en/industrial-tools/hydraulic-presses/xlp-vlp-series-hydraulic-bench-and-shop-presses>
<http://www.enerpac.com/en/industrial-tools/hydraulic-pumps-and-valves/hydraulic-manual-pumps>
- 5/ <http://www.ni.com/pdf/manuals/373737g.pdf>,
<http://www.ni.com/pdf/manuals/372583e.pdf>
<http://www.ni.com/pdf/manuals/370252a.pdf>
http://www.ni.com/pdf/manuals/373236k_01.pdf
http://www.ni.com/pdf/products/us/4scxisc333_334_335_336.pdf
www.ni.com/pdf/manuals/320515f.pdf
http://www.ni.com/pdf/products/us/4scxisc286_ETC_196.pdf
<http://www.ni.com/labview/>
<http://www.ni.com/data-acquisition/multifunction/>
- 6/ https://measurementsensors.honeywell.com/ProductDocuments/Load/Model_41_Datasheet.pdf
- 7/ www.honeywell.com/sensotec
- 8/ www.diamant-boart.com/stone.cfm?language=En&page=Tools6
- 9/ *Dynamic Pressure Measurement Technology, edited by Jon S. Wilson and published by the Endevco Division of Meggitt Corp*
- 10/ <http://sine.ni.com/nipdfgenerator/nipdfgenerator?pageURL=http://www.ni.com/white-paper/3816/en&clientAppName=whitepaper&dotsPerPixel=&dotsPerPoint=>
- 11/ LabVIEW basics course manual, Course software version 2.0.
- 12/ LabVIEW: Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο: Getting started <http://repository.edulll.gr/1410>