



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

*Πειραματική Μελέτη Παραμορφώσεων με τη
Μέθοδο της Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων-Το
Σύστημα Vic-2D*

*Experimental Study of Deformities using the
Digital Image Correlation Technique-The System
Vic-2D*

Σταθοπούλου-Στάϊκου Δήμητρα

Οκτώβριος 2009

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:

***«Πειραματική Μελέτη Παραμορφώσεων με τη Μέθοδο της
Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων-Το Σύστημα Vic-2D»***

***“Experimental Study of Deformities using the Digital Image
Correlation Technique-The System Vic-2D”***

Φοιτήτρια: Σταθοπούλου-Στάϊκου Δήμητρα

Επιβλέπων Καθηγητής: κ. Σακελλαρίου Μιχάλης

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή και διευθυντή του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής του τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, κ. Μιχάλη Σακελλαρίου, ο οποίος με τη συνεχή και καθημερινή βοήθεια και στήριξή του, καθώς και με την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, κατόρθωσα και έφερα εις πέρας τη διπλωματική μου εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ζαχαρία Πιτουρά, για τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια όλων των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και για τις πολύτιμες συμβουλές του για τη σύνταξη της εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα κ. Ιωάννη Στρατάκο, για την επισκευή των μηχανών θλίψης του εργαστηρίου, καθώς χωρίς τη βοήθειά του δεν θα ήταν δυνατή η διενέργεια οποιουδήποτε πειράματος. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον τεχνικό του εργαστηρίου κ. Αθανάσιο Λιαραμάντζα, για τη βοήθεια που μας προσέφερε στη χρήση διαφόρων μηχανημάτων και εργαλείων του εργαστηρίου.

Πρόλογος

Ο υπολογισμός των παραμορφώσεων των υλικών αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα στον χώρο της έρευνας. Για αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν ένα πλήθος μεθόδων, οι οποίες όμως παρουσίαζαν πληθώρα μειονεκτημάτων και τεχνικών δυσκολιών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αναζήτηση καινούργιων, πιο ανεπτυγμένων και αποτελεσματικών μεθόδων, οι οποίες θα προσέλκυαν το ενδιαφέρον των ερευνητών.

Μία από αυτές τις καινούργιες μεθόδους, που προκαλεί μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, ονομάζεται συσχέτιση ψηφιακών εικόνων. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην *pixel* προς *pixel* συσχέτιση δύο φωτογραφιών που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, η μία πριν και η άλλη κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης. Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν σχήματα ισαριθμικών καμπύλων που απεικονίζουν τα πεδία των μετατοπίσεων του κάθε σημείου της επιφάνειας του δείγματος κατά τη Χ και Υ διεύθυνση, τα πεδία των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} και e_{yy} , και τα πεδία των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} .

Το σύστημα *Vic-2D*, το οποίο χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στην Ελλάδα, αποτελεί ένα σύστημα που περιλαμβάνει μία ψηφιακή κάμερα ενωμένη με υπολογιστή που περιέχει κατάλληλο λογισμικό. Το λογισμικό αυτού του συστήματος βασίζεται στη μέθοδο της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων. Πρόκειται για ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων δοκιμίων διαφόρων υλικών, που βρίσκεται βέβαια ακόμα σε πειραματικό στάδιο, ιδιαίτερα στην Ελλάδα.

Στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η εκμάθηση του συστήματος και η κατανόηση των αποτελεσμάτων που εξάγει. Προς αυτήν την κατεύθυνση βοήθησαν ορισμένα πειράματα θλίψης διαφόρων υλικών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, καθώς επίσης και πειράματα τύπου βραζιλιανής δοκιμής, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον. Τέλος, παρατηρήθηκαν, αναλύθηκαν και ερμηνεύτηκαν τα αποτελέσματα από πείραμα κυκλικού δίσκου με κεντρική οπή, χρησιμοποιώντας δείγμα από *plexiglass*, με σκοπό την κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού και της αντοχής του στην παραμόρφωση.

Abstract

Strain measurements are very important in the world of investigation. In the past, a lot of methods were used for this reason. Nevertheless, these methods had a variety of disadvantages and technical difficulties. As a result, this led to the searching of newer, more advanced and effective methods, which would attract the investigators' attention.

One of those new methods is named digital image correlation and causes a great inquiring interest. This method is based on a pixel-by-pixel correlation between two images, captured in different time moments, the one before and the other one during the deformation period. In this way, contour maps are produced. These maps display the fields of the X and the Y-displacement of each point of the surface of the specimen, not to mention the fields of the strains e_{xx} , e_{yy} and e_{xy} , as well.

The system Vic-2D, which is used for the first time in Greece, is a system that consists of a digital camera united with a laptop that contains the suitable software. The software of this system is based on the digital image correlation technique. This system constitutes a very important implement for the strain measurement of specimens made by various materials, but it is still found in an experimental stage, particularly in Greece.

Objective of this work is the learning of system and the comprehension of the results that it exports. For this reason, certain stress experiments and Brazilian tests have been occurred in the laboratory, which are of great interest and provided the means to understand the system. Finally, a ring test, using sample from plexiglass, was performed, aiming at the comprehension of the behavior of the material and its resistance in the deformity.

Περιεχόμενα

Λίστα Εικόνων	9
Λίστα Διαγραμμάτων	18
1. Εισαγωγή	19
2. Θεωρητικό Μέρος	22
2.1. Η Μέθοδος της Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων	22
2.2. Σχέση Διακριτικότητας Εικόνας και Διαστάσεων του Δοκιμίου	27
2.3. Σχέση Εστιακής Απόστασης και Απόστασης μεταξύ Κάμερας-Δοκιμίου	30
2.4. Τα Αποτελέσματα της Παραμόρφωσης	31
2.5. Σχέδιο Στιγμάτων (<i>Speckle Pattern</i>).....	32
3. Το Σύστημα Vic-2D: Διάταξη και Λειτουργία	34
3.1. Η Σημασία του Σχεδίου Στιγμάτων	34
3.2. Η Διαδικασία της Λήψης των Εικόνων.....	35
3.3. Η Λειτουργία του Λογισμικού	36
3.4. Οι Τεχνικές Προδιαγραφές του Συστήματος	37
4. Το Σύστημα Συντεταγμένων των Εικόνων	38
4.1. Μετατόπιση κατά Χ-Πείραμα Δεξιάς Κίνησης.....	38
4.2. Μετατόπιση κατά Χ-Πείραμα Αριστερής Κίνησης.....	40
4.3. Μετατόπιση κατά Υ-Πείραμα Άνω Κίνησης.....	42
4.4. Μετατόπιση κατά Υ-Πείραμα Κάτω Κίνησης.....	44
5. Περιγραφή του Συστήματος μέσω Πειράματος τύπου Βραζιλιανής Δοκιμής	48
5.2. Διάταξη του Συστήματος	51
5.3. Προετοιμασία του Δείγματος	52
5.4. Λήψη των Εικόνων	53
5.5. Η Διαδικασία της Συσχέτισης	56
5.6. Καλιμπράρισμα των Εικόνων	60
5.7. Σχολιασμός Ποιοτικών Αποτελεσμάτων	62
5.7.1. Η Αρχή των Αξόνων του Συστήματος Συντεταγμένων των Εικόνων	63
5.7.2. Το Πεδίο Μετατοπίσεων U κατά X	66
5.7.3. Το Πεδίο Μετατοπίσεων V κατά Y.....	71
5.7.4. Το Πεδίο Ανηγμένων Παραμορφώσεων e_{xx}	75
5.7.5. Το Πεδίο Ανηγμένων Παραμορφώσεων e_{yy}	80
5.7.6. Το Πεδίο Διατμητικών Παραμορφώσεων e_{xy}	84
5.8. Σχολιασμός Αριθμητικών Αποτελεσμάτων	89
5.8.1. Μετατόπιση U κατά την οριζόντια διεύθυνση.....	90
5.8.2. Μετατόπιση V κατά την κάθετη διεύθυνση	100

5.9.	Διαγράμματα	111
5.9.1.	Τα Διαγράμματα των Οριζόντιων Μετατοπίσεων U	112
5.9.2.	Τα Διαγράμματα των Κάθετων Μετατοπίσεων V	120
5.9.3.	Τα Διαγράμματα των Ανηγγμένων Παραμορφώσεων e_{xx}	128
5.9.4.	Τα Διαγράμματα των Ανηγγμένων Παραμορφώσεων e_{yy}	136
5.9.5.	Τα Διαγράμματα των Διατμητικών Παραμορφώσεων e_{xy}	144
5.10.	Τα Βέλη των Τάσεων	152
6.	Πείραμα Θλίψης Κυκλικού Δίσκου με Κεντρική Οπή από <i>plexiglass</i>	157
6.1.	Θεωρία του Πειράματος Κυκλικού Δίσκου με Κεντρική Οπή	157
6.2.	Σχολιασμός Ποιοτικών Αποτελεσμάτων	159
6.2.1.	Το Πεδίο των Οριζόντιων Μετατοπίσεων U	160
6.2.2.	Το Πεδίο των Κάθετων Μετατοπίσεων V	167
6.2.3.	Το Πεδίο των Ανηγγμένων Παραμορφώσεων e_{xx}	175
6.2.4.	Το Πεδίο των Ανηγγμένων Παραμορφώσεων e_{yy}	182
6.2.5.	Το Πεδίο των Διατμητικών Παραμορφώσεων e_{xy}	190
6.3.	Σχολιασμός Αριθμητικών Αποτελεσμάτων	197
6.3.1.	Τα Αριθμητικά Αποτελέσματα των Μετατοπίσεων U	198
6.3.2.	Τα Αριθμητικά Αποτελέσματα των Μετατοπίσεων V	212
7.	Ποιότητα των Πειραμάτων	226
8.	Συμπεράσματα-Συζήτηση	229
9.	Βιβλιογραφία-Πηγές	234

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 2-1: Η διαδικασία της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων.	22
Εικόνα 2-2: Η εικόνα πριν την παραμόρφωση δείχνει 4 τελείες διαφορετικών τόνων του γκρι, οι οποίες αναπαριστούν 4 διαφορετικά <i>pixels</i> . Η εικόνα μετά την παραμόρφωση δείχνει τις ίδιες 4 τελείες, αλλά τώρα αναπαριστούν 4 διαφορετικά <i>pixels</i> . Το λογισμικό του υπολογιστή υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ της θέσης των τελειών (<i>pixels</i>) των διαφορετικών εικόνων και τις συσχετίζει για να καθοριστεί η παραμόρφωση.	23
Εικόνα 2-3: Η μεταφορά του <i>pixel</i> από την εικόνα αναφοράς στην παραμορφωμένη.	23
Εικόνα 2-4: Η διαδικασία της μεταφοράς περιέχει και παραμόρφωση.....	24
Εικόνα 2-5: Μερικές μεταβλητές, οι οποίες περιλαμβάνονται στη μέθοδο της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων.....	24
Εικόνα 2-6: Η θέση p είναι η πλησιέστερη θέση στην πραγματική λύση (u, v) σε επίπεδο <i>pixel</i> . Οι 2-9 είναι θέσεις των 8 γειτονικών <i>pixels</i>	25
Εικόνα 2-7: Ένα τμήμα μίας ψηφιακής εικόνας με τις <i>pixel</i> στήλες και γραμμές του. Επίσης, αναπαριστά το ύψος και το πλάτος του <i>pixel</i>	28
Εικόνα 2-8: Στο ορθογώνιο δοκίμιο 3" x 4" χρησιμοποιείται μία 1024" x 768" διακριτικότητα για την απεικόνιση της εικόνας. Και οι 2 διαστάσεις του δοκιμίου και η διακριτικότητα της εικόνας έχουν ένα λόγο διαστάσεων 4:3. Όλες οι <i>pixel</i> στήλες και <i>pixel</i> γραμμές δείχνουν την εικόνα του δοκιμίου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι 2 εξισώσεις, δηλαδή οι 2.2.1. και 2.2.2., καθώς δίνουν ίδια αποτελέσματα.	29
Εικόνα 2-9: Και στα 2 δοκίμια (10" x 10" και 4" x 6") χρησιμοποιείται μία 800x600 διακριτικότητα για την απεικόνιση των εικόνων. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι μόνο μερικές <i>pixel</i> στήλες δείχνουν τις εικόνες των δοκιμίων. Με τις πληροφορίες που δίνονται, μόνο το ζ_h μπορεί να υπολογιστεί.	29
Εικόνα 2-10: Στο ορθογώνιο δοκίμιο 8" x 3" χρησιμοποιείται μία διακριτικότητα 1280x960 για την απεικόνιση της εικόνας. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι μόνο μερικές <i>pixel</i> γραμμές δείχνουν την εικόνα του δοκιμίου. Με τις πληροφορίες που δίνονται μπορεί να υπολογιστεί μόνο το ζ_w	30
Εικόνα 2-11: Εστιακή Απόσταση σε μία ψηφιακή κάμερα.....	31
Εικόνα 2-12: Παραμόρφωση τύπου «βαρέλι» (αριστερά) και τύπου «πινέζα» (δεξιά).	31
Εικόνα 2-13: Καλό σχέδιο στιγμάτων.	32
Εικόνα 2-14: Ένα μεσαίο μαύρο στίγμα μεγεθυμένο. Το μαύρο στίγμα έχει περίπου 15 <i>pixels</i> πλάτος και 20 <i>pixels</i> ύψος.	32
Εικόνα 3-1: Ψηφιακή κάμερα του Vic-2D.....	34
Εικόνα 3-2: Κατασκευή σχεδίου στιγμάτων.	35
Εικόνα 3-3: Μέτρηση του μήκους των μαύρων στιγμάτων.	35
Εικόνα 3-4: Η Διάταξη του Vic-2D.	36
Εικόνα 3-5: Εικόνα που έχει ληφθεί με την ψηφιακή κάμερα.....	36
Εικόνα 4-1: 1 ^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.	38
Εικόνα 4-2: 2 ^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.	39
Εικόνα 4-3: 3 ^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.	39
Εικόνα 4-4: 4 ^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.	39

Εικόνα 4-5: 5 ^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.	40
Εικόνα 4-6: 1 ^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.....	41
Εικόνα 4-7: 2 ^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.....	41
Εικόνα 4-8: 3 ^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.....	41
Εικόνα 4-9: 4 ^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.....	42
Εικόνα 4-10: 5 ^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.....	42
Εικόνα 4-11: 1 ^η φάση πειράματος άνω κίνησης.....	43
Εικόνα 4-12: 2 ^η φάση πειράματος άνω κίνησης.....	43
Εικόνα 4-13: 3 ^η φάση πειράματος άνω κίνησης.....	43
Εικόνα 4-14: 4 ^η φάση πειράματος άνω κίνησης.....	44
Εικόνα 4-15: 5 ^η φάση πειράματος άνω κίνησης.....	44
Εικόνα 4-16: 1 ^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.	45
Εικόνα 4-17: 2 ^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.	45
Εικόνα 4-18: 3 ^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.	45
Εικόνα 4-19: 4 ^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.	46
Εικόνα 4-20: 5 ^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.	46
Εικόνα 4-21: Οι άξονες των μετατοπίσεων και τα πρόσημα τους.....	47
Εικόνα 5-1: Η διάταξη του συστήματος στο εργαστήριο.	52
Εικόνα 5-2: Η εικόνα αναφοράς.	53
Εικόνα 5-3: Παραμορφωμένη εικόνα: 1 ^η φάση παραμόρφωσης-Δημιουργία ρωγμής.....	54
Εικόνα 5-4: Παραμορφωμένη εικόνα: 2 ^η φάση παραμόρφωσης.	54
Εικόνα 5-5: Παραμορφωμένη εικόνα: 3 ^η φάση παραμόρφωσης.	55
Εικόνα 5-6: Επιλογή <i>timed capture</i>	56
Εικόνα 5-7: Επιλογή <i>flex capture</i>	56
Εικόνα 5-8: Η γραμμή εργαλείων του προγράμματος <i>Vic-2D</i>	56
Εικόνα 5-9: Επιλογή παραμορφωμένων εικόνων.	57
Εικόνα 5-10: Οι εικόνες που έχουν φορτωθεί, έτσι όπως φαίνονται από το πρόγραμμα.	57
Εικόνα 5-11: Επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος.....	58
Εικόνα 5-12: Η έναρξη της διαδικασίας της συσχέτισης (<i>run correlation</i>).	59
Εικόνα 5-13: Τα δεδομένα που εξάγονται μετά τη διαδικασία της συσχέτισης.....	59
Εικόνα 5-14: Υπολογισμός των ανηγμένων παραμορφώσεων.	60
Εικόνα 5-15: Η εικόνα που χρησιμοποιείται για το <i>calibration</i>	61
Εικόνα 5-16: Η διαδικασία του καλιμπραρίσματος των εικόνων.....	61
Εικόνα 5-17: Οι μεταβλητές (<i>variables</i>) που εξετάζονται, έτσι όπως φαίνονται από το πρόγραμμα.	62
Εικόνα 5-18: Η κλίμακα που απεικονίζει την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή των χρωμάτων.....	62
Εικόνα 5-19: Η οριζόντια θέση X σημείων σε mm.	63

Εικόνα 5-20: Η κατακόρυφη θέση Y σημείων σε mm.....	64
Εικόνα 5-21: Η αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων των εικόνων, όπως φαίνεται στο σχήμα των οριζόντιων θέσεων X	65
Εικόνα 5-22: Η αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων των εικόνων, όπως φαίνεται στο σχήμα των κατακόρυφων θέσεων.....	66
Εικόνα 5-23: Το πεδίο μετατοπίσεων U κατά X της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.....	67
Εικόνα 5-24: Το πεδίο μετατοπίσεων U κατά X της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.....	67
Εικόνα 5-25: Το πεδίο μετατοπίσεων U κατά X της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.....	68
Εικόνα 5-26: Το πεδίο μετατοπίσεων U κατά X της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.....	68
Εικόνα 5-27: Το σχήμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 7 ^η παραμορφωμένη εικόνα.....	69
Εικόνα 5-28: Το σχήμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8 ^η παραμορφωμένη εικόνα.....	70
Εικόνα 5-29: Το σχήμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 9 ^η παραμορφωμένη εικόνα.....	70
Εικόνα 5-30: Το πεδίο μετατοπίσεων V κατά Y της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.....	71
Εικόνα 5-31: Το πεδίο μετατοπίσεων V κατά Y της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.....	72
Εικόνα 5-32: Το πεδίο μετατοπίσεων V κατά Y της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.....	72
Εικόνα 5-33: Το πεδίο μετατοπίσεων V κατά Y της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.....	73
Εικόνα 5-34: Το σχήμα των κάθετων μετατοπίσεων V της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 7 ^η παραμορφωμένη εικόνα.....	74
Εικόνα 5-35: Το σχήμα των κάθετων μετατοπίσεων V της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8 ^η παραμορφωμένη εικόνα.....	74
Εικόνα 5-36: Το σχήμα των κάθετων μετατοπίσεων V της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 9 ^η παραμορφωμένη εικόνα.....	75
Εικόνα 5-37: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.....	76
Εικόνα 5-38: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.....	76
Εικόνα 5-39: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.....	77
Εικόνα 5-40: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.....	77
Εικόνα 5-41: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 7 ^η παραμορφωμένη εικόνα.....	78
Εικόνα 5-42: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8 ^η παραμορφωμένη εικόνα.....	79
Εικόνα 5-43: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 9 ^η παραμορφωμένη εικόνα.....	79
Εικόνα 5-44: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.....	80
Εικόνα 5-45: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.....	81

Εικόνα 5-46: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.	81
Εικόνα 5-47: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.....	82
Εικόνα 5-48: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 7 ^η παραμορφωμένη εικόνα.	83
Εικόνα 5-49: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8 ^η παραμορφωμένη εικόνα.	83
Εικόνα 5-50: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 9 ^η παραμορφωμένη εικόνα.	84
Εικόνα 5-51: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	85
Εικόνα 5-52: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	85
Εικόνα 5-53: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.	86
Εικόνα 5-54: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.....	86
Εικόνα 5-55: Το σχήμα των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 7 ^η παραμορφωμένη εικόνα.	88
Εικόνα 5-56: Το σχήμα των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8 ^η παραμορφωμένη εικόνα.	88
Εικόνα 5-57: Το σχήμα των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 9 ^η παραμορφωμένη εικόνα.	89
Εικόνα 5-58: Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση σημείων, γραμμών, κύκλων πάνω στις <i>contour</i> εικόνες.	89
Εικόνα 5-59: Τα 2 σημεία που εξετάζονται, το ένα στα αριστερά και το άλλο στα δεξιά του δείγματος.	90
Εικόνα 5-60: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 2 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	91
Εικόνα 5-61: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 3 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	92
Εικόνα 5-62: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 4 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	93
Εικόνα 5-63: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 5 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	94
Εικόνα 5-64: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 6 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	95
Εικόνα 5-65: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	96
Εικόνα 5-66: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	97
Εικόνα 5-67: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	98

Εικόνα 5-68: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	99
Εικόνα 5-69: Τα 2 σημεία που εξετάζονται, το ένα στο πάνω και το άλλο στο κάτω μέρος του δείγματος.	101
Εικόνα 5-70: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 2 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	102
Εικόνα 5-71: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 3 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	103
Εικόνα 5-72: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 4 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	104
Εικόνα 5-73: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 5 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	105
Εικόνα 5-74: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 6 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	106
Εικόνα 5-75: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	107
Εικόνα 5-76: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	108
Εικόνα 5-77: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	109
Εικόνα 5-78: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	110
Εικόνα 5-79: Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση των γραμμών πάνω στις <i>contour</i> εικόνες.	112
Εικόνα 5-80: Οι επιλογές που υπάρχουν στο πρόγραμμα για την παρουσίαση των διαγραμμάτων.	112
Εικόνα 5-81: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι μετατοπίσεις U της παραμορφωμένης εικόνας 9.	113
Εικόνα 5-82: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις U της παραμορφωμένης εικόνας 10.	115
Εικόνα 5-83: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις U της παραμορφωμένης εικόνας 9.	117
Εικόνα 5-84: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις U της παραμορφωμένης εικόνας 10.	119
Εικόνα 5-85: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι κάθετες μετατοπίσεις V της παραμορφωμένης εικόνας 9.	121
Εικόνα 5-86: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι κάθετες μετατοπίσεις V της παραμορφωμένης εικόνας 10.	123
Εικόνα 5-87: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι κάθετες μετατοπίσεις V της παραμορφωμένης εικόνας 9.	125
Εικόνα 5-88: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι κάθετες μετατοπίσεις V της παραμορφωμένης εικόνας 10.	127
Εικόνα 5-89: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 9.	129

Εικόνα 5-90: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 10.	131
Εικόνα 5-91: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 9.	133
Εικόνα 5-92: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 10.	135
Εικόνα 5-93: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 9.	137
Εικόνα 5-94: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 10.	139
Εικόνα 5-95: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 9.	141
Εικόνα 5-96: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 10.	143
Εικόνα 5-97: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 9.	145
Εικόνα 5-98: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 10.	147
Εικόνα 5-99: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 9.	149
Εικόνα 5-100: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 10.	151
Εικόνα 5-101: Οι εντολές που επιτρέπουν την εμφάνιση των βελών των τάσεων.	153
Εικόνα 5-102: Τα βέλη των μέγιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 9.	153
Εικόνα 5-103: Τα βέλη των ελάχιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 9.	154
Εικόνα 5-104: Τα βέλη των μέγιστων και των ελάχιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 9.	154
Εικόνα 5-105: Τα βέλη των μέγιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 10.	155
Εικόνα 5-106: Τα βέλη των ελάχιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 10.	155
Εικόνα 5-107: Τα βέλη μέγιστων και ελάχιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 10.	156
Εικόνα 6-1: Το δείγμα <i>plexiglass</i> , με το οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα.	157
Εικόνα 6-2: Οι μετατοπίσεις U της 2 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	160
Εικόνα 6-3: Οι μετατοπίσεις U της 3 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	161
Εικόνα 6-4: Οι μετατοπίσεις της 4 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	161
Εικόνα 6-5: Οι μετατοπίσεις της 5 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	162
Εικόνα 6-6: Οι μετατοπίσεις U της 6 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	162
Εικόνα 6-7: Οι μετατοπίσεις U της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	163
Εικόνα 6-8: Οι μετατοπίσεις U της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	163
Εικόνα 6-9: Οι μετατοπίσεις U της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	164
Εικόνα 6-10: Οι μετατοπίσεις U της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	164
Εικόνα 6-11: Οι μετατοπίσεις U της 11 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.	165

Εικόνα 6-77: Σημεία της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.	203
Εικόνα 6-78: Σημεία της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.	204
Εικόνα 6-79: Σημεία της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.	205
Εικόνα 6-80: Σημεία της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.	206
Εικόνα 6-81: Εικόνα-Σημεία της 11 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.	207
Εικόνα 6-82: Σημεία της 12 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.	208
Εικόνα 6-83: Σημεία της 13 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.	209
Εικόνα 6-84: Σημεία της 14 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.	210
Εικόνα 6-85: Σημεία της 15 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.	211
Εικόνα 6-86: Σημεία της 2 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	212
Εικόνα 6-87: Σημεία της 3 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	213
Εικόνα 6-88: Σημεία της 4 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	214
Εικόνα 6-89: Σημεία της 5 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	215
Εικόνα 6-90: Σημεία της 6 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	216
Εικόνα 6-91: Σημεία της 7 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	217
Εικόνα 6-92: Σημεία της 8 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	218
Εικόνα 6-93: Σημεία της 9 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	219
Εικόνα 6-94: Σημεία της 10 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	220
Εικόνα 6-95: Σημεία της 11 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	221
Εικόνα 6-96: Σημεία της 12 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	222
Εικόνα 6-97: Σημεία της 13 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	223
Εικόνα 6-98: Σημεία 14 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	224
Εικόνα 6-99: Σημεία της 15 ^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.	225
Εικόνα 7-1: Μη ικανοποιητικό αποτέλεσμα από πείραμα θλίψης με δείγμα γύψου διαμέτρου 53 mm, λόγω ακατάλληλου σχεδίου στιγμάτων.	226
Εικόνα 7-2: Μη ικανοποιητικό αποτέλεσμα από πείραμα θλίψης με δείγμα ξύλου διαστάσεων 30*30 mm, λόγω ακατάλληλου σχεδίου στιγμάτων.	227
Εικόνα 7-3: Δείγμα γύψου διαμέτρου 120 mm, που έχει δεχθεί μεγάλη στροφή κατά τη διαδικασία της θλίψης.	228
Εικόνα 8-1: Δείγμα μαρμάρου διαμέτρου 92 mm.	229
Εικόνα 8-2: Δείγμα ξύλου διαστάσεων 30*30mm.	229
Εικόνα 8-3: Δείγμα γύψου διαμέτρου 120 mm.	230
Εικόνα 8-4: Δείγμα γύψου διαμέτρου 53 mm.	230

1. Εισαγωγή

Ο υπολογισμός των μετατοπίσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων αποτελούσε πάντοτε ένα σημαντικό θέμα στην εξέλιξη των ιδιοτήτων των υλικών, όπως στις δυνάμεις των υλικών ή σε παραμέτρους συναρτήσεων και σε πειραματική ανάλυση τάσεων.

Η ανηγμένη παραμόρφωση σε οποιοδήποτε υλικό μπορεί να οριστεί ως ο συντελεστής της αλλαγής του μήκους και του αρχικού μήκους. Οι ανηγμένες παραμορφώσεις συμπεριλαμβάνονται σε πολλές σημαντικές ιδιότητες και παραμέτρους των υλικών (Strain-Stress Curve, Young's Modulus, Poisson's Ratio κλπ). Πρόσφατα, νέες και πιο περίπλοκες έρευνες απαιτούν τον υπολογισμό ανηγμένων παραμορφώσεων σε κάθε σημείο μέσα σε μία ορισμένη περιοχή ενδιαφέροντος των δειγμάτων, διότι σκοπός τους είναι να βελτιωθεί η μελέτη της συμπεριφοράς υλικών και δομικών συστατικών. Για αυτό το λόγο, οι ερευνητές ενδιαφέρονται για τα σχήματα των ανηγμένων παραμορφώσεων που αφορούν ολόκληρη την επιφάνεια των δοκιμίων που εξετάζονται. Μερικά όργανα, τα οποία μετρούν ανηγμένες παραμορφώσεις, δεν έχουν τη δυνατότητα να παράγουν σχήματα, όπως αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, διότι κάτι τέτοιο θα ήταν οικονομικά ασύμφορο και καθόλου πρακτικό.

Οπτικές μέθοδοι, όπως η συμβολομετρία *moiré* (Post, 1983), η ολογραφία (Fottenburg, 1969) και η συμβολομετρία σιγμάτων (Wang, Chen και Chiang, 1993) έχουν αποδείξει ότι αποτελούν ώριμες μεθόδους για την ανάλυση μακροσκοπικών παραμέτρων και χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Από την άλλη, όλες οι συμβολομετρικές μέθοδοι έχουν αυστηρές απαιτήσεις για τη σταθερότητα του συστήματος. Επιπλέον, η διαδικασία σχεδίασης κροσσών (*fringe*) είναι επίπονη και καταναλώνει πολύ χρόνο. Αυτή η τεχνική δυσκολία προσέκλυσε το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών και την ανάπτυξη διαδικασιών αυτοματοποίησης της διαδικασίας των δεδομένων από τα σχέδια κροσσών (Bastawros και Voloshin, 1990).

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η απεικόνιση των ανηγμένων παραμορφώσεων είναι απαραίτητη σε νέες έρευνες, τις τελευταίες δεκαετίες, αναπτύχθηκε από τον Sutton *et al.* (1983, 1986, 1988, 1991) και τον Bruck *et al.* (1989) μία καινούργια τεχνολογική μέθοδος, μία οπτική μέθοδος, η συσχέτιση ψηφιακών εικόνων (*digital image correlation*), και εφαρμόστηκε στη μέτρηση των μετατοπίσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων. Δηλαδή, παράγει σχέδια ισαριθμικών καμπύλων (απεικονίσεις που εμφανίζουν ισαριθμικές καμπύλες σε διάφορα χρώματα) ανηγμένων παραμορφώσεων μίας ολόκληρης επιφάνειας διαφόρων δοκιμίων που υποβάλλονται σε πειράματα.

Οι εφαρμογές αυτής της μεθόδου περιλαμβάνουν μικροσκοπικές μετρήσεις ανηγμένων παραμορφώσεων σε ηλεκτρονικά πακέτα (Lu, 1998), πεδία ανηγμένων παραμορφώσεων σε αφρώδη, πλαστικά υλικά από πολυουρεθάνη, εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους (Zhang, Zhang και Cheng, 1999) και εκτίμηση των θερμικών ανηγμένων παραμορφώσεων συγκολλητικών ενώσεων (Lu, Yeh και Wyatt, 1998). Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε ακόμη και για την επί τούτου αξιολόγηση της κατάστασης της συντήρησης των *mural* νωπογραφιών (Spragnolo, *et al.*, 1997). Αυτή η μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα ενός απλού συστήματος και άμεση αντίληψη και έτσι, αποφεύγεται η δύσκολη ερμηνεία των συμβολομετρικών κροσσών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί δύο εικόνες με ομοιόμορφα διαμορφωμένες κουκκίδες, οι οποίες λήφθηκαν από μία βιντεοκάμερα στερεάς κατάστασης, για να αναπαραστήσουν τις καταστάσεις του αντικειμένου πριν και μετά την παραμόρφωση. Χρησιμοποιώντας την ιδέα της ψηφιοποίησης, η εικόνα μπορεί να χαρακτηριστεί από τα σχέδια διαφορετικών επιπέδων έντασης του φωτός. Τότε, και οι δύο ψηφιοποιημένες εικόνες συσχετίζονται από έναν αλγόριθμο, ο οποίος βασίζεται στον συντελεστή κοινής συσχέτισης ή σε άλλες στατιστικές συναρτήσεις, έτσι ώστε να βρεθούν οι λεπτές διαφορές ανάμεσά τους.

Πρόσφατα, το εργαστήριο Δομικής Μηχανικής, του τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, του οποίου υπεύθυνος είναι ο κ. Σακελλαρίου, προμηθεύτηκε από τη Γερμανία το σύστημα *Vic-2D*, το οποίο χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στην Ελλάδα. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από μία ψηφιακή κάμερα, η οποία ενώνεται, μέσω καλωδίου, με υπολογιστή που περιέχει το κατάλληλο λογισμικό. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις των πεδίων των μετατοπίσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων μίας σειράς δισδιάστατων εικόνων επιφανειών διαφόρων δοκιμίων που εξετάζονται, και έχουν ληφθεί με την κάμερα. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται, παρουσιάζονται ως σχέδια ισარიθμικών καμπύλων (*contour maps*). Υπάρχει, επίσης, και η δυνατότητα προσθήκης σημείων πάνω στα σχέδια αυτά, τα οποία δείχνουν τις τιμές των μετατοπίσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων, καθώς και η δυνατότητα εξαγωγής διαγραμμάτων.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι, καταρχάς, η εκμάθηση του συστήματος κάμερα-πρόγραμμα και ο καλός χειρισμός του, αλλά όχι η ανάλυση των τάσεων. Επιπρόσθετα, θεωρήθηκε σημαντική η πραγματοποίηση απλών πειραμάτων θλίψης διαφόρων δειγμάτων από υλικά όπως πχ, ξύλο, μάρμαρο, γύψο και τσιμέντο και η κατανόηση των αποτελεσμάτων που εξάγονται από το πρόγραμμα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα δείγματα γύψου και τσιμέντου κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο. Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν και πειράματα τύπου βραζιλιανής δοκιμής με δείγματα από υλικά όπως αυτά που προαναφέρθηκαν. Τέλος, κρίθηκε σκόπιμο να παρατηρηθεί η συμπεριφορά κατά τη θλίψη ενός κυκλικού δίσκου με κεντρική οπή, κατασκευασμένου από *plexiglass*, καθώς και να σχολιαστούν τα αποτελέσματα που λαμβάνονται.

Η δομή της παρούσας εργασίας ακολουθεί την παρακάτω μορφή:

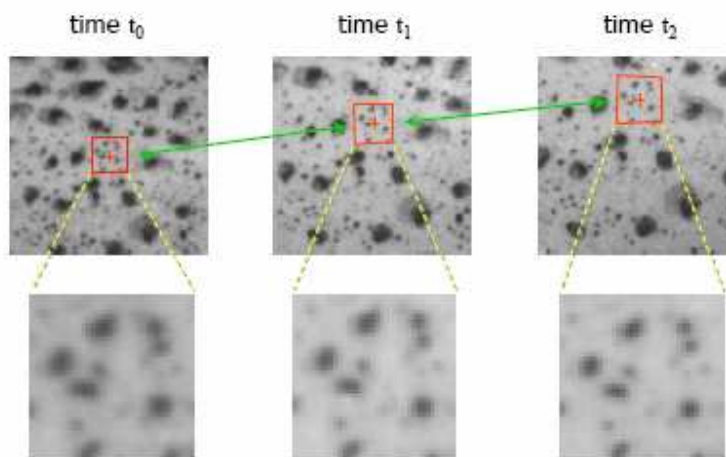
Αρχικά, στο **2^ο κεφάλαιο**, αναλύονται κάποιες θεωρητικές έννοιες, οι οποίες είναι αναγκαίες για την κατανόηση των κεφαλαίων που έπονται. Στο επόμενο κεφάλαιο (**3^ο κεφάλαιο**) περιγράφεται θεωρητικά, με λίγα λόγια η διάταξη και η λειτουργία του συστήματος *Vic-2D*. Στο **4^ο κεφάλαιο** αναλύονται μερικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, για να εξακριβωθεί και να επαληθευτεί το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αποτελεσμάτων των σχημάτων ισარიθμικών καμπύλων που προκύπτουν από το πρόγραμμα. Στο **5^ο κεφάλαιο** ακολουθεί μία εκτεταμένη περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος μέσω ενός πειράματος τύπου βραζιλιανής δοκιμής που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο με δείγμα μαρμάρου. Ακολουθεί το **6^ο κεφάλαιο** στο οποίο μελετάται το πείραμα θλίψης ενός κυκλικού δίσκου με κεντρική οπή, κατασκευασμένου από *plexiglass*, καθώς επίσης παρατίθενται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα. Εν συνεχεία, στο **7^ο κεφάλαιο** εξετάζεται η ποιότητα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Τέλος, στο **8^ο κεφάλαιο** εξάγονται κάποια συμπεράσματα για το πρόγραμμα, τα αποτελέσματα που δίνει, και γενικά, γίνεται μία συζήτηση για τα πράγματα που αποκομίστηκαν, για τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και της εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας, καθώς επίσης και για προτάσεις για συνέχεια της εργασίας ή της έρευνας πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

2. Θεωρητικό Μέρος

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάλυση διαφόρων θεωρητικών εννοιών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση των θεμάτων που θα ακολουθήσουν παρακάτω. Μερικά από τα θεωρητικά στοιχεία που θα αναπτυχθούν είναι η μέθοδος της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων, η κατάλληλη προετοιμασία του προς φωτογράφιση δείγματος και η δημιουργία ενός σωστού σχεδίου πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια, όπως και η σχέση της εστιακής απόστασης της κάμερας και του δείγματος.

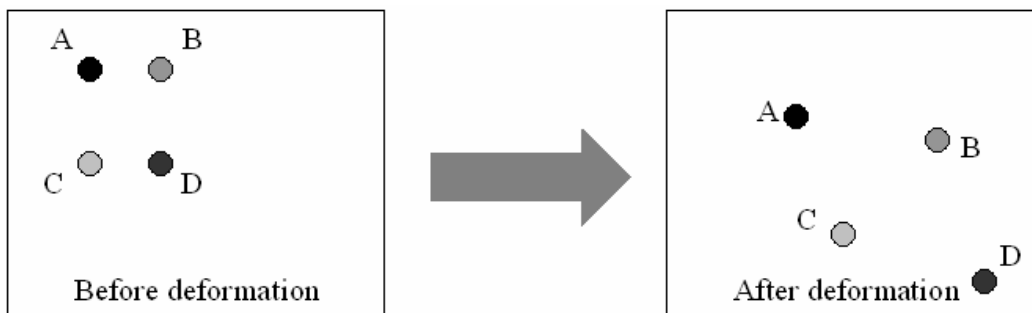
2.1. Η Μέθοδος της Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων

Η συσχέτιση ψηφιακών εικόνων (*digital image correlation*) είναι μία οπτική μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί μία ανάλυση μαθηματικής συσχέτισης για να εξετάσει δεδομένα ψηφιακών εικόνων, οι οποίες λαμβάνονται κατά τη διάρκεια πειραμάτων με δείγματα από διάφορα υλικά. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη διαδοχική λήψη εικόνων με ψηφιακή κάμερα κατά τη διάρκεια του πειράματος της παραμόρφωσης, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η αλλαγή στα επιφανειακά χαρακτηριστικά του δείγματος και να κατανοηθεί η συμπεριφορά του καθώς δέχεται φορτία. Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, το δείγμα χρειάζεται κατάλληλη προετοιμασία, δηλαδή χρειάζεται να δημιουργηθεί στην επιφάνειά του ένα τυχαίο σχέδιο σιγμάτων (*speckle pattern*).

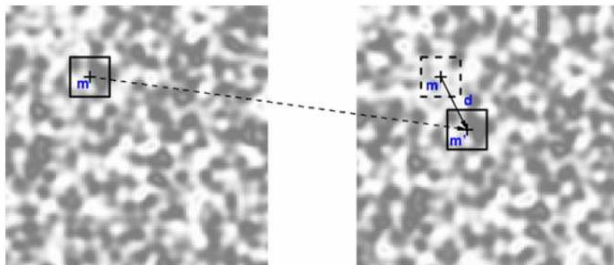


Εικόνα 2-1: Η διαδικασία της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων.

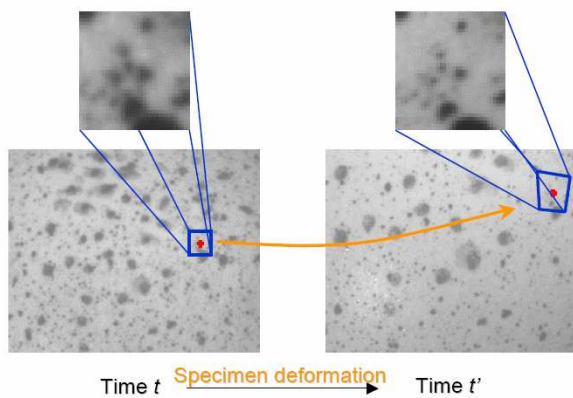
Η διαδικασία αυτή αρχίζει με τη λήψη μίας εικόνας αναφοράς (*reference image*), πριν από τη φόρτιση του δοκιμίου. Ύστερα λαμβάνεται μια σειρά από εικόνες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της φόρτισης (*deformed images*). Όλες οι παραμορφωμένες εικόνες απεικονίζουν ένα τυχαίο διαφορετικό κάθε φορά σχέδιο, το οποίο συσχετίζεται με την αρχική και μη παραμορφωμένη εικόνα αναφοράς. Με κατάλληλο λογισμικό στον υπολογιστή, αυτές οι διαφορές μεταξύ των σχεδίων μπορούν να υπολογιστούν συσχετίζοντας όλα τα *pixels* της εικόνας αναφοράς και καθεμιάς από τις παραμορφωμένες εικόνες. Παράλληλα, μπορούν να παραχθούν σχέδια μετατοπίσεων και παραμορφώσεων.



Εικόνα 2-2: Η εικόνα πριν την παραμόρφωση δείχνει 4 τελείες διαφορετικών τόνων του γκρι, οι οποίες αναπαριστούν 4 διαφορετικά *pixels*. Η εικόνα μετά την παραμόρφωση δείχνει τις ίδιες 4 τελείες, αλλά τώρα αναπαριστούν 4 διαφορετικά *pixels*. Το λογισμικό του υπολογιστή υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ της θέσης των τελειών (*pixels*) των διαφορετικών εικόνων και τις συσχετίζει για να καθορισθεί η παραμόρφωση.



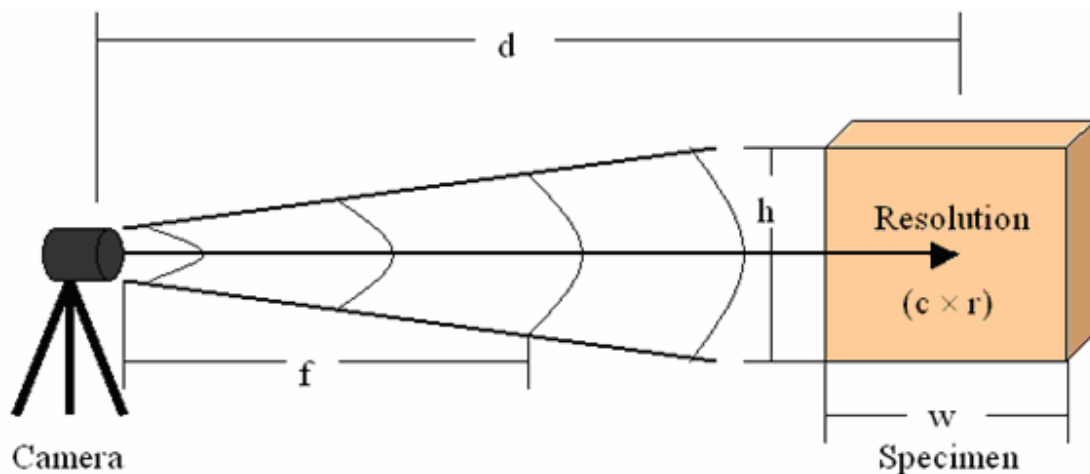
Εικόνα 2-3: Η μεταφορά του *pixel* από την εικόνα αναφοράς στην παραμορφωμένη.



Εικόνα 2-4: Η διαδικασία της μεταφοράς περιέχει και παραμόρφωση.

Η συσχέτιση ψηφιακών εικόνων απαιτεί την ύπαρξη λογισμικού στον υπολογιστή και κατάλληλη ψηφιακή κάμερα. Για την επίτευξη σωστών μετρήσεων σκόπιμο είναι να ληφθούν υπόψη μερικές μεταβλητές, διότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται από αυτές. Έτσι, λοιπόν, έχουμε:

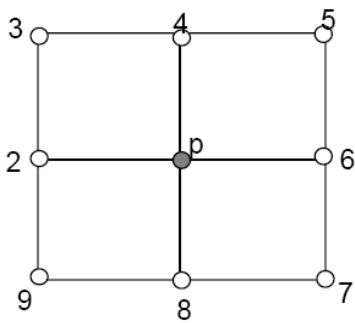
- $pixel$ στήλες (c) * $pixel$ γραμμές (r)
- το πλάτος του δοκιμίου (w)
- το ύψος του δοκιμίου (h)
- την απόσταση μεταξύ κάμερας και δοκιμίου (d)
- την εστιακή απόσταση των φακών (f) και
- την εφαρμογή του προτύπου



Εικόνα 2-5: Μερικές μεταβλητές, οι οποίες περιλαμβάνονται στη μέθοδο της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων.

Η συσχέτιση ψηφιακών εικόνων είναι μία εφαρμογή που βασίζεται στη σύγκριση δύο εικόνων, οι οποίες λαμβάνονται σε διαφορετικές καταστάσεις, η μία πριν και η άλλη μετά την παραμόρφωση. Έτσι, επιλέγονται δύο υποσύνολα από την εικόνα αναφοράς και τις παραμορφωμένες εικόνες για συσχέτιση. Ο αλγόριθμος της συσχέτισης, που εντοπίζει τις τοπικές μετατοπίσεις u και v συγκρίνοντας τα δύο υποσύνολα, ακολουθεί παρακάτω:

Το ενδιαφερόμενο σημείο στην εικόνα αναφοράς χαρακτηρίζεται από ένα ορθογώνιο υποσύνολο, μία $(n * m)$ *pixel* περιοχή. Το αντίστοιχο υποσύνολο, το οποίο είναι επίσης μία $(n * m)$ *pixel* περιοχή, υπολογίζεται στην παραμορφωμένη εικόνα σε μία συγκεκριμένη θέση με ένα καθορισμένο εύρος. Μία λεπτή αναζήτηση, *pixel* προς *pixel*, πραγματοποιείται μέσα στο καθορισμένο εύρος στην παραμορφωμένη εικόνα. Η πλησιέστερη θέση p στο επίπεδο του *pixel*, επιλέγεται βασισμένη στην εμφάνιση του καλύτερα ταιριασμένου σχεδίου (Press, *et al.*, 1992), το οποίο έχει τη μικρότερη τιμή του κοινού διαγώνιου συντελεστή (*cross coefficient*) $r(i, j)$.



Εικόνα 2-6: Η θέση p είναι η πλησιέστερη θέση στην πραγματική λύση (u, v) σε επίπεδο *pixel*. Οι 2-9 είναι θέσεις των 8 γειτονικών *pixels*.

$${}^1 r(i, j) = 1 - \frac{\sum A(i, j)B(i^*, j^*)}{\left(\sum A(i, j)^2 * \sum B(i^*, j^*)^2\right)^{1/2}} \quad (\text{εξίσωση 2.1.1.})$$

Όπου:

- $A(i, j)$ είναι το γκρι επίπεδο (*gray level*) στη θέση (i, j) στην εικόνα αναφοράς
- $B(i^*, j^*)$ αναπαριστά το γκρι επίπεδο στη θέση (i^*, j^*) στην παραμορφωμένη εικόνα B

Η σχέση μεταξύ (i, j) και (i^*, j^*) μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως:

¹ Πηγή εξίσωσης 2.1.1.: Hung P.Ch., Voloshin A.S., "In-plane Strain Measurement by Digital Image Correlation"

$${}^2 i^* = i + u, j^* = j + v \quad (\text{εξίσωση 2.1.2.})$$

Όπου:

u, v αναπαριστούν τη μετατόπιση του *pixel* (i, j) στις οριζόντιες και κάθετες διευθύνσεις αντίστοιχα.

Το επόμενο βήμα είναι να αποφασιστούν οι ακριβείς τιμές u, v . Η επιλεγμένη και πλησιέστερη θέση p και οι θέσεις των 8 γειτονικών *pixels* θα σχηματίσουν μία κατάλληλη επιφάνεια, η οποία μπορεί να αναπαρασταθεί από μία τετραγωνική συνάρτηση 2 διαστάσεων $f(x, y)$.

$$f(x, y) = a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 \quad (\text{εξίσωση 2.1.3.})$$

Θεωρείται ότι οι μετατοπίσεις u και v μπορούν να καθοριστούν βασισμένες στη θέση της *minimum* τιμής της κατάλληλης επιφάνειας. Επομένως, για να βρεθούν οι τιμές u και v χρειάζεται να λυθεί ένα σύστημα 9 γραμμικών εξισώσεων:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{r} \quad (\text{εξίσωση 2.1.4.})$$

Όπου:

- \mathbf{B} είναι ένας πίνακας 9×6 , ο οποίος περιλαμβάνει την εκτίμηση κάθε όρου στη συνάρτηση $f(x, y)$
- \mathbf{a} είναι ένα διάνυσμα 6×1 , το οποίο αναπαριστά τους άγνωστους συντελεστές $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_6$
- \mathbf{r} είναι ένα διάνυσμα 9×1 , το οποίο περιλαμβάνει την εκτίμηση του $\mathbf{r}(i, j)$ στις θέσεις που περιγράφονται στην εικόνα 2-3. Αφού ο αριθμός των αγνώστων είναι μικρότερος από τον αριθμό των εξισώσεων, είναι αναμενόμενο να βρεθεί η λύση των ελαχίστων τετραγώνων σε αυτό το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων. Αυτό το σύστημα των εξισώσεων λύνεται χρησιμοποιώντας μία αριθμητική μέθοδο (Press, *et al.*, 1992), που ονομάζεται μοναδική αποσύνθεση αξίας (*singular value decomposition*), για να αποσυντεθεί ο πίνακας \mathbf{B} . Οι εκτιμήσεις των u και v μπορούν να αποκτηθούν λύνοντας τις παρακάτω γραμμικές εξισώσεις:

² Πηγή εξισώσεων 2.1.2., 2.1.3. και 2.1.4.: Hung P.Ch., Voloshin A.S., "In-plane Strain Measurement by Digital Image Correlation"

$${}^3 \begin{cases} \partial f / \partial x = 0 \\ \partial f / \partial y = 0 \end{cases} \quad (\text{εξίσωση 2.1.5.})$$

Τότε, τα πεδία μετατόπισης των u και v μπορούν να αποφασιστούν, απλώς αντικαθιστώντας διαφορετικό r διάνυσμα στην παραπάνω επαναληπτική διαδικασία.

2.2. Σχέση Διακριτικότητας Εικόνας και Διαστάσεων του Δοκιμίου

Η διακριτικότητα αναφέρεται στον αριθμό των *pixels* και περιγράφει τις λεπτομέρειες που μπορούν να εκτιμηθούν σε μία εικόνα. Η διακριτικότητα και η επιφάνεια του δοκιμίου μπορούν να συσχετιστούν για να αποφασιστεί η ποσότητα του χώρου που κάθε *pixel* θα αναπαραστήσει στην εικόνα του δοκιμίου. Για να αποφασιστεί η ποσότητα του χώρου που θα αναπαρασταθεί από ένα *pixel* μίας εικόνας, οι διαστάσεις του δοκιμίου (πλάτος και ύψος) πρέπει να είναι διαχωρισμένες από την διακριτικότητα της κάμερας (*pixel* στήλες και *pixel* γραμμές). Οι παρακάτω δύο εξισώσεις χρησιμοποιούνται για να επιλεγθεί ο κατάλληλος χώρος που θα καταλάβει ένα *pixel* σε μία συγκεκριμένη εικόνα.

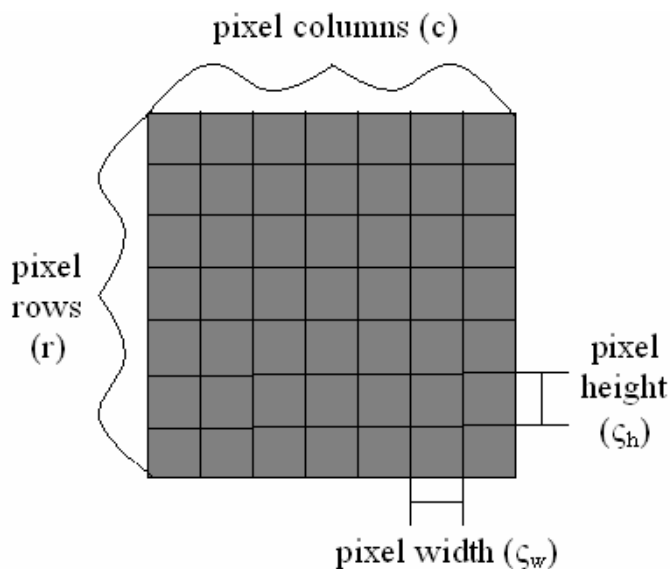
$${}^4 \zeta_w = \frac{w}{c} \quad (\text{εξίσωση 2.2.1.})$$

$$\zeta_h = \frac{h}{r} \quad (\text{εξίσωση 2.2.2.})$$

Η εξίσωση 2.2.1. υπολογίζει το πλάτος του *pixel* της εικόνας του δοκιμίου, όπου ζ_w είναι το πλάτος του *pixel*, w είναι το πλάτος του δοκιμίου και c ο αριθμός των *pixel* στηλών στην εικόνα. Η εξίσωση 2.2.2. υπολογίζει το ύψος του *pixel* της εικόνας του δοκιμίου, όπου ζ_h είναι το ύψος του *pixel*, h είναι το ύψος του δοκιμίου και r είναι ο αριθμός των *pixel* γραμμών στην εικόνα. Καθώς αυξάνεται η διακριτικότητα, η τιμή ζ μειώνεται και καθώς οι διαστάσεις του δοκιμίου αυξάνονται, η τιμή ζ αυξάνεται. Ανεξάρτητα από τις διαστάσεις του δοκιμίου, οι τιμές ζ_w και ζ_h είναι πάντοτε ίσες.

³ Πηγή εξίσωσης 2.1.5.: Hung P.Ch., Voloshin A.S., "In-plane Strain Measurement by Digital Image Correlation"

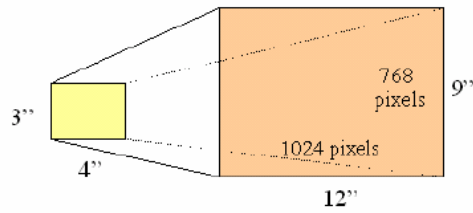
⁴ Πηγή εξισώσεων 2.2.1. και 2.2.2.: Cintrón R., Dr. Saouma V., (Summer 2008), "Strain Measurements with the Digital Image Correlation-System Vic-2D"



Εικόνα 2-7: Ένα τμήμα μίας ψηφιακής εικόνας με τις *pixel* στήλες και γραμμές του. Επίσης, αναπαριστά το ύψος και το πλάτος του *pixel*.

Όλες οι διακριτικότητες της ψηφιακής κάμερας έχουν ένα ⁵λόγο διαστάσεων (*aspect ratio*) 4:3 ή 3:2. Οι περισσότερες κοινές ψηφιακές κάμερες έχουν λόγο διαστάσεων 4:3 (πχ. 800x600, 1024x768, 1280x690). Για να εξηγηθεί η σχέση μεταξύ της διακριτικότητας της εικόνας και των διαστάσεων του δοκίμιου, χρησιμοποιούνται λόγοι διαστάσεων 4:3. Αξίζει να επισημανθεί ότι τα δείγματα πρέπει να καταλαμβάνουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χώρο σε μία εικόνα για να μεγιστοποιήσουν την ποσότητα των *pixels* που χρησιμοποιούνται. Με ένα λόγο διαστάσεων 4:3, η ιδανική επιφάνεια σε ένα δοκίμιο για να χρησιμοποιηθούν όλα τα *pixels* σε μία εικόνα είναι ένα ορθογώνιο με λόγο διαστάσεων 4:3, επίσης (πχ. 4" x 3", 8" x 6", 12" x 9" κλπ). Σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις 2.2.1. και 2.2.2.

⁵ Ο λόγος μεταξύ οριζόντιας και κάθετης διάστασης ενός ορθογώνιου αντικειμένου ή σχήματος. Στους υπολογιστές μπορεί να αναφέρεται, είτε στο σχήμα της οθόνης (4:3), είτε στο σχήμα του *pixel* (η τάση είναι 1:1). Αποτελεί παράμετρο μεγάλης σημασίας στα γραφικά, μια και μπορεί να επηρεάσει τη σωστή μεταφορά και αναπαραγωγή ενός σχήματος στη συσκευή απεικόνισης.

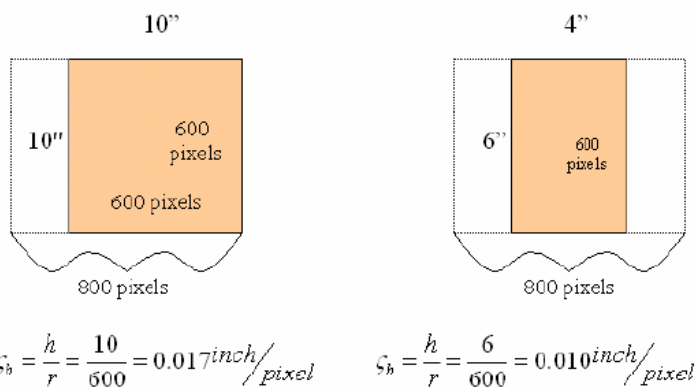


$$s_w = \frac{w}{c} = \frac{12}{1024} = 0.012 \text{ inch/pixel} \quad s_h = \frac{h}{r} = \frac{9}{768} = 0.012 \text{ inch/pixel}$$

$$\therefore s_w = s_h$$

Εικόνα 2-8: Στο ορθογώνιο δοκίμιο 3"× 4" χρησιμοποιείται μία 1024"× 768" διακριτικότητα για την απεικόνιση της εικόνας. Και οι 2 διαστάσεις του δοκιμίου και η διακριτικότητα της εικόνας έχουν ένα λόγο διαστάσεων 4:3. Όλες οι *pixel* στήλες και *pixel* γραμμές δείχνουν την εικόνα του δοκιμίου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι 2 εξισώσεις, δηλαδή οι 2.2.1. και 2.2.2., καθώς δίνουν ίδια αποτελέσματα.

Εάν η επιφάνεια του δοκιμίου έχει σχήμα τετράγωνο ή ορθογώνιο, του οποίου το πλάτος είναι μικρότερο από 1,33 φορές το ύψος του, η μόνη εξίσωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η εξίσωση 2.2.2. Η εξίσωση 2.2.1. δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη, διότι όλες οι *pixel* στήλες δεν θα χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν το δοκίμιο στην εικόνα. Είναι προφανές, ότι σε ένα τετραγωνικό δοκίμιο η ποσότητα των *pixel* στηλών θα είναι η ίδια με την ποσότητα των *pixel* γραμμών. Από την άλλη πλευρά, σε ένα ορθογωνικό δοκίμιο η ποσότητα των *pixel* στηλών μπορεί να υπολογιστεί με γεωμετρία, αλλά αυτό δεν είναι απαραίτητο, διότι τα αποτελέσματα των εξισώσεων 2.2.1. και 2.2.2. πρόκειται πάντοτε να είναι τα ίδια. Εάν οι *pixel* γραμμές και το ύψος του δοκιμίου είναι γνωστά, αυτό είναι αρκετό.

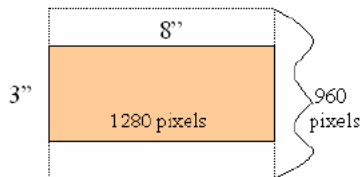


$$s_h = \frac{h}{r} = \frac{10}{600} = 0.017 \text{ inch/pixel}$$

$$s_h = \frac{h}{r} = \frac{6}{600} = 0.010 \text{ inch/pixel}$$

Εικόνα 2-9: Και στα 2 δοκίμια (10"× 10" και 4"× 6") χρησιμοποιείται μία 800×600 διακριτικότητα για την απεικόνιση των εικόνων. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι μόνο μερικές *pixel* στήλες δείχνουν τις εικόνες των δοκιμίων. Με τις πληροφορίες που δίνονται, μόνο το s_h μπορεί να υπολογιστεί.

Αν το δοκίμιο έχει ορθογωνικό σχήμα του οποίου το πλάτος είναι μεγαλύτερο από 1,33 φορές το ύψος, η μόνη εξίσωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η εξίσωση 2.2.1. Η εξίσωση 2.2.2. δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη, διότι όλες οι *pixel* γραμμές δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν το δοκίμιο στην εικόνα. Η ποσότητα των *pixel* γραμμών μπορεί να υπολογιστεί με γεωμετρία, αλλά αυτό δεν είναι απαραίτητο. Αν οι *pixel* στήλες και το πλάτος του δοκιμίου είναι γνωστά, αυτό είναι αρκετό.

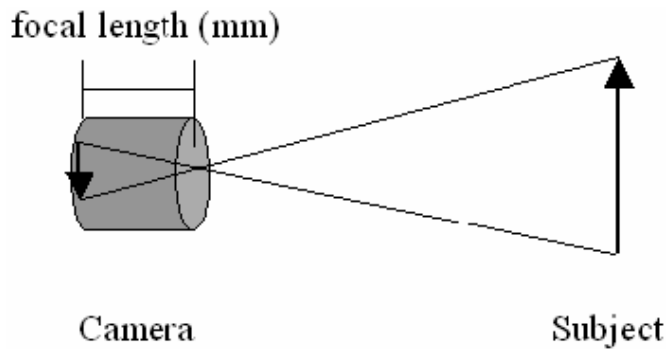


$$\zeta_w = \frac{w}{c} = \frac{8}{1280} = 0.006 \text{ inch/pixel}$$

Εικόνα 2-10: Στο ορθογώνιο δοκίμιο 8" x 3" χρησιμοποιείται μία διακριτικότητα 1280x960 για την απεικόνιση της εικόνας. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι μόνο μερικές *pixel* γραμμές δείχνουν την εικόνα του δοκιμίου. Με τις πληροφορίες που δίνονται μπορεί να υπολογιστεί μόνο το ζ_w .

2.3. Σχέση Εστιακής Απόστασης και Απόστασης μεταξύ Κάμερας-Δοκιμίου

Η εστιακή απόσταση είναι η απόσταση σε χιλιοστά μεταξύ του οπτικού κέντρου των φακών και του εστιακού σημείου στην επιφάνεια του αισθητήρα της κάμερας, όταν το αντικείμενο είναι ορθά εστιασμένο για να φωτογραφηθεί. Υπάρχουν 3 κατηγορίες εστιακής απόστασης και συνεπώς 3 κατηγορίες φακών, οι ευρυγώνιοι φακοί (εστιακή απόσταση < 35 mm), οι κανονικοί φακοί (35 mm < εστιακή απόσταση < 55mm) και οι τηλεγραφικοί (*telephoto*) φακοί (εστιακή απόσταση > 55 mm). Όσο μεγαλύτερη είναι η εστιακή απόσταση, τόσο κοντινότερα θα αποτυπωθεί η εικόνα στην ψηφιακή κάμερα.

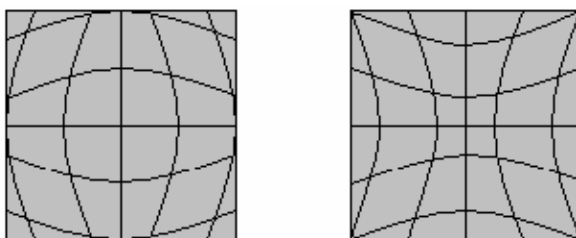


Εικόνα 2-11: Εστιακή Απόσταση σε μία ψηφιακή κάμερα.

Δεν είναι απαραίτητο να είναι γνωστή μια ακριβής απόσταση ή ένα εστιακό μήκος για διαφορετικές διαστάσεις δειγμάτων, επειδή μπορούν να ρυθμιστούν με διαφορετικούς τρόπους για να αποκτηθεί το δείγμα με τη φωτογραφική μηχανή. Αν η κάμερα χρειάζεται να βρίσκεται μακριά από το δοκίμιο, η εικόνα μπορεί να εστιαστεί χρησιμοποιώντας μία μεγάλη εστιακή απόσταση και αντίστροφα. Η απόσταση μεταξύ της κάμερας και του δοκιμίου εξαρτάται επίσης από τις διαστάσεις του δοκιμίου. Όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις του δοκιμίου, τόσο μεγαλύτερη θα πρέπει να είναι και η απόσταση μεταξύ της κάμερας και του δοκιμίου.

2.4. Τα Αποτελέσματα της Παραμόρφωσης

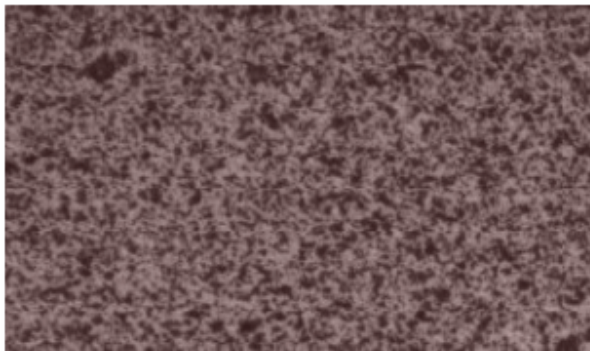
Τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης αποτελούν ένα πρόβλημα που επηρεάζει όλες τις ψηφιακές κάμερες. Η παραμόρφωση μπορεί να προσδιοριστεί καθώς τα ελαττώματα των φακών παράγουν μία ατελή εικόνα. Τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης μπορεί να παρουσιαστούν όταν οι φακοί είναι μεγεθυμένοι. Επίσης, για την αποφυγή αποτελεσμάτων παραμόρφωσης, οι εικόνες χρειάζεται να είναι κεντραρισμένες.



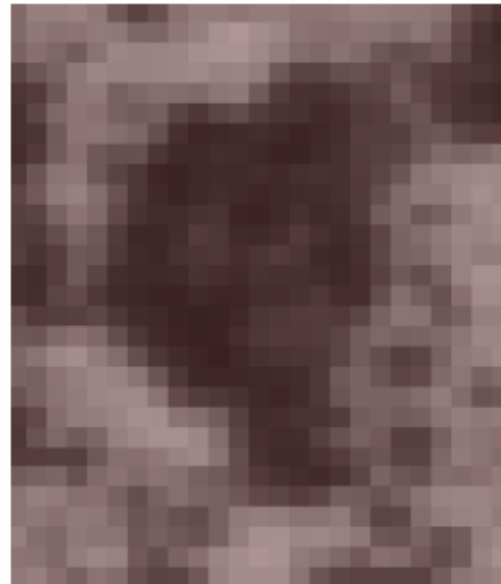
Εικόνα 2-12: Παραμόρφωση τύπου «βαρέλι» (αριστερά) και τύπου «πινέζα» (δεξιά).

2.5. Σχέδιο Στιγμάτων (*Speckle Pattern*)

Για να μελετηθεί η επιφάνεια του δοκιμίου, θα πρέπει να έχει δημιουργηθεί πάνω της ένα τυχαίο σχέδιο από τελείες, ένα σχέδιο στιγμάτων (*speckle pattern*). Η δημιουργία του σχεδίου αυτού είναι αναγκαία, διότι επιτρέπει στο λογισμικό να αναγνωρίζει και να υπολογίζει τις μετατοπίσεις με ακρίβεια. Για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων με τη συσχέτιση ψηφιακών εικόνων, είναι πολύ σημαντικό να πετύχουμε ένα ικανοποιητικό σχέδιο στιγμάτων. Ένα ικανοποιητικό σχέδιο στιγμάτων πρέπει να έχει μία σεβαστή ποσότητα μαύρων στιγμάτων διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών. Η αποτελεσματικότητά του μπορεί να προσδιοριστεί από την ποσότητα των *pixels* για κάθε μαύρο στίγμα. Ένα καλό σχέδιο στιγμάτων πρέπει να έχει ταυτόχρονα μικρά μαύρα στίγματα (10 *pixels*), μεσαία μαύρα στίγματα (20 *pixels*) και μεγάλα μαύρα στίγματα (30 *pixels*). Η ποσότητα των *pixels* κάθε μαύρου στίγματος προσεγγίζεται.



Εικόνα 2-13: Καλό σχέδιο στιγμάτων.



Εικόνα 2-14: Ένα μεσαίο μαύρο στίγμα μεγεθυμένο. Το μαύρο στίγμα έχει περίπου 15 *pixels* πλάτος και 20 *pixels* ύψος.

Για να αναγνωρισθεί το ιδανικό μέγεθος κάθε μαύρου στίγματος σε ένα δοκίμιο, μπορεί να συσχετιστεί το επιθυμητό μέγεθος του μαύρου στίγματος (μικρό, μεσαίο, μεγάλο) και η ποσότητα του χώρου που αντιπροσωπεύεται από ένα *pixel* στην εικόνα του δοκιμίου (ζ_w ή ζ_h). Αν γνωρίζουμε την ποσότητα των *pixels* που πρέπει να έχει οποιοδήποτε μαύρο στίγμα και το μέγεθος του *pixel* που απεικονίζεται σε μία εικόνα ενός δοκιμίου, το γινόμενό τους θα μας δώσει τις κατάλληλες διαστάσεις των μαύρων στιγμάτων στο δοκίμιο.

$${}^6 \zeta = p \times \varsigma$$

(εξίσωση 2.5.1.)

Με την εξίσωση 2.5.1. υπολογίζονται οι διαστάσεις ενός μαύρου στίγματος σε ένα δοκίμιο, όπου ζ είναι το μήκος του μαύρου στίγματος σε ένα δοκίμιο, p είναι η ποσότητα των *pixels* που πρέπει να έχει το επιθυμητό μέγεθος του μαύρου στίγματος και ς είναι το μέγεθος του *pixel* που αντιπροσωπεύεται σε μία εικόνα δοκιμίου (ς_w ή ς_h). Για την επίτευξη σωστών αποτελεσμάτων είναι πολύ σημαντικό να αποφευχθούν μαύρα στίγματα μεγαλύτερα των μεγάλων μαύρων στιγμάτων (30 *pixels*).

⁶ Πηγή εξίσωσης 2.5.1.: Cintrón R., Dr. Saouma V., (Summer 2008), “*Strain Measurements with the Digital Image Correlation-System Vic-2D*”

3. Το Σύστημα *Vic-2D*: Διάταξη και Λειτουργία

Το σύστημα *Vic-2D* αποτελεί ένα καινούργιο σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο της ψηφιακής συσχέτισης εικόνων για να υπολογίσει τις ανηγμένες παραμορφώσεις. Τα αποτελέσματα που δίνει είναι *contour* σχέδια δύο διαστάσεων και παράλληλα υπολογίζει τις ανηγμένες παραμορφώσεις και τις μετατοπίσεις της επιφάνειας του δείγματος που εξετάζεται. Ο εξοπλισμός περιλαμβάνει λογισμικό στον υπολογιστή και μία ψηφιακή κάμερα με κατάλληλους φακούς και διακριτικότητα. Η ψηφιακή κάμερα καταγράφει τις εικόνες κατά τη διάρκεια πειραμάτων και το λογισμικό αναλύει τις εικόνες και υπολογίζει οριζόντιες και κάθετες μετατοπίσεις, όπως επίσης και οριζόντιες, κάθετες ανηγμένες παραμορφώσεις και διατμητικές παραμορφώσεις. Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα αναφερθούν λίγα λόγια για τη σημασία του σχεδίου στιγμάτων, τη διαδικασία λήψης των εικόνων και τη λειτουργία του λογισμικού.



Εικόνα 3-1: Ψηφιακή κάμερα του *Vic-2D*.

3.1. Η Σημασία του Σχεδίου Στιγμάτων

Για την πραγματοποίηση μετρήσεων των ανηγμένων παραμορφώσεων με το *Vic-2D* είναι αναγκαίο να έχουμε ένα καλό σχέδιο στιγμάτων. Το σχέδιο στιγμάτων μπορεί να είναι φυσικό ή να έχει δημιουργηθεί με τεχνητό τρόπο χρησιμοποιώντας άσπρη και μαύρη μπογιά. Το δοκίμιο του πειράματος τοποθετήθηκε σε ένα πλαίσιο φόρτισης (*loading frame*) και τα σχέδια στιγμάτων αποκτήθηκαν στις διάφορες καταστάσεις φόρτισης. Για να δημιουργηθεί ένα χαρακτηριστικό σχέδιο, φτιάχνεται ένα άσπρο φόντο ζωγραφίζοντας την επιφάνεια του δείγματος με άσπρη μπογιά (με πινέλο ή σπρέυ) και στη συνέχεια απλώνεται ένα μαύρο νέφος μπογιάς (σπρέυ) για να δημιουργηθούν τα μαύρα στίγματα. Για να απλωθεί η μαύρη μπογιά, είναι καλό να κρατηθεί απόσταση 2 πόδια περίπου μεταξύ του δείγματος και του δοχείου του σπρέυ. Το σχέδιο στιγμάτων πρέπει να δημιουργηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση μεταξύ του μεγέθους του *pixel* μίας εικόνας ενός δείγματος και την ποσότητα των *pixels* για κάθε μαύρο στίγμα (εξίσωση 2.5.1.).



Εικόνα 3-2: Κατασκευή σχεδίου στιγμάτων.



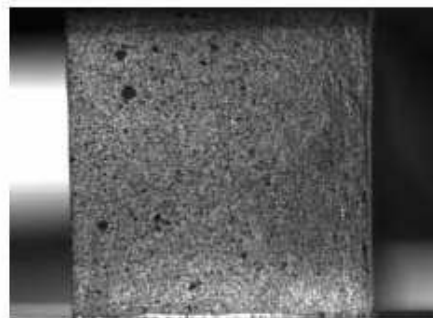
Εικόνα 3-3: Μέτρηση του μήκους των μαύρων στιγμάτων.

3.2. Η Διαδικασία της Λήψης των Εικόνων

Για τη λήψη εικόνων κατά τη διάρκεια της φόρτισης, το δοκίμιο πρέπει να έχει προετοιμαστεί κατάλληλα για το πείραμα. Αφού, λοιπόν, το δείγμα και η μηχανή θλίψης θα έχουν ετοιμαστεί, επιλέγεται κατάλληλη θέση (όσο το δυνατόν πιο προσιτή), για να τοποθετηθεί η ψηφιακή κάμερα, και προσαρμόζεται η εστιακή απόσταση για μία όσο το δυνατόν πιο καθαρή εικόνα. Ύστερα, διορθώνεται η σειρά ανοιγμάτων (*aperture range*) των φακών της κάμερας με το όσο το δυνατόν χαμηλότερο *f*-αριθμό για να επιτραπεί η διείσδυση της μέγιστης ποσότητας φωτός. Ο φωτισμός πρέπει να είναι ο κατάλληλος και έτσι το δείγμα πρέπει να φωτίζεται από μία σταθερή πηγή άσπρου φωτός. Αν ο φωτισμός που επικρατεί στο γύρω περιβάλλον δεν είναι επαρκής, μπορεί να χρειαστεί πρόσθετο φως. Πριν την έναρξη του πειράματος, λαμβάνεται μία εικόνα αναφοράς (μη παραμορφωμένη εικόνα). Καθώς το δείγμα είναι εκτεθειμένο σε εξωτερικά φορτία, λαμβάνονται διαδοχικές εικόνες (παραμορφωμένες εικόνες).



Εικόνα 3-4: Η Διάταξη του Vic-2D.



Εικόνα 3-5: Εικόνα που έχει ληφθεί με την ψηφιακή κάμερα.

3.3. Η Λειτουργία του Λογισμικού

Για τη λειτουργία του λογισμικού, οι εικόνες που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της φόρτισης πρέπει να είναι ανοικτές στο πρόγραμμα *Vic-2D*, αφήνοντας το μέγεθος του *pixel* και του βήματος (*subset* και *step sizes*) ως προεπιλογή (π.χ. *subset*: 29 και *step*: 5). Στη συνέχεια, θα πρέπει να επιλεγεί μία περιοχή ενδιαφέροντος (*area of interest*) στην εικόνα αναφοράς του δείγματος που εξετάζεται, για να αποφασιστεί για ποια περιοχή θα υπολογιστούν οι χάρτες ανηγμένης παραμόρφωσης. Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του *seed point* (αρχικό σημείο) για να γίνουν οι αρχικές προβλέψεις (*initial guesses*) σε όλες τις παραμορφωμένες εικόνες. Το *seed point* χρειάζεται να βρίσκεται σε ένα μέρος, όπου τα μαύρα στίγματα θα είναι εύκολο να αναγνωριστούν. Αφού τελειώσουν όλες οι αρχικές προβλέψεις, γίνεται η συσχέτιση. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της συσχέτισης, ο αριθμός των μέσων επαναλήψεων (*average iterations*) εμφανίζεται για κάθε εικόνα. Αυτός ο αριθμός των μέσων επαναλήψεων πρέπει να είναι μικρότερος από 5, έτσι ώστε η συσχέτιση που δίνει το σχήμα της ανηγμένης παραμόρφωσης να είναι ικανοποιητική. Όταν η συσχέτιση τελειώσει, διαμορφώνεται η εικόνα αναφοράς σύμφωνα με το πραγματικό της μήκος (*calibration*). Τέλος, μέσω του προγράμματος υπολογίζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις και έτσι το *Vic-2D* μπορεί να δείξει την μετατόπιση και τους χάρτες των ανηγμένων παραμορφώσεων σε κάθε παραμορφωμένη εικόνα. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθεί και ένα *animation* σε βίντεο με όλους τους χάρτες των παραμορφωμένων εικόνων στη σειρά.

3.4. Οι Τεχνικές Προδιαγραφές του Συστήματος

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος *Vic-2D*, όπως για παράδειγμα, το εύρος του πεδίου μέτρησης, οι ακρίβειες που δίνει το σύστημα για τις μετατοπίσεις και τις ανηγμένες παραμορφώσεις, η ανάλυση των καμερών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθώς και ο ρυθμός λήψης εικόνων. Παρακάτω, ακολουθεί ο πίνακας 3-1, στον οποίο φαίνονται οι τιμές των στοιχείων που προαναφέρθηκαν:

Πίνακας 3-1: Τεχνικές Προδιαγραφές του Συστήματος

<i>Εύρος του Πεδίου Μέτρησης</i>	10 mm ² μέχρι 100 m ²
<i>Ακρίβεια των μετατοπίσεων</i>	0,01 pixel (πχ: 1 μm με μία κάμερα 1 Mpixel και πλάτος πεδίου μέτρησης 100 mm)
<i>Ακρίβεια των ανηγμένων παραμορφώσεων</i>	200 μstrains (=0,02%)
<i>Κάμερες</i>	0,3 Mpixel μέχρι 4 Mpixel
<i>Ρυθμός Λήψης Εικόνων</i>	10 εικόνες/s μέχρι 250.000 εικόνες/s

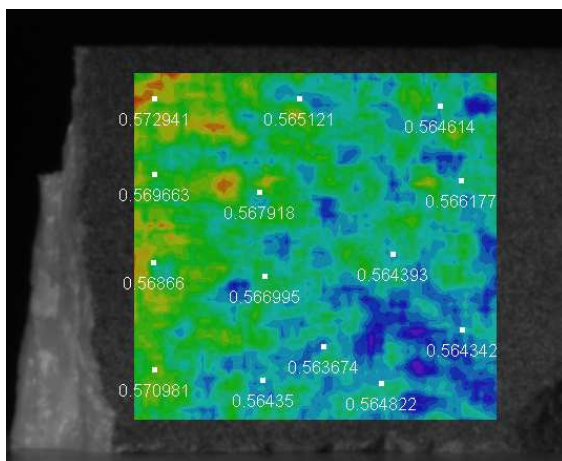
Σημείωση: Οι εικόνες των κεφαλαίων 2 και 3 έχουν ληφθεί από την πηγή: Cintrón R., Dr. Saouma V., (Summer 2008), “*Strain Measurements with the Digital Image Correlation-System Vic-2D*”

4. Το Σύστημα Συντεταγμένων των Εικόνων

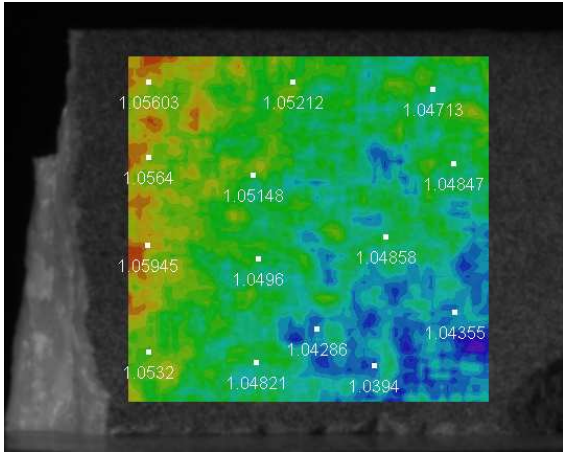
Για να διαπιστωθεί και να επιβεβαιωθεί το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στα αποτελέσματα των *contour* εικόνων που εξάγει το λογισμικό του *Vic-2D*, πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων. Με τη βοήθεια των συγκεκριμένων πειραμάτων, κατανοήθηκε προς ποια κατεύθυνση οι τιμές των μετατοπίσεων κατά X και κατά Y είναι θετικές και προς ποια κατεύθυνση είναι αρνητικές. Τα τέσσερα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αφορούν ένα ορθογωνικό δοκίμιο μαρμάρου, το οποίο κάθε φορά μετακινείται χειροκίνητα, με μικρές κινήσεις, δεξιά, αριστερά, πάνω και κάτω. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγχεται κάθε φορά το πρόσημο της κίνησης που πραγματοποιείται.

4.1. Μετατόπιση κατά X-Πείραμα Δεξιάς Κίνησης

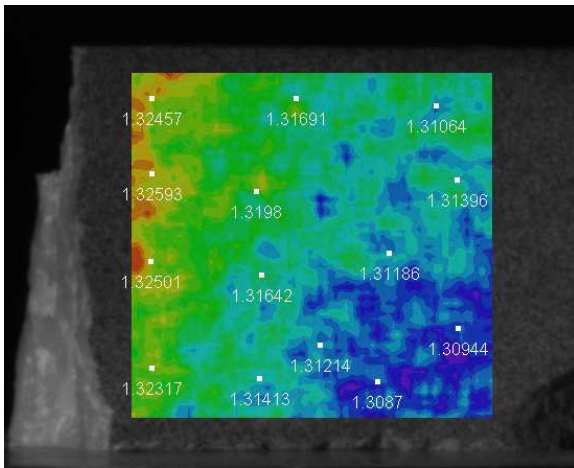
Στο πείραμα αυτό, αφού πρώτα τοποθετηθεί το δοκίμιο μαρμάρου στη μηχανή θλίψης, μετακινείται με μικρές κινήσεις προς τα δεξιά. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγχεται το πρόσημο της μετατόπισης κατά X στη δεξιά κίνηση. Εάν οι τιμές της μετατόπισης είναι θετικές, σημαίνει ότι η μετατόπιση κατά X λαμβάνει θετικές τιμές όταν το δείγμα μετακινείται προς τα δεξιά. Εάν οι τιμές της μετατόπισης είναι αρνητικές, σημαίνει ότι η μετατόπιση κατά X λαμβάνει αρνητικές τιμές όταν το δείγμα μετακινείται προς τα δεξιά. Παρακάτω παρατίθενται μερικές εικόνες από το πείραμα που πραγματοποιήθηκε, οι οποίες δείχνουν ότι ο άξονας των μετατοπίσεων κατά X είναι θετικός προς τα δεξιά.



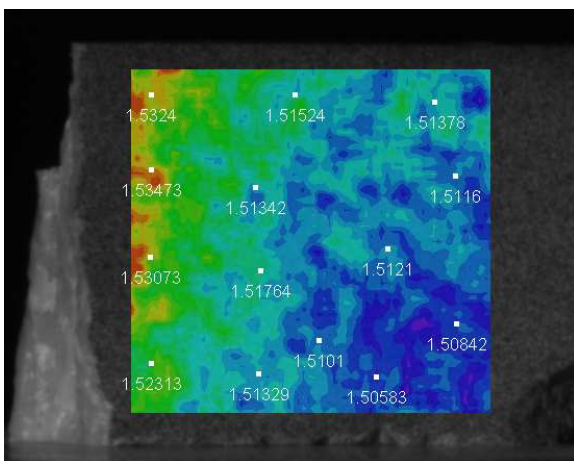
Εικόνα 4-1: 1^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.



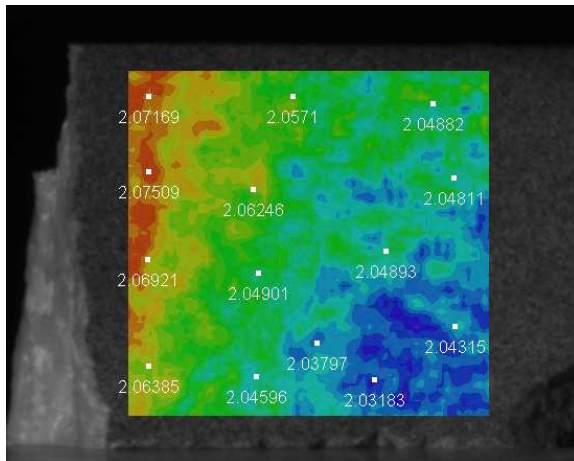
Εικόνα 4-2: 2^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.



Εικόνα 4-3: 3^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.



Εικόνα 4-4: 4^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.

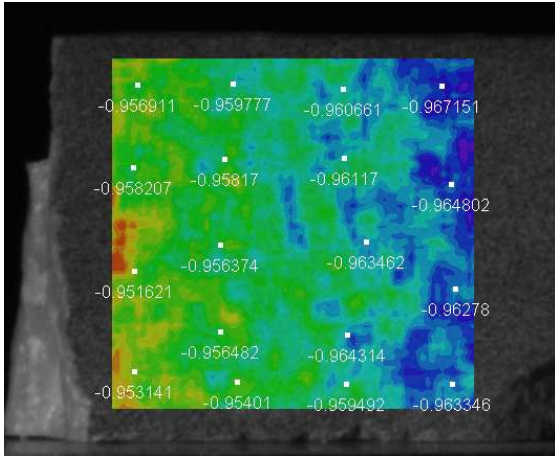


Εικόνα 4-5: 5^η φάση πειράματος δεξιάς κίνησης.

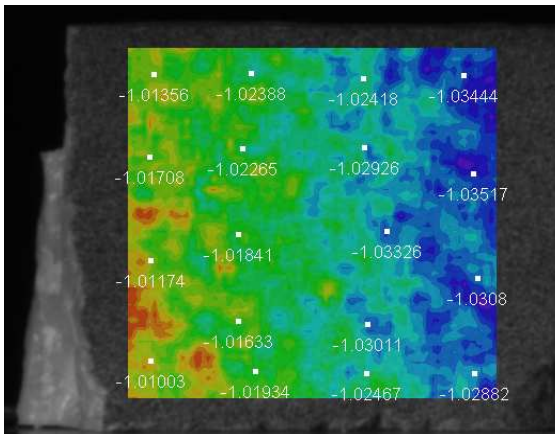
Έτσι, συμπεραίνεται λοιπόν, ότι οι τιμές της μετατόπισης κατά X λαμβάνουν θετικές τιμές, καθώς το δείγμα μετακινείται σταδιακά προς τα δεξιά.

4.2. Μετατόπιση κατά X-Πείραμα Αριστερής Κίνησης

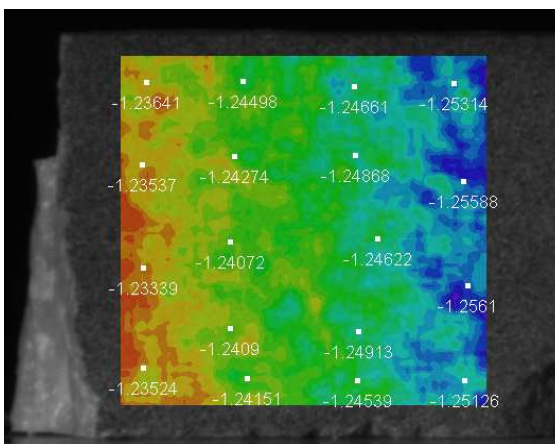
Στη συνέχεια γίνεται επανάληψη του παραπάνω πειράματος, μόνο που αυτή τη φορά, το δείγμα μαρμάρου μετακινείται με μικρές κινήσεις προς τα αριστερά. Το συγκεκριμένο πείραμα μπορεί να θεωρηθεί και ως ένα πείραμα επαλήθευσης του προηγούμενου, ελέγχοντας έτσι, το πρόσημο της μετατόπισης κατά X στην αριστερή κίνηση. Εάν οι τιμές της μετατόπισης είναι θετικές, σημαίνει ότι η μετατόπιση κατά X λαμβάνει θετικές τιμές όταν το δείγμα μετακινείται προς τα αριστερά και ότι τα αποτελέσματα του προηγούμενου ή του τωρινού πειράματος δεν είναι απολύτως σωστά και εξακριβωμένα. Εάν οι τιμές της μετατόπισης είναι αρνητικές, σημαίνει ότι η μετατόπιση κατά X λαμβάνει αρνητικές τιμές όταν το δείγμα μετακινείται προς τα αριστερά. Παρακάτω παρατίθενται μερικές εικόνες από το πείραμα που πραγματοποιήθηκε, οι οποίες δείχνουν ότι ο άξονας των μετατοπίσεων κατά X είναι αρνητικός προς τα αριστερά.



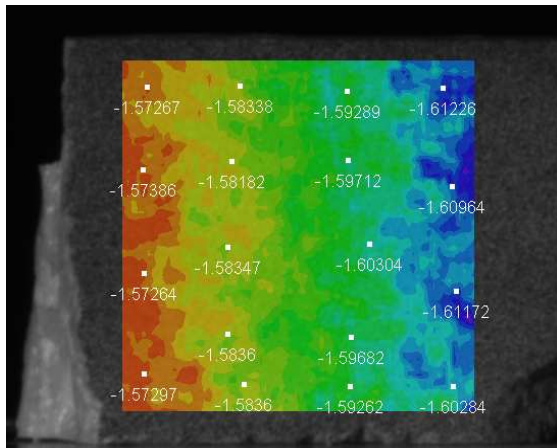
Εικόνα 4-6: 1^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.



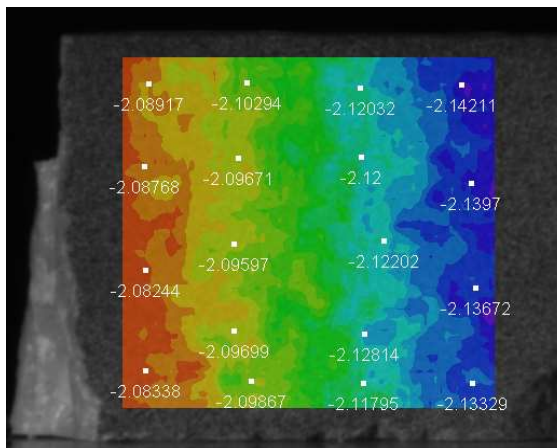
Εικόνα 4-7: 2^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.



Εικόνα 4-8: 3^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.



Εικόνα 4-9: 4^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.

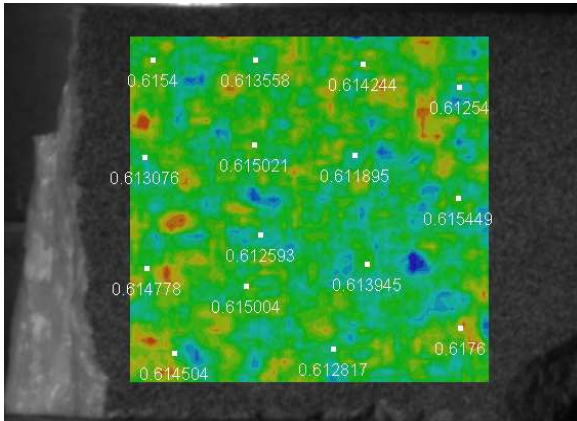


Εικόνα 4-10: 5^η φάση πειράματος αριστερής κίνησης.

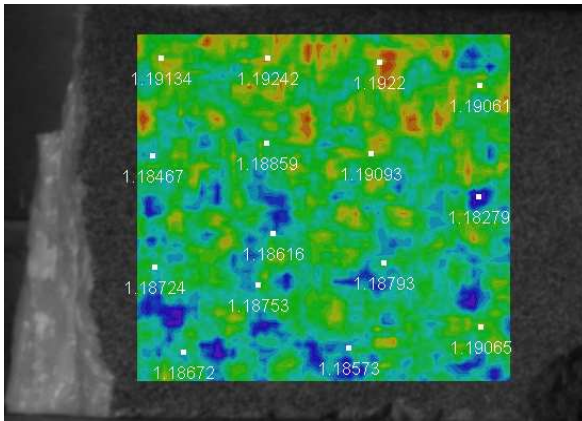
Έτσι, λοιπόν, επαληθεύεται ότι οι τιμές της μετατόπισης κατά X λαμβάνουν αρνητικές τιμές, καθώς το δείγμα μετακινείται σταδιακά προς τα αριστερά.

4.3. Μετατόπιση κατά Y-Πείραμα Άνω Κίνησης

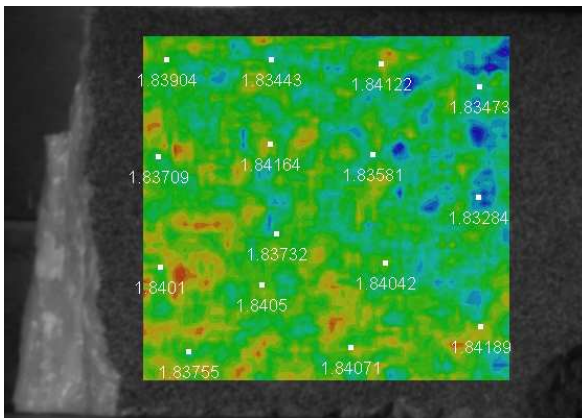
Στο πείραμα αυτό, το δείγμα μετακινείται με μικρές κινήσεις προς τα πάνω. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγχεται το πρόσημο της μετατόπισης κατά Y στην προς τα πάνω κίνηση. Εάν οι τιμές της μετατόπισης είναι θετικές, σημαίνει ότι η μετατόπιση κατά Y λαμβάνει θετικές τιμές όταν το δείγμα μετακινείται προς τα πάνω. Εάν οι τιμές της μετατόπισης είναι αρνητικές, σημαίνει ότι η μετατόπιση κατά Y λαμβάνει αρνητικές τιμές όταν το δείγμα μετακινείται προς τα πάνω. Παρακάτω παρατίθενται μερικές εικόνες από το πείραμα που πραγματοποιήθηκε, οι οποίες δείχνουν ότι ο άξονας των μετατοπίσεων κατά Y είναι θετικός προς τα πάνω.



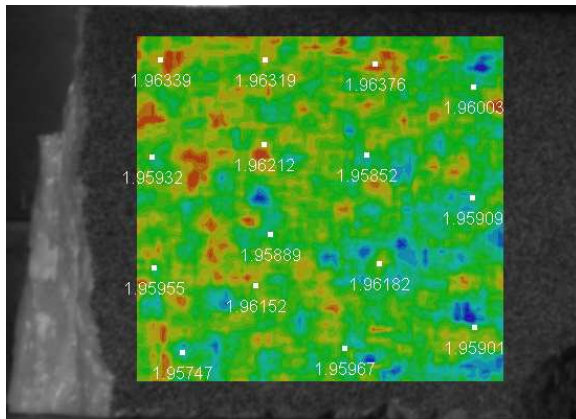
Εικόνα 4-11: 1^η φάση πειράματος άνω κίνησης.



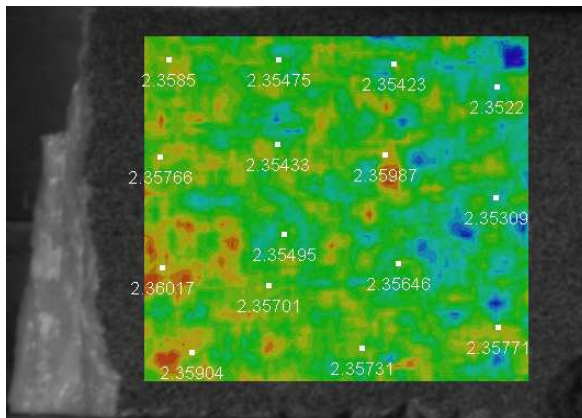
Εικόνα 4-12: 2^η φάση πειράματος άνω κίνησης.



Εικόνα 4-13: 3^η φάση πειράματος άνω κίνησης.



Εικόνα 4-14: 4^η φάση πειράματος άνω κίνησης.

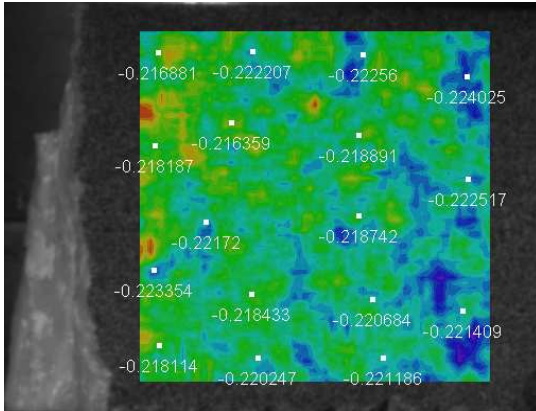


Εικόνα 4-15: 5^η φάση πειράματος άνω κίνησης.

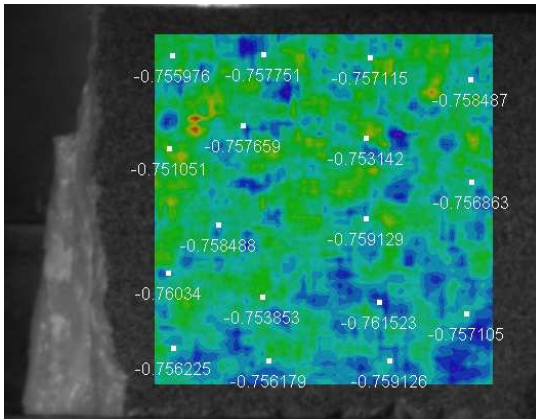
Έτσι, λοιπόν, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι τιμές της μετατόπισης κατά Y λαμβάνουν θετικές τιμές, καθώς το δείγμα μετακινείται σταδιακά προς τα πάνω.

4.4. Μετατόπιση κατά Y -Πείραμα Κάτω Κίνησης

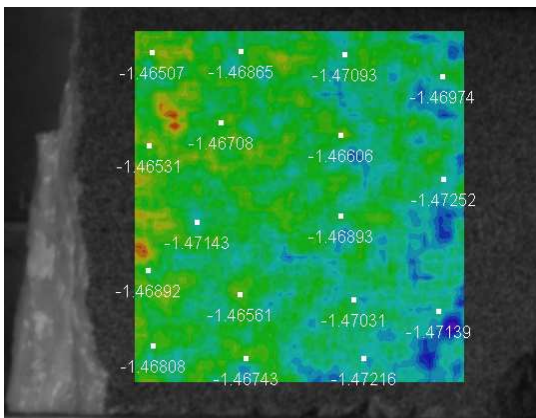
Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται το παραπάνω πείραμα, μόνο που αυτή τη φορά, το δείγμα μαρμάρου μετακινήθηκε με μικρές κινήσεις προς τα κάτω. Το συγκεκριμένο πείραμα μπορεί να θεωρηθεί και ως ένα πείραμα επαλήθευσης του προηγούμενου, ελέγχοντας έτσι, το πρόσημο της μετατόπισης κατά Y στην προς τα κάτω κίνηση. Εάν οι τιμές της μετατόπισης είναι θετικές, σημαίνει ότι η μετατόπιση κατά Y λαμβάνει θετικές τιμές όταν το δείγμα μετακινείται προς τα κάτω και ότι τα αποτελέσματα του προηγούμενου ή του τωρινού πειράματος δεν είναι απολύτως σωστά και εξακριβωμένα. Εάν οι τιμές της μετατόπισης είναι αρνητικές, σημαίνει ότι η μετατόπιση κατά Y λαμβάνει αρνητικές τιμές όταν το δείγμα μετακινείται προς τα κάτω. Παρακάτω παρατίθενται μερικές εικόνες από το πείραμα που πραγματοποιήθηκε, οι οποίες δείχνουν ότι ο άξονας των μετατοπίσεων κατά Y είναι αρνητικός προς τα κάτω.



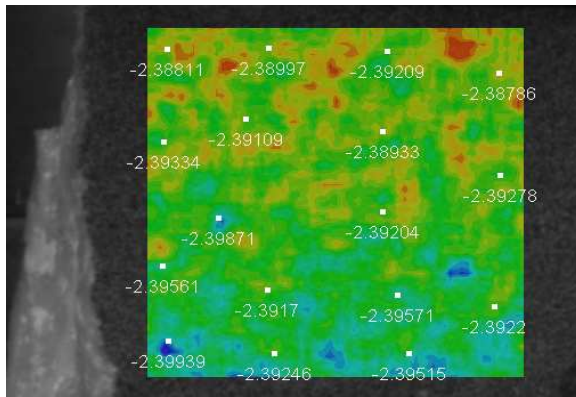
Εικόνα 4-16: 1^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.



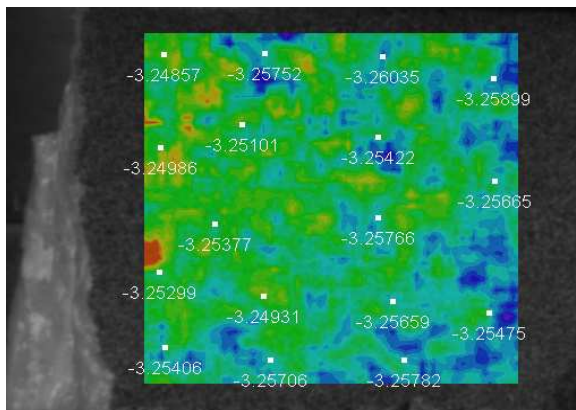
Εικόνα 4-17: 2^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.



Εικόνα 4-18: 3^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.



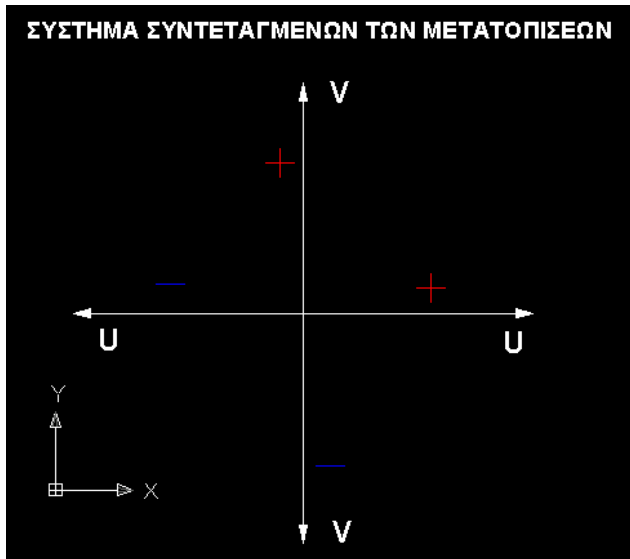
Εικόνα 4-19: 4^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.



Εικόνα 4-20: 5^η φάση πειράματος κάτω κίνησης.

Έτσι, λοιπόν, επαληθεύεται ότι οι τιμές της μετατόπισης κατά Y λαμβάνουν αρνητικές τιμές, καθώς το δείγμα μετακινείται σταδιακά προς τα κάτω.

Παρακάτω παρατίθεται το σχέδιο του συστήματος συντεταγμένων, που χρησιμοποιείται για τον σχολιασμό των μετατοπίσεων των σημείων του δείγματος που προκύπτουν από τους χάρτες ισοριθμικών καμπύλων:



Εικόνα 4-21: Οι άξονες των μετατοπίσεων και τα πρόσημα τους.

5. Περιγραφή του Συστήματος μέσω Πειράματος τύπου Βραζιλιανής Δοκιμής

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία του συστήματος *Vic-2D* σύμφωνα με πείραμα τύπου βραζιλιανής δοκιμής που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο με τη μεγάλη μηχανή θλίψης. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα, πρόκειται για μάρμαρο διαμέτρου 92 mm και πάχους 60 mm. Πιο αναλυτικά, περιγράφονται: η διάταξη του συστήματος, η προετοιμασία του δείγματος, η διαδικασία λήψης των εικόνων, η επεξεργασία των εικόνων, το καλιμπράρισμα των εικόνων και τα αποτελέσματα που εξάγονται από το λογισμικό.

5.1. Θεωρία της Βραζιλιανής Δοκιμής

Η βραζιλιανή δοκιμή, όπως προκύπτει από το όνομα, προέρχεται από τη Νότια Αμερική. Το πείραμα χρησιμοποιεί έναν κυκλικό στερεό δίσκο, ο οποίος συμπιέζεται μέχρι να αστοχήσει κατά μήκος της διαμέτρου. Ο HONDROS (1959), υποθέτοντας ότι το υλικό είναι ομογενές, ιστροπικό και γραμμικά ελαστικό, ανέλυσε την κατανομή πίεσης σε ένα λεπτό δίσκο, φορτισμένο από ομοιόμορφη πίεση, ακτινωτά εφαρμοσμένη πάνω από μια λωρίδα της περιμέτρου σε κάθε τέλος της διαμέτρου (Σχήμα 5-1). Δεδομένου ότι η βραζιλιανή δοκιμή ισχύει μόνο όταν ενάρξεις σπασίματος ξεκινούν από το κέντρο και διαδίδονται κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης, η κατανομή της πίεσης κατά μήκος αυτής της διαμέτρου είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Η συνιστώσα της πίεσης κάθετη στη φορτισμένη διάμετρο, $\gamma\gamma'$ (σ_θ) και η συνιστώσα της πίεσης κατά μήκος της φορτισμένης διαμέτρου $\gamma\gamma'$ (σ_r) δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\gamma \sigma_\theta = -\frac{F}{\pi r_0 t \alpha} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{r_0} \right)^4} - \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \tan 2\alpha}{1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2} \right] \right\} \quad (\text{σχέση 5.1.})$$

⁷ Πηγή σχέσης 5.1.: Vutukuri V. S., Lama R.D., Saluja S.S., "Handbook on Mechanical Properties of Rocks"

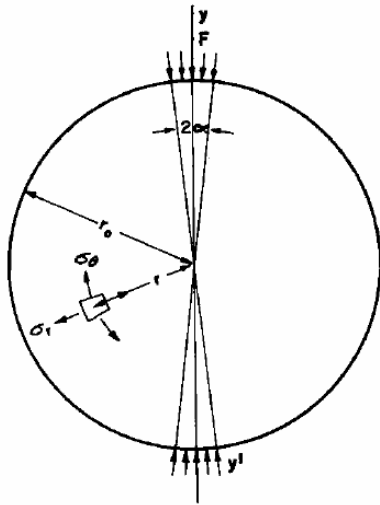
$${}^8 \sigma_r = + \frac{F}{\pi r_0 t \alpha} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{r_0} \right)^4} + \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2}{1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (\text{σχέση 5.2.})$$

Όπου:

- σ_θ = η συνιστώσα της πίεσης κάθετη στη φορτισμένη διάμετρο
- σ_r = η συνιστώσα της πίεσης κατά μήκος της φορτισμένης διαμέτρου
- F = η εφαρμοσμένη δύναμη
- r_0 = η ακτίνα του κυκλικού δίσκου
- t = το πάχος του δίσκου
- 2α = η γωνιακή απόσταση, πάνω από την οποία η F υποτίθεται ότι διανεμήθηκε ακτινωτά και
- r = η απόσταση από το κέντρο του δίσκου.

Η θλιπτική τάση θεωρείται θετική.

⁸ Πηγή σχέσεων 5.2. και 5.3.: Vutukuri V. S., Lama R.D., Saluja S.S., "Handbook on Mechanical Properties of Rocks"



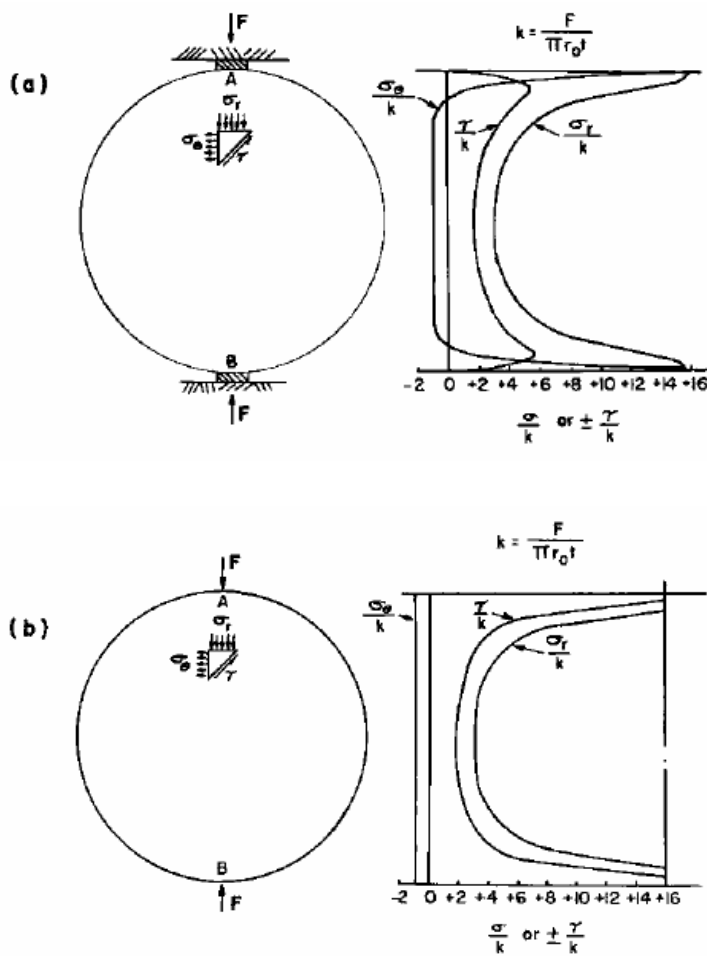
Σχήμα 5-1: Η βραζιλιανή δοκιμή.

Οι τιμές των σ_θ , σ_r και t κατά μήκος της φορτισμένης διαμέτρου φαίνονται στο σχήμα 5-2. Όταν $\alpha = 0$, υπάρχει μία αλλαγή στις τιμές των πιέσεων κοντά στα σημεία του τέλους του άξονα $Y-Y'$ όπως φαίνεται στο σχήμα. Η σ_θ στο κέντρο είναι:

$$\sigma_\theta = -\frac{F}{\pi_0 t} \left[\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right] \approx -\frac{F}{\pi_0 t} \quad (\text{σχέση 5.3.})$$

Αυτή η έκφραση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δύναμης εφελκυσμού του υλικού. Η τιμή της πίεσης στο κέντρο εξαρτάται από τη διαμόρφωση της φόρτισης (*line load* ή *strip load*). Υποτίθεται, επίσης, ότι η αστοχία εξαρτάται από την παρουσία των θλιπτικών τάσεων κατά μήκος του $Y-Y'$ και τις πιέσεις που αναπτύσσονται κατά μήκος του Z -άξονα (κάθετο στο πρόσωπο του δίσκου) και ότι η αστοχία είναι ουσιαστικά εφελκυστική.

Εάν ο δίσκος δεν είναι λεπτός, είναι πιθανόν να εμφανιστούν άλλες πιέσεις, αλλά εάν το δοκίμιο ραγίσει διαμετρικά, αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί ως εφελκυστική ρήξη.



Σχήμα 5-2: Διαμόρφωση του φορτίου και κατανομή της πίεσης κατά μήκος της φορτισμένης διαμέτρου για τη βραζιλιανή δοκιμή.

(α) Κατανομή της πίεσης κατά μήκος της φορτισμένης διαμέτρου για κύλινδρο που θλίβεται μεταξύ δύο επίπεδων πλακών.

(β) Κατανομή της πίεσης κατά μήκος της φορτισμένης διαμέτρου για κύλινδρο που θλίβεται μεταξύ δύο γραμμικών φορτίων (μετά τον SHOOK, 1963).

5.2. Διάταξη του Συστήματος

Το σύστημα *Vic-2D* αποτελείται από μία κάμερα *Nikon*, η οποία περιλαμβάνει τη μηχανή και το φακό. Επιπλέον, για τη ρύθμιση της εστιακής απόστασης και της διακριτικότητας της εικόνας, υπάρχουν 2 ρυθμιστές. Η κάμερα είναι τοποθετημένη πάνω σε τρίποδα κατάλληλα κεντρωμένο και οριζοντιωμένο και συνδέεται μέσω ειδικού καλωδίου με laptop που περιέχει το πρόγραμμα. Επίσης, στον υπολογιστή υπάρχει υποδοχή για την κάρτα *firewire*, πάνω στην οποία βρίσκεται και η υποδοχή για το καλώδιο. Τέλος, για τον επαρκή φωτισμό του δοκιμίου, χρησιμοποιούνται 2

πηγές φωτισμού, μία πηγή λευκού φωτός και ένας άλλος προβολέας. Η χρήση του προβολέα ενισχύει το φωτισμό των δοκιμών καθώς κρίνεται ότι η πηγή του λευκού φωτός δεν είναι αρκετή.




Εικόνα 5-1: Η διάταξη του συστήματος στο εργαστήριο.

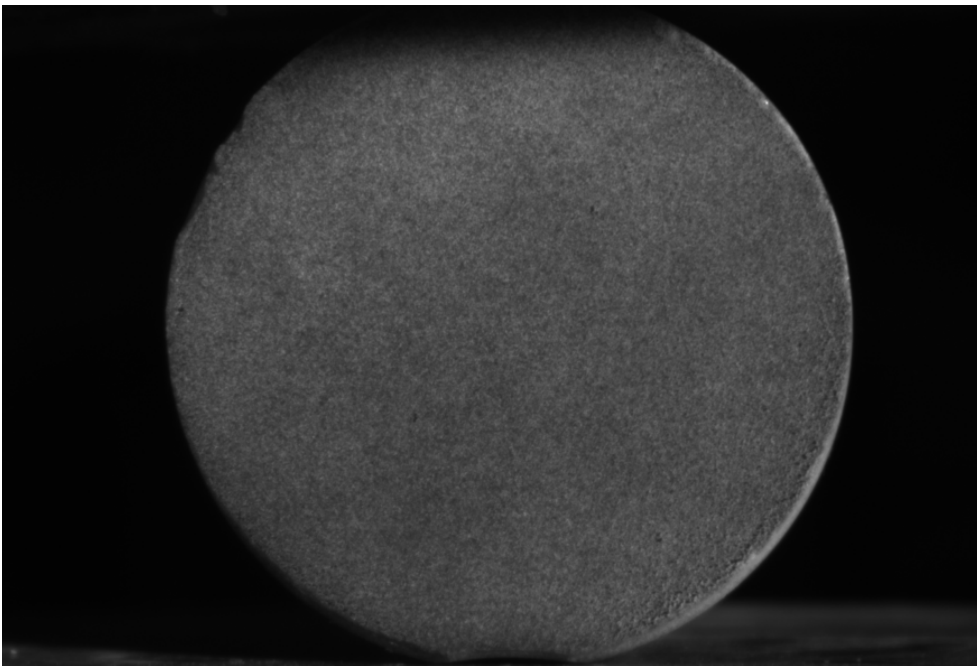
5.3. Προετοιμασία του Δείγματος

Το σύστημα *Vic-2D* απαιτεί κατάλληλη προετοιμασία του δοκιμίου, δημιουργώντας με άσπρο σπρέυ πρώτα, ένα άσπρο φόντο. Μετά, με μαύρο σπρέυ και αφού κρατηθεί κάποια απόσταση από το δείγμα μαρμάρου δημιουργούνται μαύρα στίγματα πάνω στο άσπρο φόντο, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή αντίθεση στην επιφάνεια του δείγματος μαρμάρου που πρόκειται να παραμορφωθεί. Αξίζει να σημειωθεί, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αντίθεση μαύρου-άσπρου τόσο πιο γρήγορα προχωράει και ολοκληρώνεται η διαδικασία της συσχέτισης. Στη συνέχεια, το έτοιμο δείγμα τοποθετείται στη μεγάλη μηχανή θλίψης του εργαστηρίου. Αυτό που πρέπει κανείς να προσέξει είναι, η κάμερα να είναι κάθετη στο δοκίμιο και όχι τοποθετημένη υπό γωνία, γιατί τότε τα αποτελέσματα δεν θα ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι η επιφάνεια του δείγματος που παραμορφώνεται πρέπει να είναι επίπεδη. Τέλος, προσαρμόζεται κατάλληλα τις πηγές φωτισμού και παράλληλα, γίνονται ρυθμίσεις με το εργαλείο του *zoom* ώστε να ληφθεί μία καθαρή εικόνα (*sharp image*). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η εστιακή απόσταση είναι περίπου 50 mm και η απόσταση μεταξύ κάμερας-δείγματος 80-83 cm. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι όσο καλύτερος φωτισμός και καθαρή εικόνα υπάρχει, τόσο πιο επιτυχής είναι η όλη διαδικασία.

5.4. Λήψη των Εικόνων

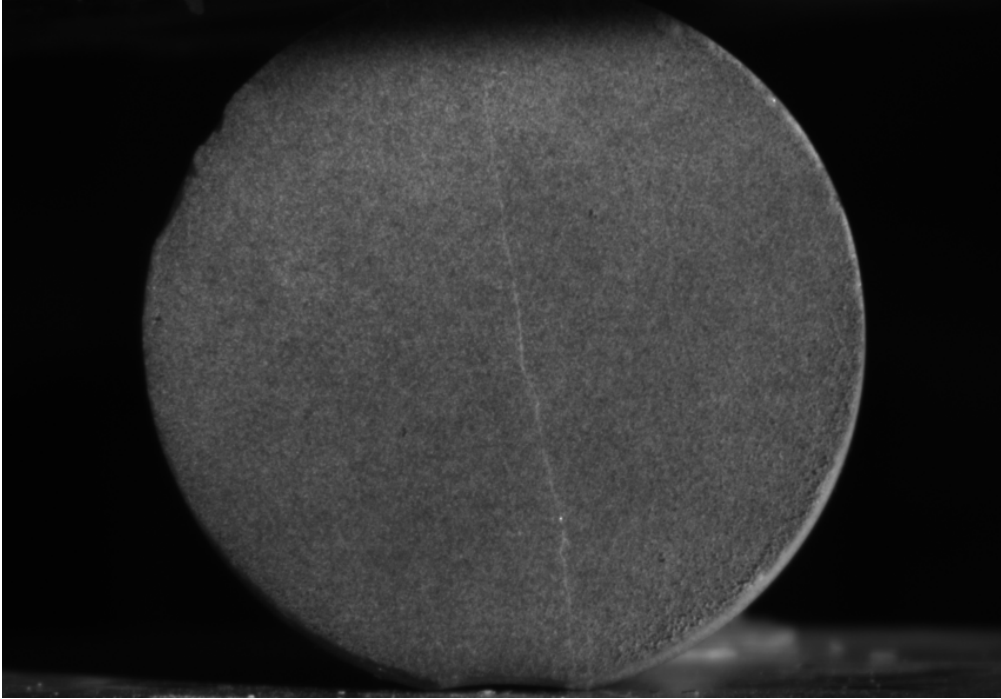
Όταν τελειώσει η παραπάνω διαδικασία, ανοίγουμε το πρόγραμμα *Vic-Snap*  για να ξεκινήσει η διαδικασία λήψης των φωτογραφιών. Δημιουργείται ένας φάκελος, ο οποίος θα περιέχει τις φωτογραφίες που θα ληφθούν και θα χρησιμοποιηθούν αργότερα για την επεξεργασία των εικόνων. Το δείγμα μαρμάρου είναι ήδη τοποθετημένο στη μηχανή θλίψης και έτσι, λαμβάνεται την πρώτη εικόνα, την εικόνα αναφοράς (*reference image*), πριν την έναρξη της φόρτισης με την

εντολή *capture*  *Capture*.

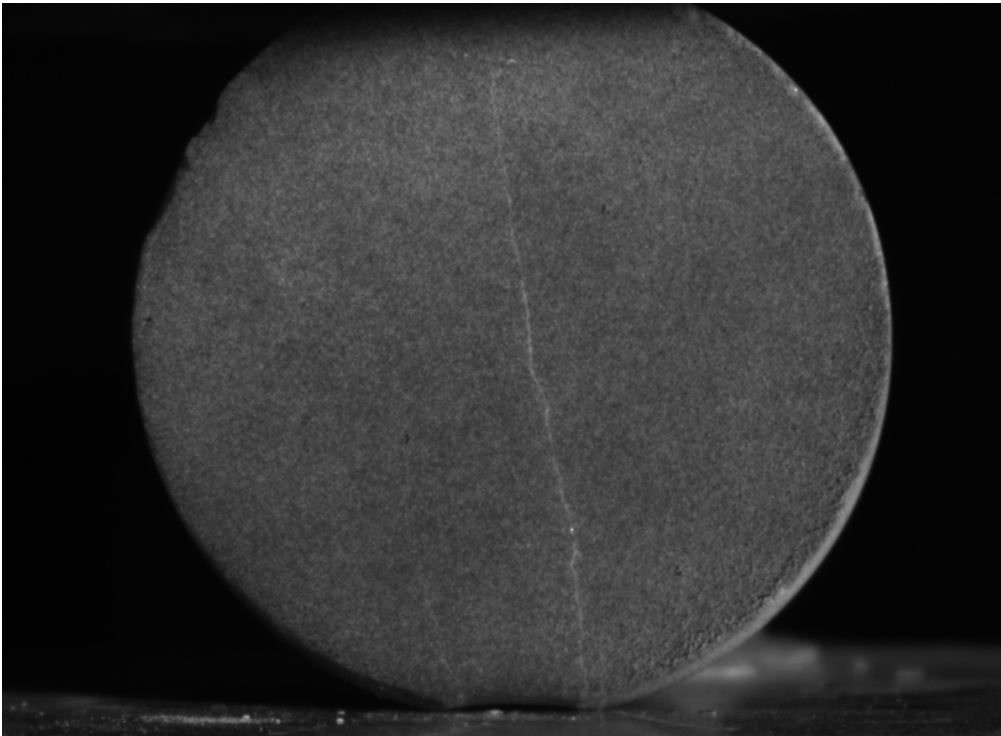


Εικόνα 5-2: Η εικόνα αναφοράς.

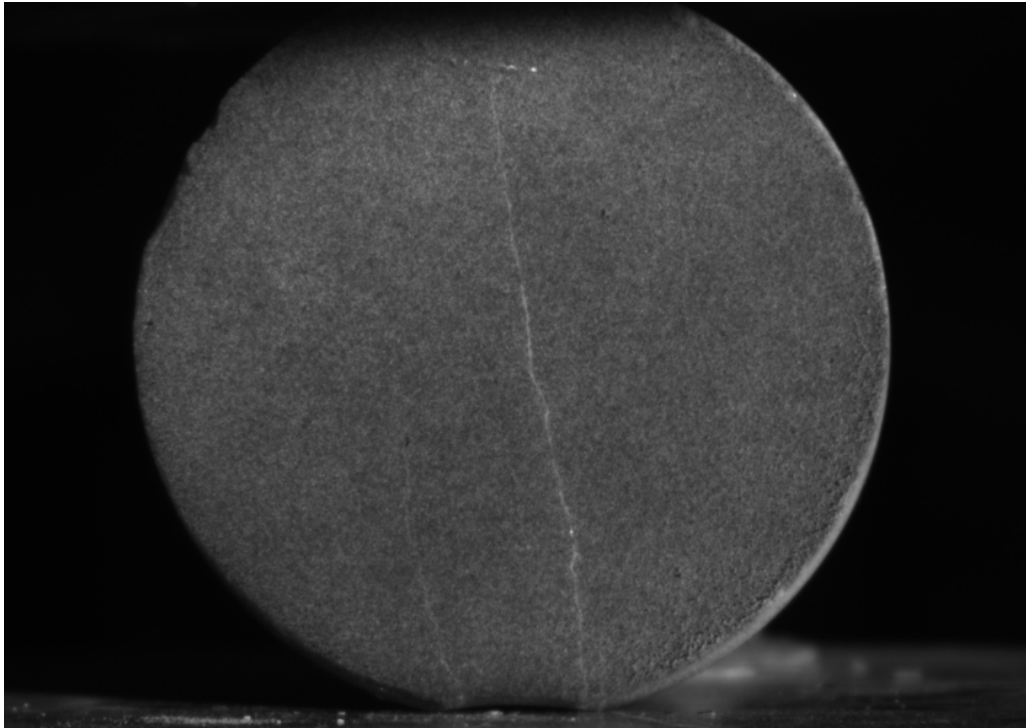
Για μεγαλύτερη ευκολία κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, οι φωτογραφίες μπορούν να ληφθούν και χρησιμοποιώντας *remote control*, με το οποίο παρέχεται η δυνατότητα για λήψη των εικόνων από μακριά. Ύστερα, τίθεται σε λειτουργία η μηχανή και καθώς αυξάνεται το φορτίο που δέχεται το δοκίμιο, λαμβάνονται φωτογραφίες, τις παραμορφωμένες εικόνες (*deformed images*), μερικές από τις οποίες φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 5-3: Παραμορφωμένη εικόνα: 1^η φάση παραμόρφωσης-Δημιουργία ρωγμής.



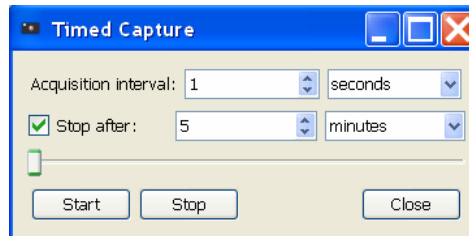
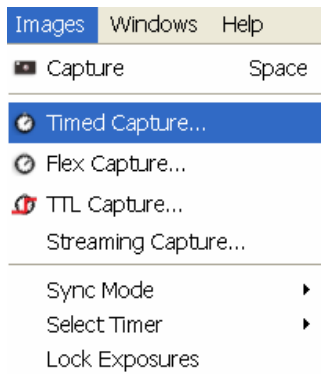
Εικόνα 5-4: Παραμορφωμένη εικόνα: 2^η φάση παραμόρφωσης.



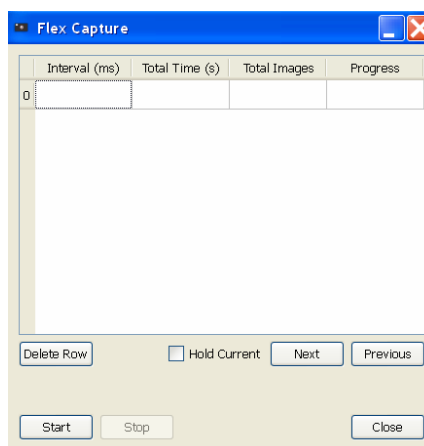
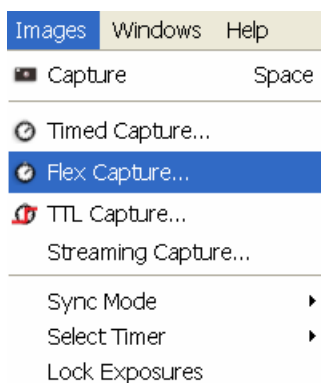
Εικόνα 5-5: Παραμορφωμένη εικόνα: 3^η φάση παραμόρφωσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι φωτογραφίες κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, λαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (πχ. κάθε που αυξάνει το φορτίο κατά 0,5 kN), και παράλληλα, έχοντας ως κριτήριο την καταγραφή των πιο σημαντικών φάσεων του πειράματος, όπως για παράδειγμα τη δημιουργία κάποιας ρωγμής ή φάσεις στις οποίες η παραμόρφωση είναι πολύ μεγάλη.

Υπάρχει και η δυνατότητα της προγραμματισμένης λήψης με ειδική ρύθμιση από το πρόγραμμα (*timed capture, flex capture*). Με την επιλογή *timed capture* υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης λήψης. Από το πρόγραμμα ρυθμίζεται η συχνότητα και η συνολική διάρκεια λήψης. Επιπλέον, και η επιλογή *flex capture* παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης για αυτόματη λήψη εικόνων. Με αυτές τις δύο επιλογές επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς μπορούν να καταγραφούν όλες οι φάσεις του πειράματος, αλλά η διαδικασία της συσχέτισης αργεί υπερβολικά, λόγω του μεγάλου πλήθους των εικόνων που έχουν ληφθεί.




Εικόνα 5-6: Επιλογή *timed capture*.

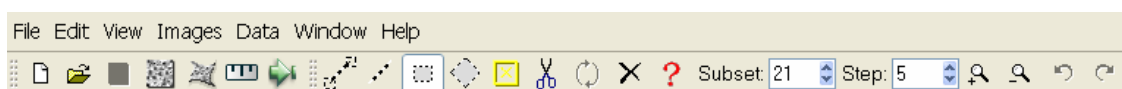


Εικόνα 5-7: Επιλογή *flex capture*.


Οι εικόνες που έχουν ληφθεί, αποθηκεύονται αυτόματα στον φάκελο που έχει δημιουργηθεί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αργότερα για διάφορες αναλύσεις.


5.5. Η Διαδικασία της Συσχέτισης

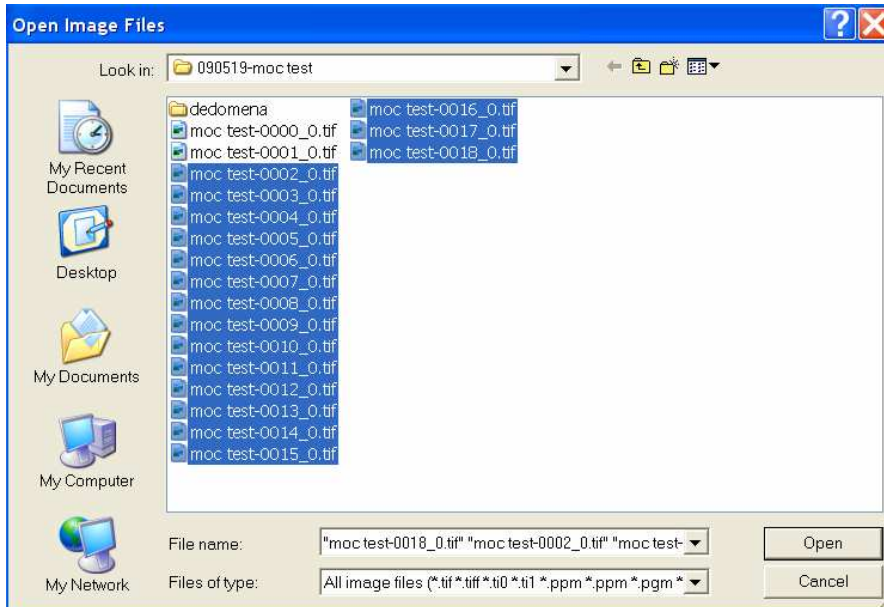
Για την επεξεργασία των εικόνων, ανοίγουμε το πρόγραμμα *Vic-2D*. Το εικονίδιο του προγράμματος είναι το . Η γραμμή εργαλείων του προγράμματος φαίνεται παρακάτω:



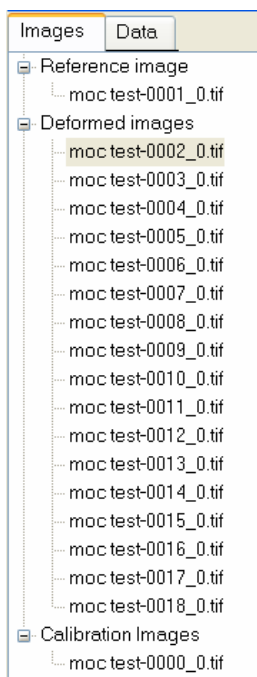
Εικόνα 5-8: Η γραμμή εργαλείων του προγράμματος *Vic-2D*.

Στη συνέχεια, επιλέγεται η εικόνα αναφοράς (*reference image*) που θέλουμε να φορτωθεί, χρησιμοποιώντας το εργαλείο .


Ύστερα, επιλέγονται και φορτώνονται και οι παραμορφωμένες εικόνες (*deformed images*), χρησιμοποιώντας το εικονίδιο .

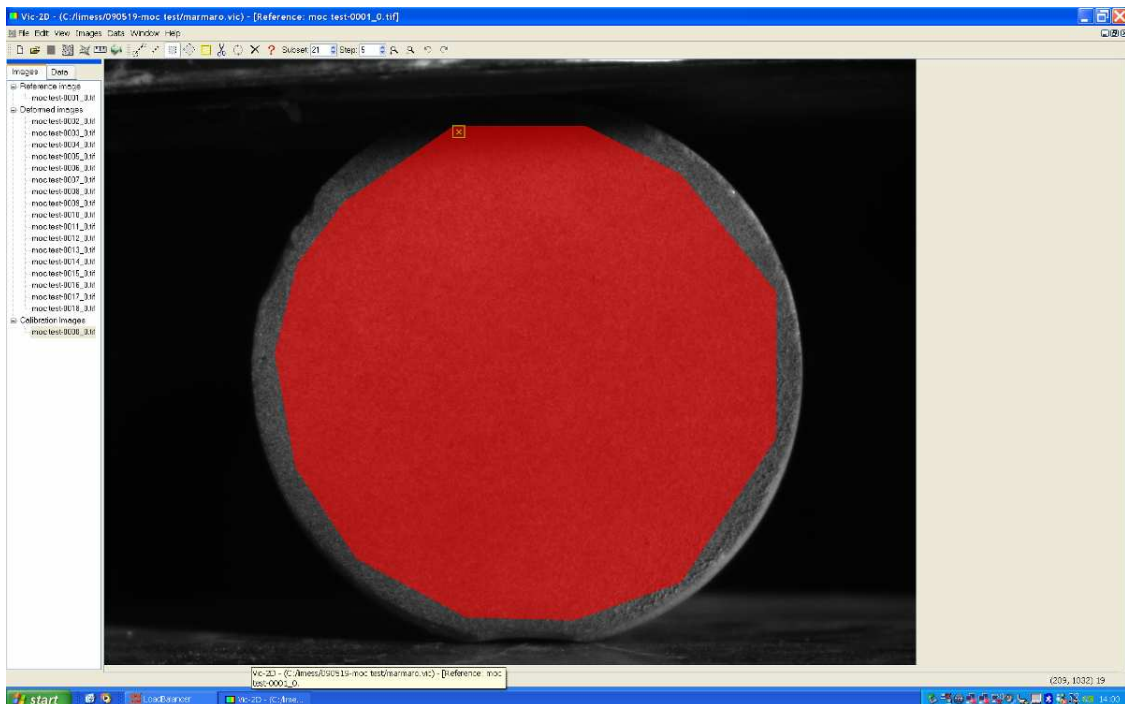


Εικόνα 5-9: Επιλογή παραμορφωμένων εικόνων.




Εικόνα 5-10: Οι εικόνες που έχουν φορτωθεί, έτσι όπως φαίνονται από το πρόγραμμα.

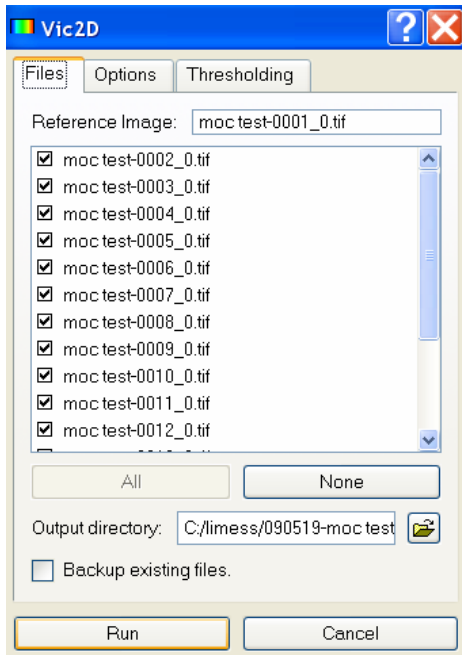
Για την έναρξη της διαδικασίας της συσχέτισης, απαραίτητο είναι στην εικόνα αναφοράς να επιλεγεί μία περιοχή ενδιαφέροντος (*area of interest*), στην οποία *pixel* προς *pixel* θα υπολογιστούν μετατοπίσεις, ανηγμένες παραμορφώσεις και διατμητικές παραμορφώσεις. Γενικά, μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος πρέπει να περιλαμβάνονται σημεία του δοκιμίου που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως ρωγμές και σφήνες. Η επιλογή της γίνεται με τη χρησιμοποίηση των εργαλείων . Στην προκειμένη περίπτωση, επειδή πρόκειται για κυλινδρικό δοκίμιο μαρμάρου, η περιοχή που επιλέχθηκε είναι πολυγωνική, κοντά στα όρια της περιμέτρου του δείγματος και περιλαμβάνει όλα τα σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.



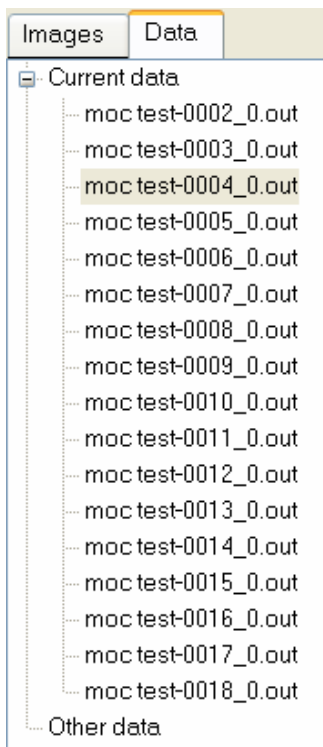
Εικόνα 5-11: Επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος.

Παράλληλα, καθορίζεται το μέγεθος του *pixel* και το βήμα με βάση το οποίο θα γίνει η συσχέτιση (*subset* και *step size*). Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του *pixel* τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στην παραπάνω διαδικασία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η συσχέτιση έγινε με βάση τα εξής στοιχεία: .

Έτσι, λοιπόν, με την επιλογή *run correlation* από το πρόγραμμα και χρησιμοποιώντας το εργαλείο , αρχίζει η διαδικασία της συσχέτισης.

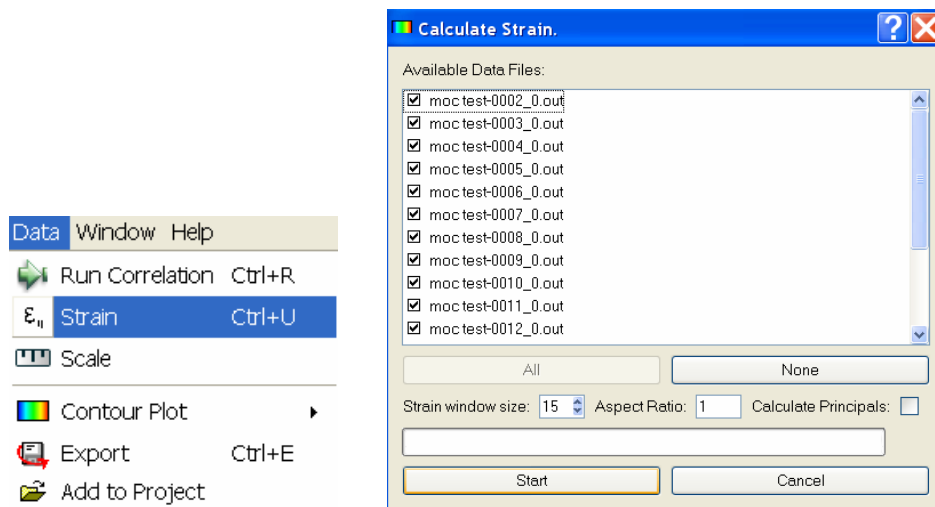


Εικόνα 5-12: Η έναρξη της διαδικασίας της συσχέτισης (*run correlation*).




Εικόνα 5-13: Τα δεδομένα που εξάγονται μετά τη διαδικασία της συσχέτισης.

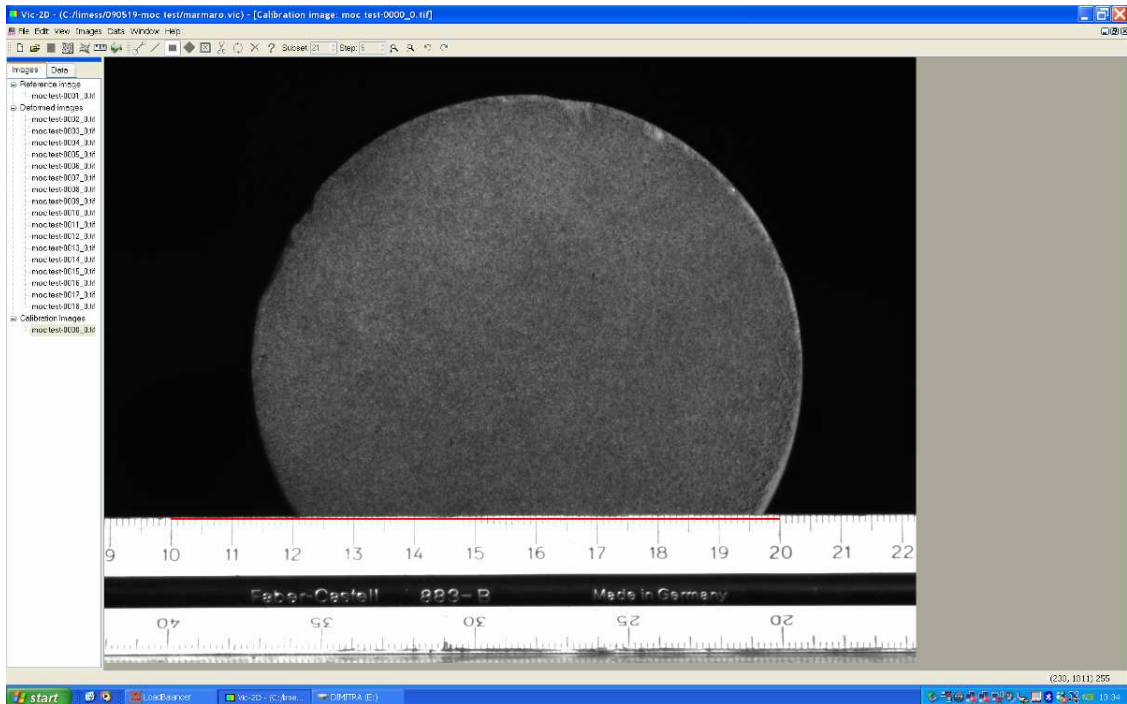
Ακολουθεί ο υπολογισμός των ανηγμένων παραμορφώσεων (*calculate strains*).



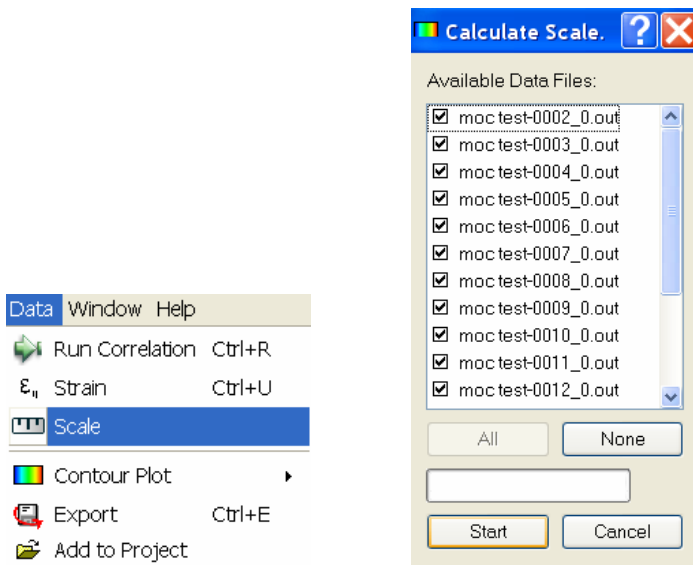
Εικόνα 5-14: Υπολογισμός των ανηγμένων παραμορφώσεων.

5.6. Καλιμπράρισμα των Εικόνων

Οι μονάδες στις οποίες μετρούνται οι μετατοπίσεις και οι ανηγμένες παραμορφώσεις είναι τα *pixels*. Το καλιμπράρισμα των εικόνων (*image calibration*) γίνεται για να μετατραπούν τα *pixels* σε *mm*. Για αυτό το λόγο, λαμβάνεται μία εικόνα του δείγματος μαρμάρου που μελετάται, πριν την έναρξη της παραμόρφωσης, έχοντας τοποθετήσει πάνω στη μηχανή θλίψης ένα κλιμακόμετρο. Στη συνέχεια, φορτώνεται η εικόνα αυτή για να πραγματοποιηθεί το καλιμπράρισμα. Το εικονίδιο που χρησιμοποιείται για τη φόρτωση της συγκεκριμένης εικόνας είναι το . Ύστερα, πάνω στην εικόνα ορίζουμε μία κόκκινη γραμμή κάποιων χιλιοστών (στην προκειμένη περίπτωση 100 mm), η οποία αυτομάτως αντιστοιχίζεται στα *pixels* της εικόνας.



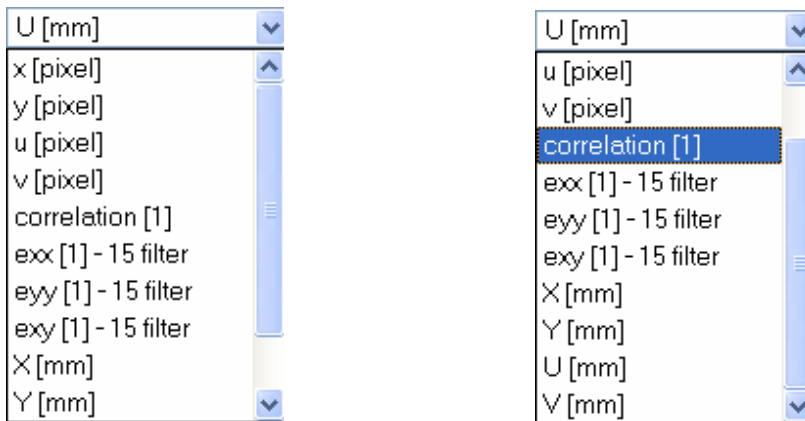
Εικόνα 5-15: Η εικόνα που χρησιμοποιείται για το *calibration*.



Εικόνα 5-16: Η διαδικασία του καλιμπραρίσματος των εικόνων.

5.7. Σχολιασμός Ποιοτικών Αποτελεσμάτων

Στο συγκεκριμένο πείραμα λήφθηκαν 9 παραμορφωμένες εικόνες. Επιλέχθηκαν να σχολιαστούν οι 4 από αυτές, οι οποίες θεωρούνται και οι πιο σημαντικές, όσον αφορά τα αποτελέσματα που δίνουν. Με το πρόγραμμα *Vic-2D* εξετάζονται ορισμένες μεταβλητές, όπως οι μετατοπίσεις U κατά X , οι μετατοπίσεις V κατά Y , οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} κατά x , οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} κατά y και οι διατμητικές παραμορφώσεις e_{xy} .



Εικόνα 5-17: Οι μεταβλητές (*variables*) που εξετάζονται, έτσι όπως φαίνονται από το πρόγραμμα.

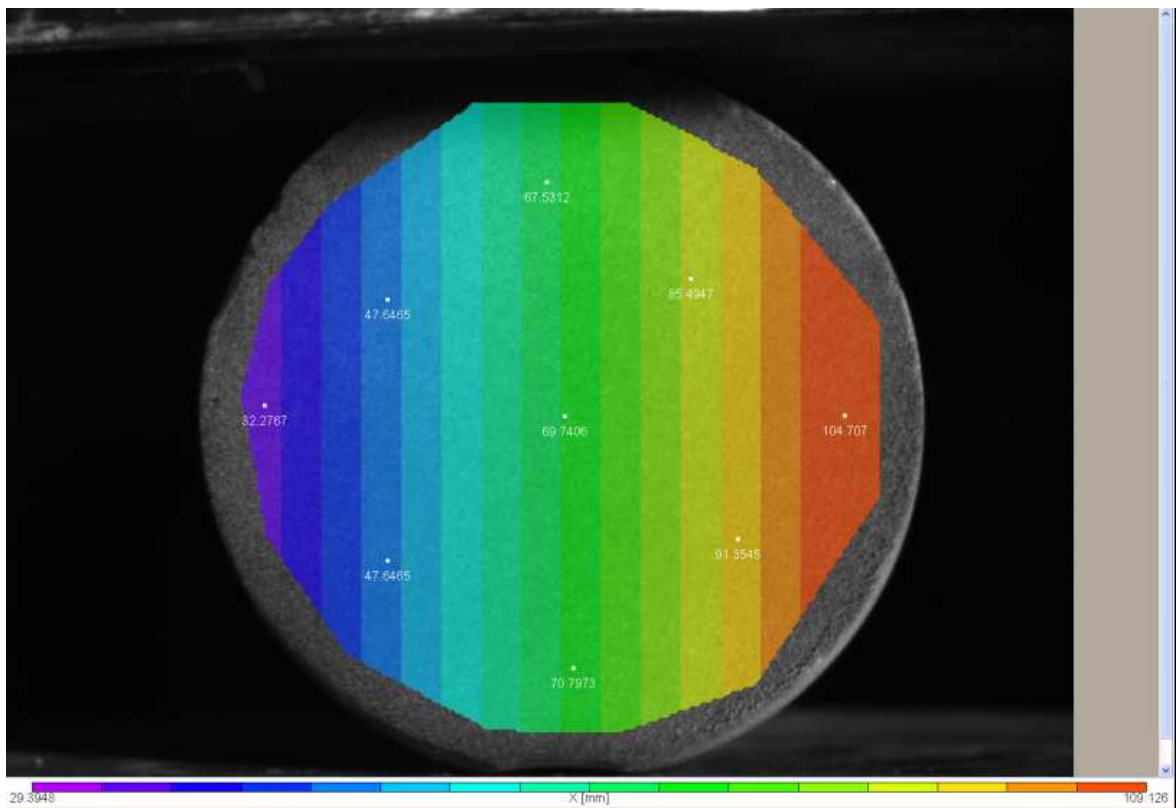
Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται αφορούν *contour* σχήματα (σχήματα ισarithμικών καμπύλων), οι οποίοι περιλαμβάνουν μία ποικιλία χρωμάτων, στους οποίους το μωβ και το κόκκινο είναι το αριστερό και το δεξί όριο, αντίστοιχα και το καθένα αντιπροσωπεύει κάποιες τιμές. Οι τιμές αυτές απεικονίζονται με μία κλίμακα (*contour range*) κάτω από το εκάστοτε σχήμα.



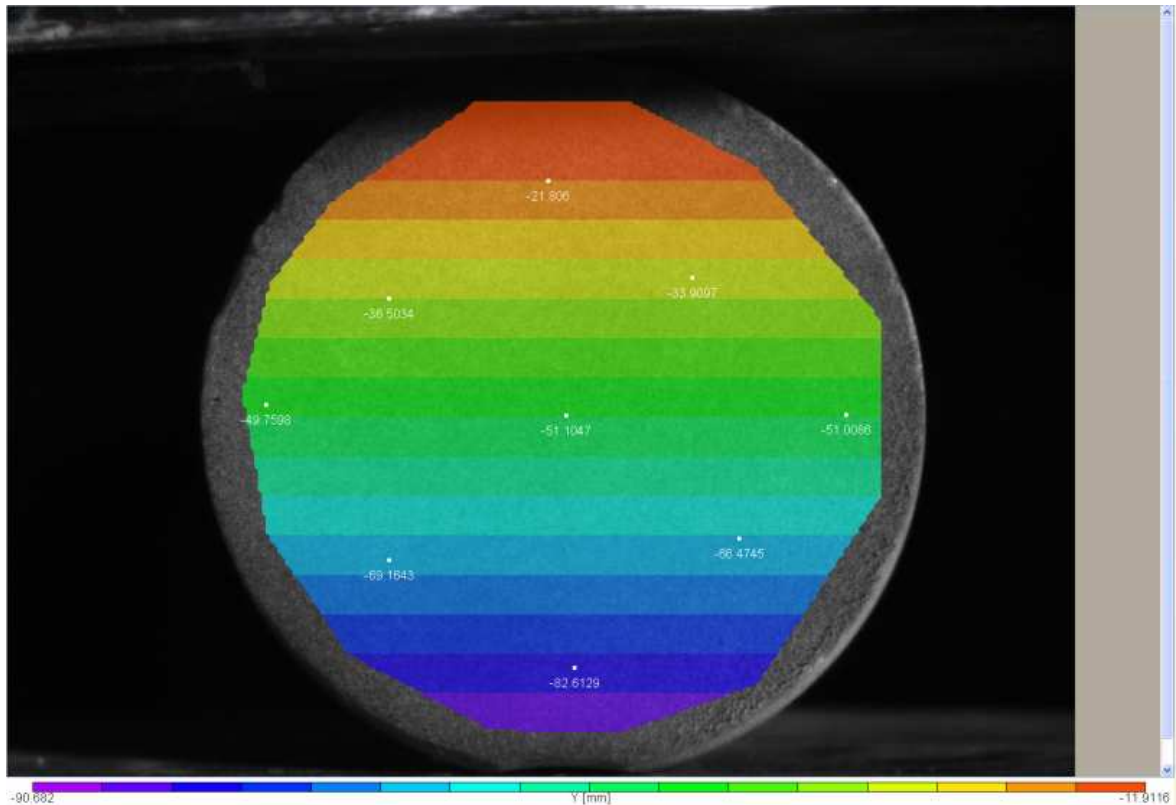
Εικόνα 5-18: Η κλίμακα που απεικονίζει την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή των χρωμάτων.

5.7.1. Η Αρχή των Αξόνων του Συστήματος Συντεταγμένων των Εικόνων

Σε αυτήν την υποενότητα, γίνεται μία διερεύνηση για τη θέση της αρχής των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των εικόνων. Η διερεύνηση αυτή είναι σημαντική για την ερμηνεία των προσήμων των τιμών των μετατοπίσεων. Με άλλα λόγια, είναι άκρως ενδιαφέρον να μπορεί κανείς να κατανοήσει το πώς και προς ποια κατεύθυνση μετακινούνται τα σημεία της επιφάνειας του δείγματος. Έτσι, λοιπόν, προκύπτει ότι βρίσκεται στην πάνω αριστερή γωνία. Αυτό φαίνεται στις παρακάτω εικόνες και στη συνέχεια εξηγείται αναλυτικά:

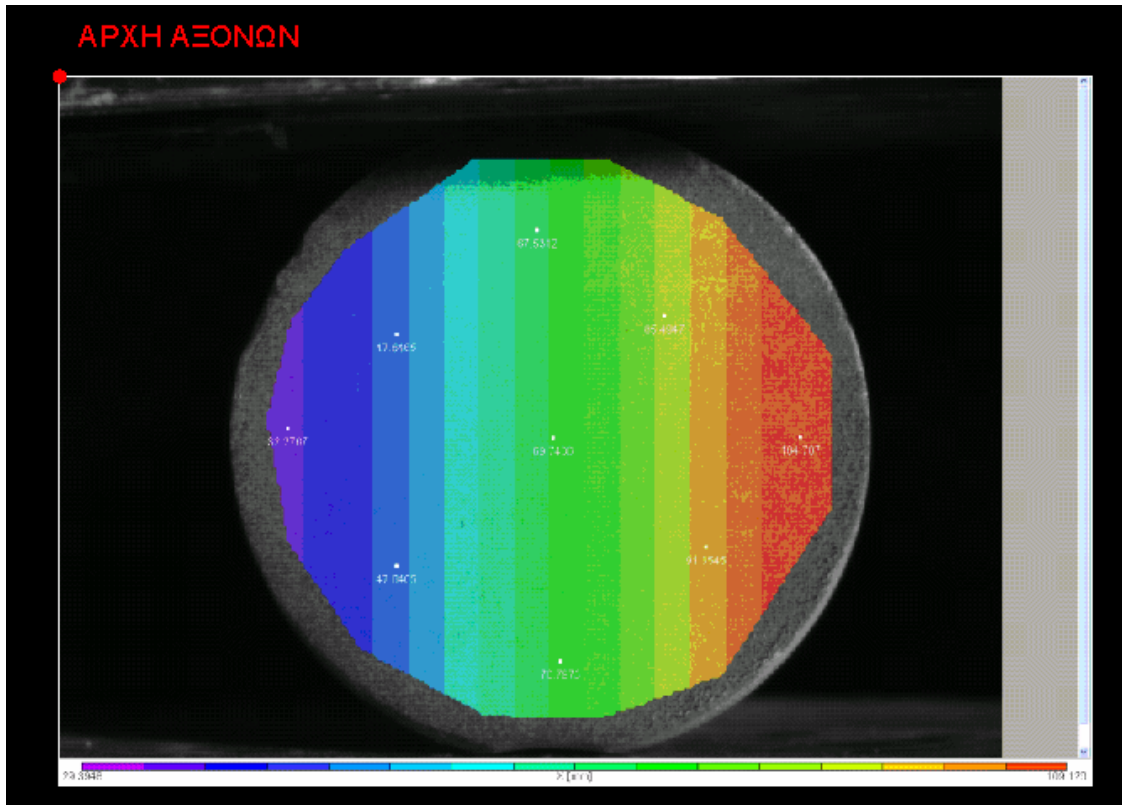


Εικόνα 5-19: Η οριζόντια θέση X σημείων σε mm.

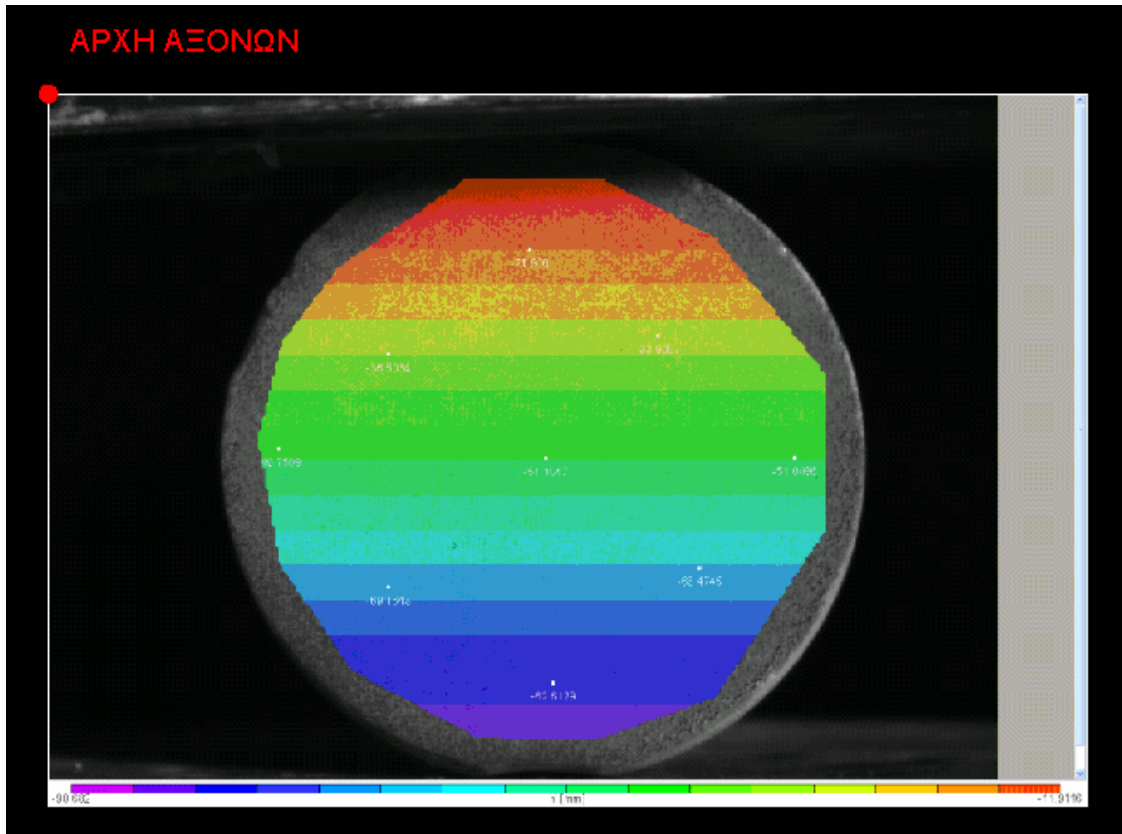


Εικόνα 5-20: Η κατακόρυφη θέση Y σημείων σε mm.

Στην εικόνα 5-20, η οποία απεικονίζει τις οριζόντιες θέσεις X σημείων σε mm, παρατηρείται ότι οι τιμές των σημείων, που έχουν ληφθεί εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, είναι θετικές. Αντιθέτως, στην εικόνα 5-21, η οποία απεικονίζει τις κατακόρυφες θέσεις Y σημείων σε mm, παρατηρείται ότι οι τιμές των σημείων, που έχουν ληφθεί εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, είναι αρνητικές. Αυτό σημαίνει ότι τα σημεία αυτά βρίσκονται στο 4^ο τεταρτημόριο και συνεπάγεται ότι η αρχή των αξόνων βρίσκεται πάνω αριστερά. Επιπλέον, αυτό επιβεβαιώνεται και όταν ακουμπήσουμε τον κέρσορα στην πάνω αριστερή γωνία. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι οι συντεταγμένες του πάνω αριστερού pixel είναι (0,0). Η θέση της αρχής των αξόνων φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



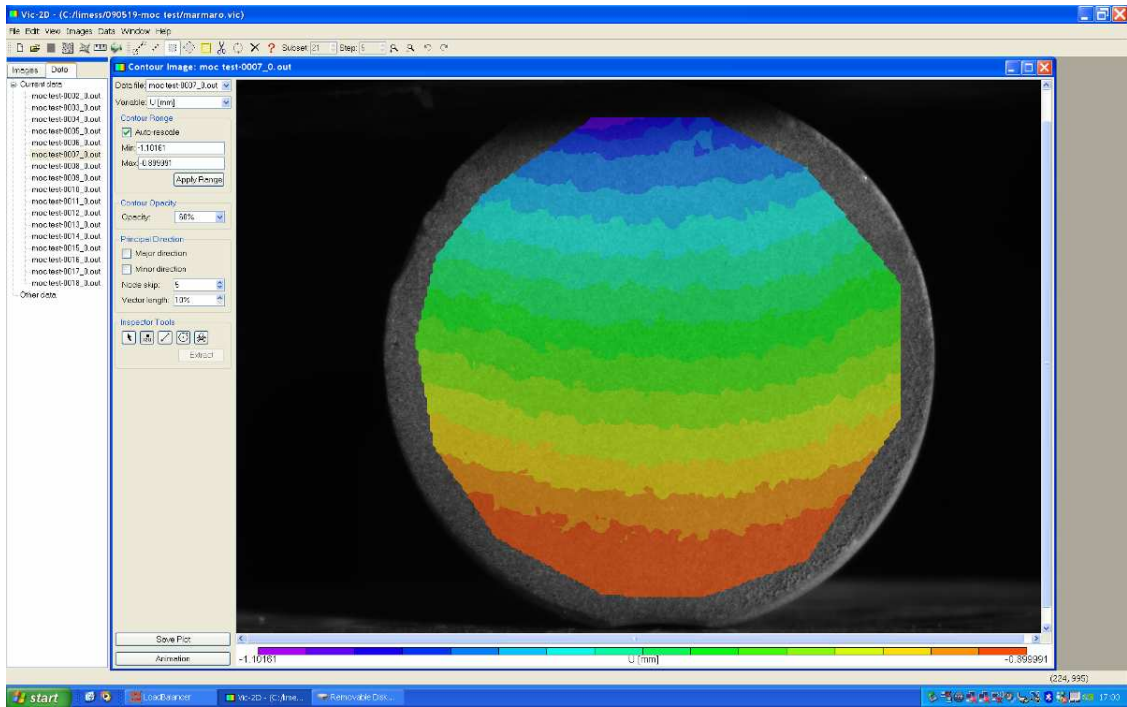
Εικόνα 5-21: Η αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων των εικόνων, όπως φαίνεται στο σχήμα των οριζόντιων θέσεων X.



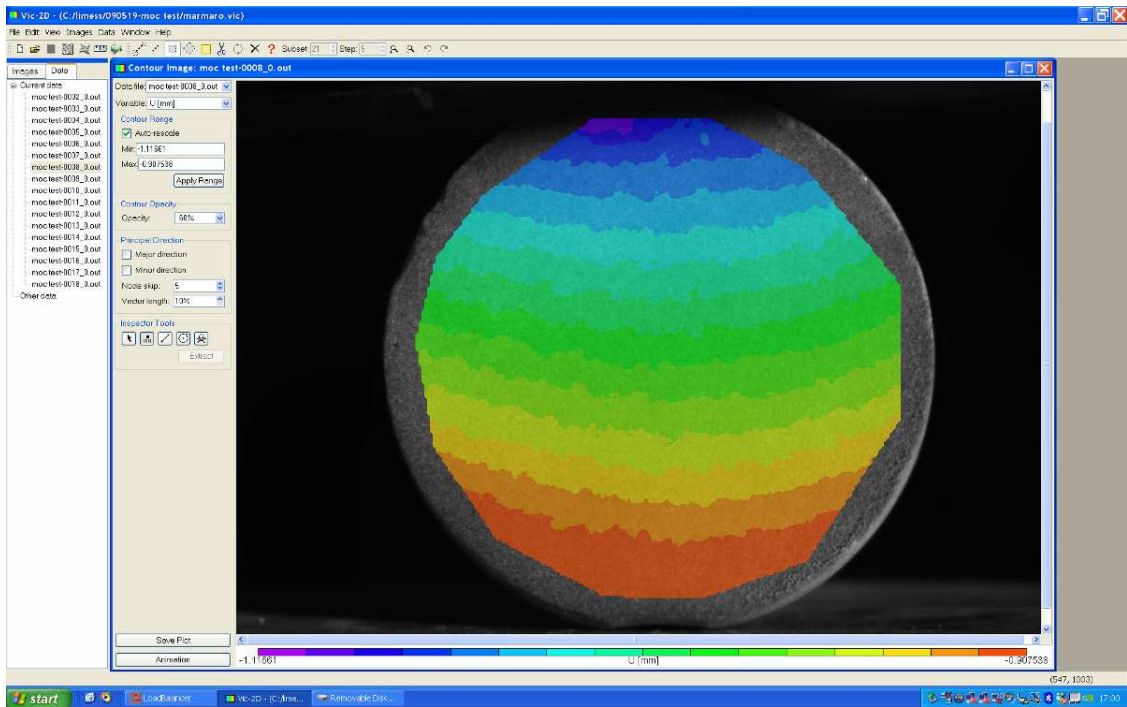
Εικόνα 5-22: Η αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων των εικόνων, όπως φαίνεται στο σχήμα των κατακόρυφων θέσεων.

5.7.2. Το Πεδίο Μετατοπίσεων U κατά X

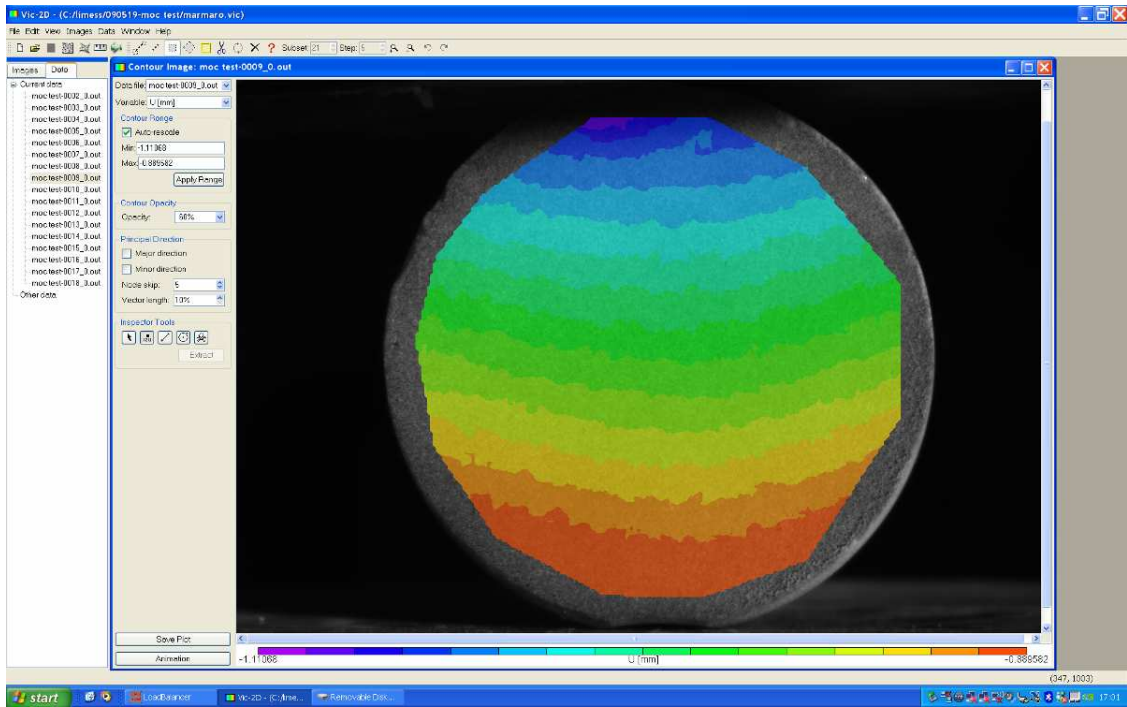
Σε αυτήν την υποενότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα που των οριζοντίων μετατοπίσεων. Παρακάτω παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων, τα οποία απεικονίζουν το πεδίο των μετατοπίσεων U κατά X:



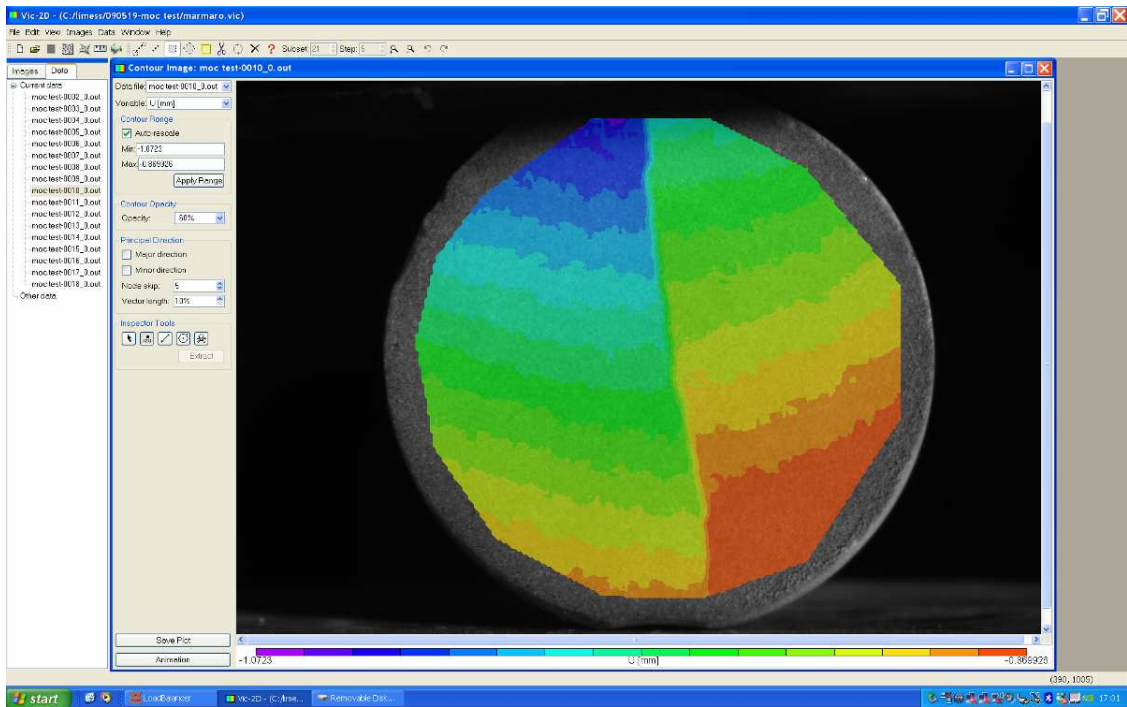
Εικόνα 5-23: Το πεδίο μετατοπίσεων U κατά X της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 5-24: Το πεδίο μετατοπίσεων U κατά X της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



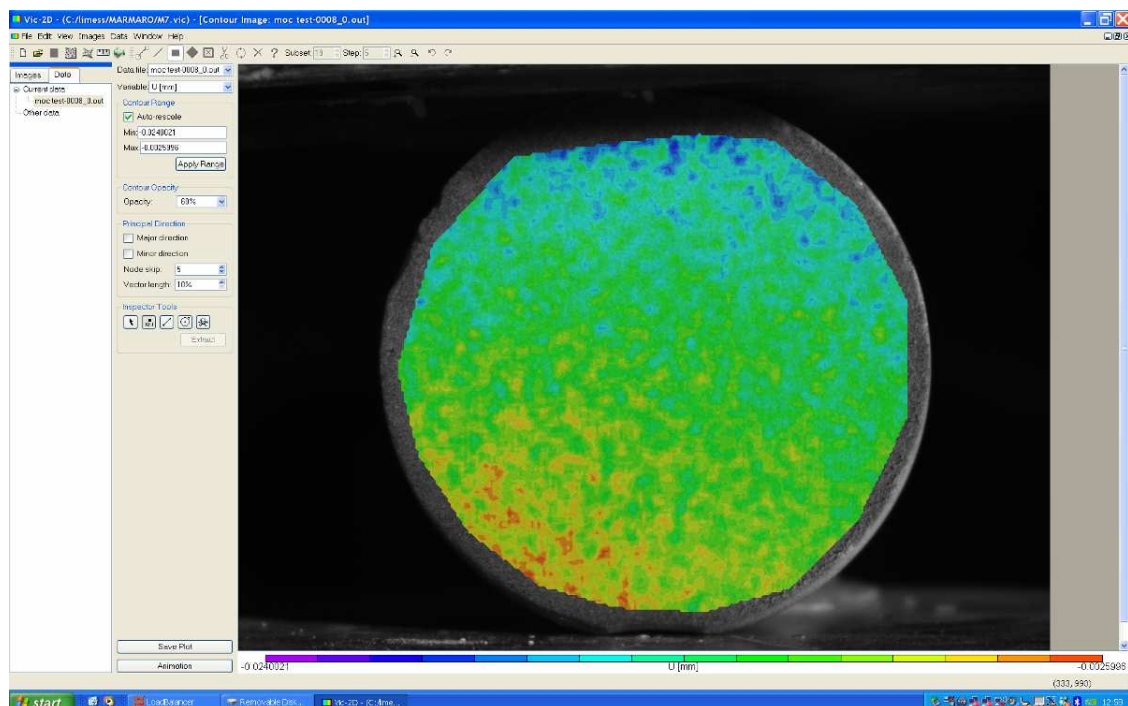
Εικόνα 5-25: Το πεδίο μετατοπίσεων U κατά X της 9^{15} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.



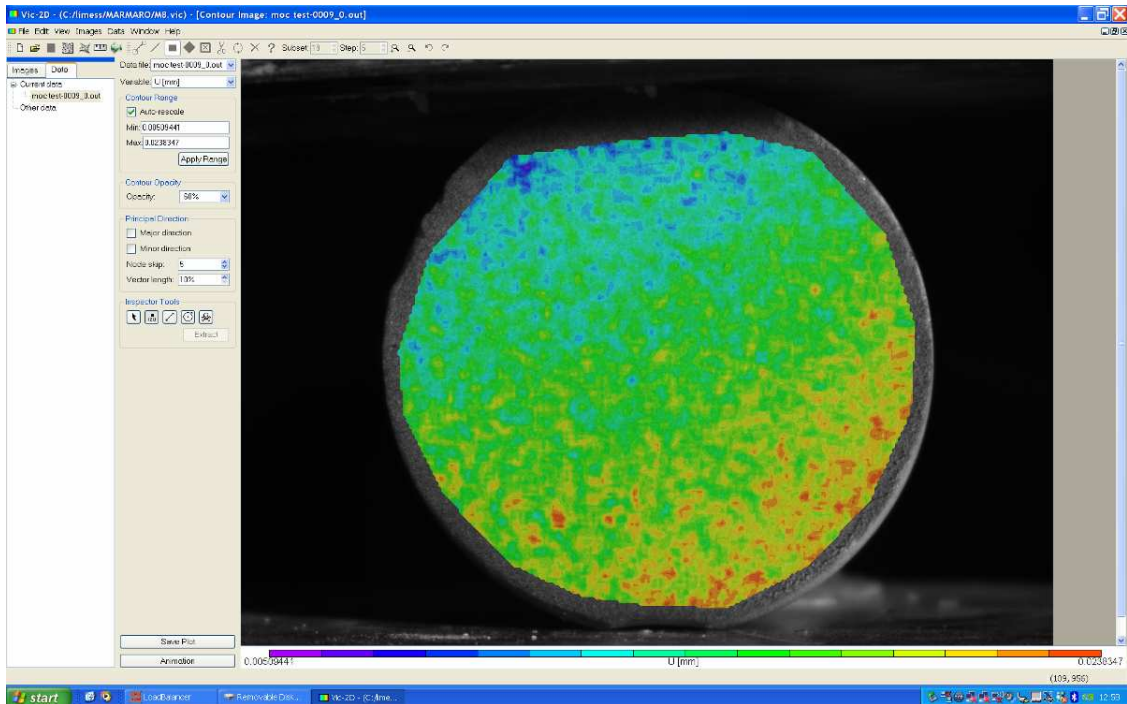
Εικόνα 5-26: Το πεδίο μετατοπίσεων U κατά X της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.

Παρατηρείται ότι η διάταξη είναι απολύτως συμμετρική, δηλαδή οι ισარიθμικές καμπύλες είναι παράλληλες, μέχρι και πριν τη δημιουργία της ρωγμής. Οι εικόνες 5-23, 5-24 και 5-25 απεικονίζουν την κατάσταση του δείγματος μαρμάρου λίγο πριν τη δημιουργία της ρωγμής. Η εικόνα 5-26 απεικονίζει τη ρωγμή που δημιουργείται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα και αφού το δείγμα έχει δεχθεί το απαραίτητο φορτίο. Ακόμη, από τη μορφή της διάταξης φαίνεται ότι το δείγμα «πατάει» καλά πάνω στη μηχανή θλίψης, καθώς δεν εμφανίζει στροφή. Επιπρόσθετα, εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα για τις εικόνες των οριζόντιων μετατοπίσεων, ότι το μωβ χρώμα αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη απόλυτη τιμή της μετατόπισης κατά X στο πάνω μέρος του δείγματος, ενώ το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στη μικρότερη απόλυτη τιμή της μετατόπισης κατά X στο κάτω μέρος του δείγματος. Αν και δεν έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους, καθώς στις ψυχρές περιοχές οι μετατοπίσεις είναι της τάξης του 1,1 mm, ενώ στις θερμές περιοχές της τάξης του 0,9 mm.

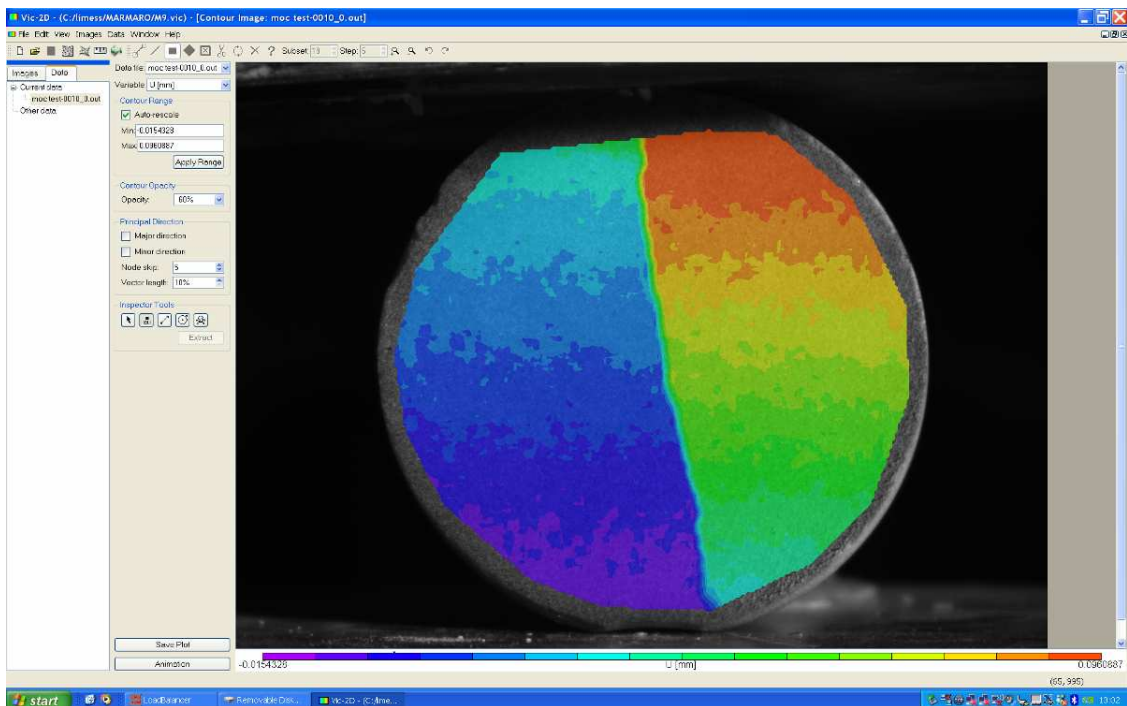
Αν πραγματοποιηθεί η διαδικασία της συσχέτισης, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα για τις οριζόντιες μετατοπίσεις U:



Εικόνα 5-27: Το σχήμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 7^η παραμορφωμένη εικόνα.



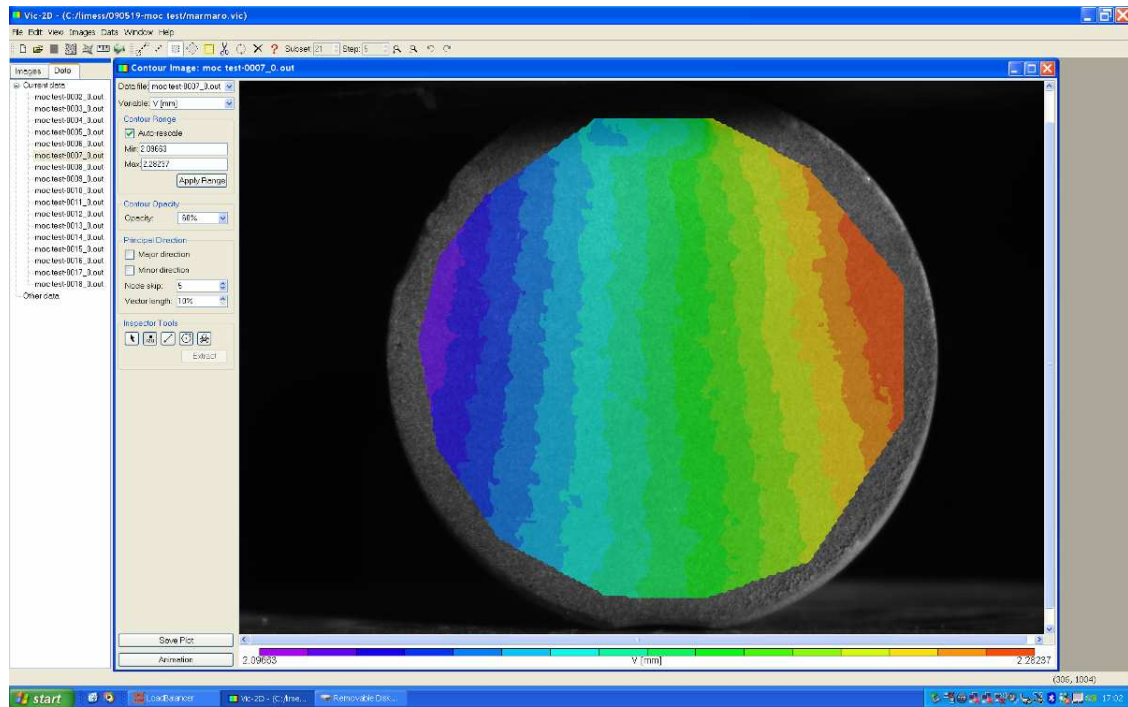
Εικόνα 5-28: Το σχήμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8^η παραμορφωμένη εικόνα.



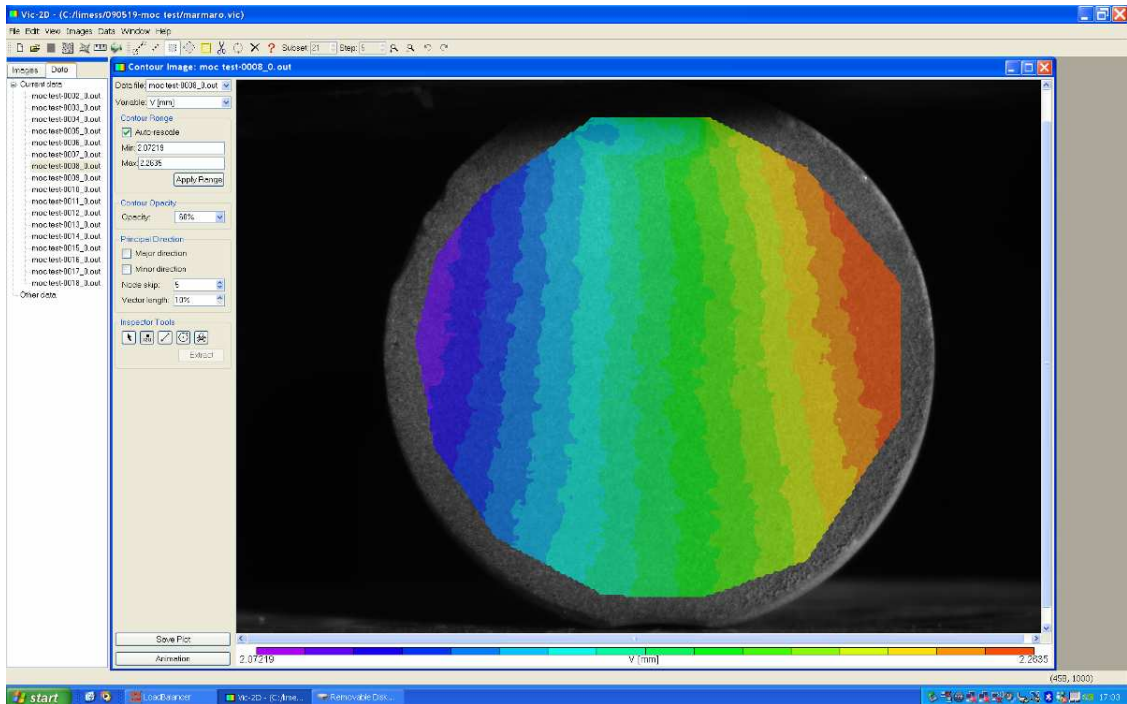
Εικόνα 5-29: Το σχήμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της 10^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 9^η παραμορφωμένη εικόνα.

5.7.3. Το Πεδίο Μετατοπίσεων V κατά Y

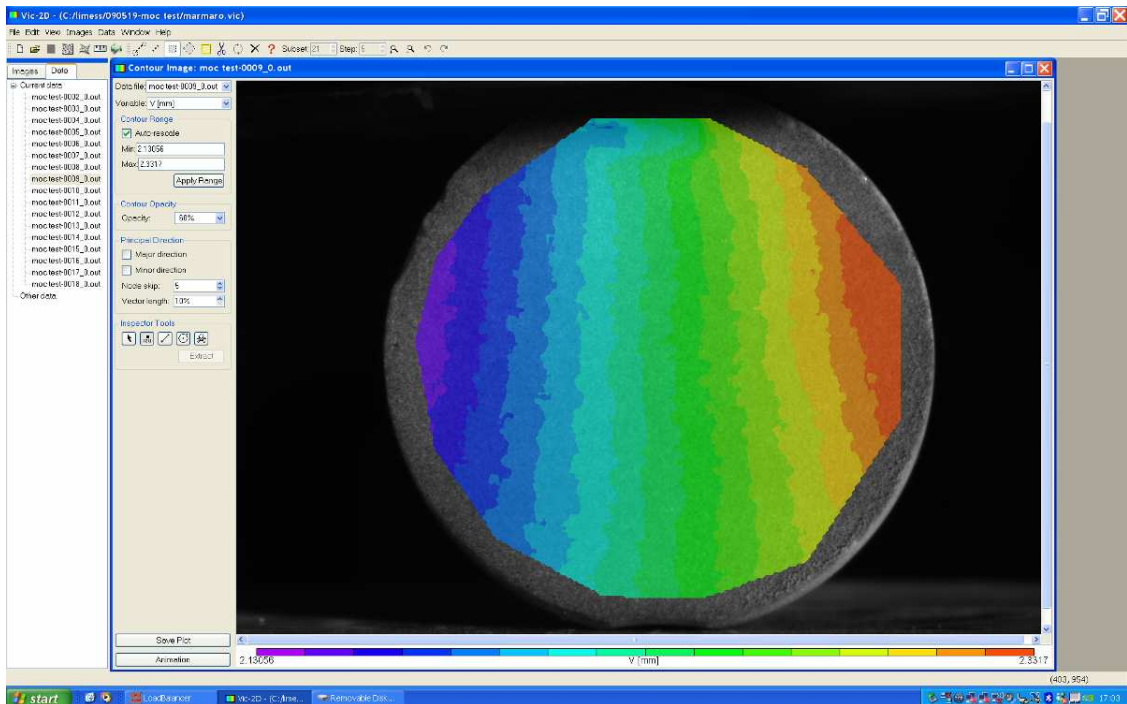
Στην παρούσα υποενοότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα των κάθετων μετατοπίσεων. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων, τα οποία απεικονίζουν το πεδίο των κάθετων μετατοπίσεων V κατά Y:



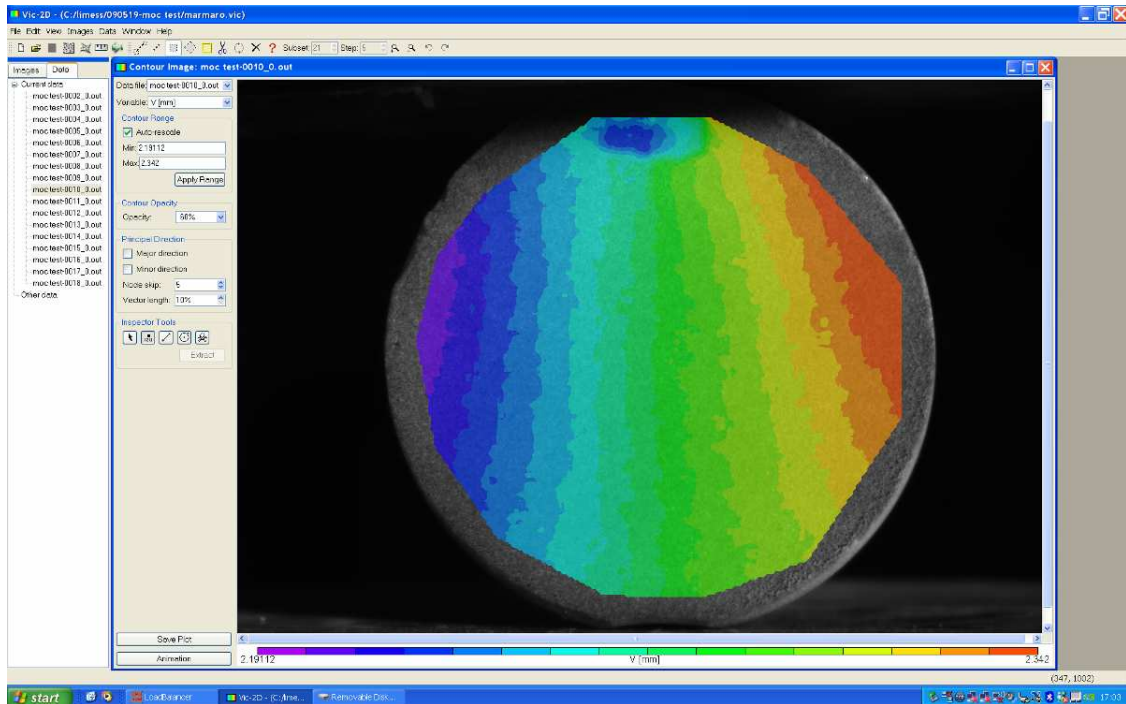
Εικόνα 5-30: Το πεδίο μετατοπίσεων V κατά Y της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 5-31: Το πεδίο μετατοπίσεων V κατά Y της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



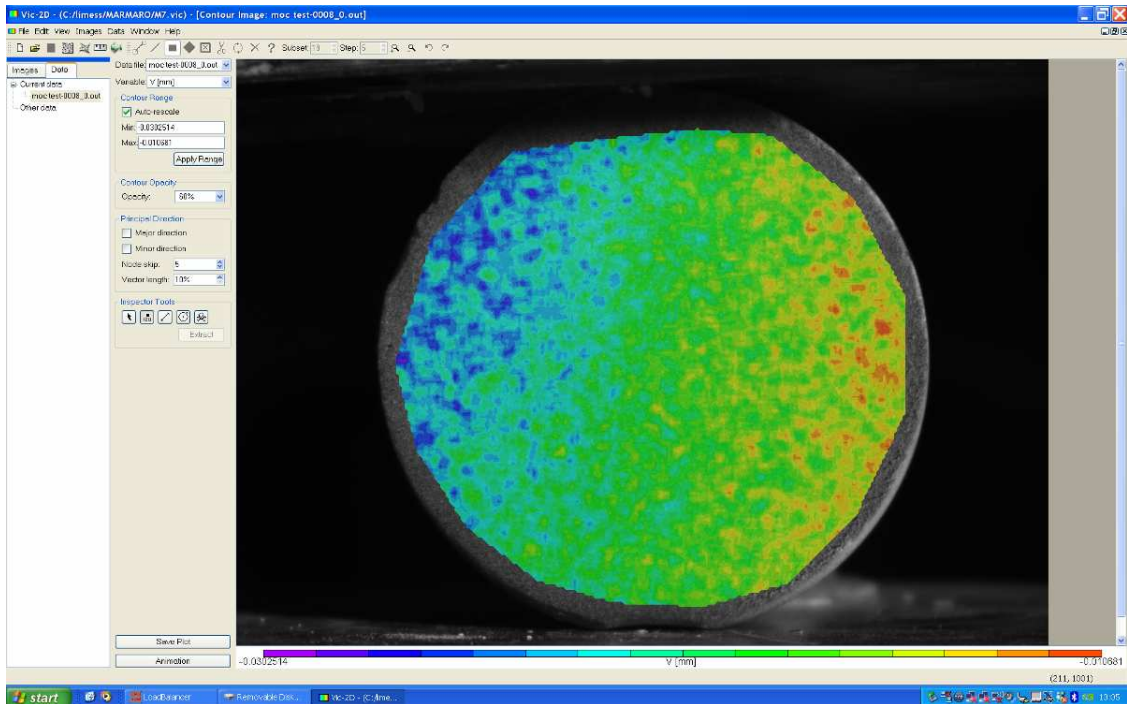
Εικόνα 5-32: Το πεδίο μετατοπίσεων V κατά Y της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.



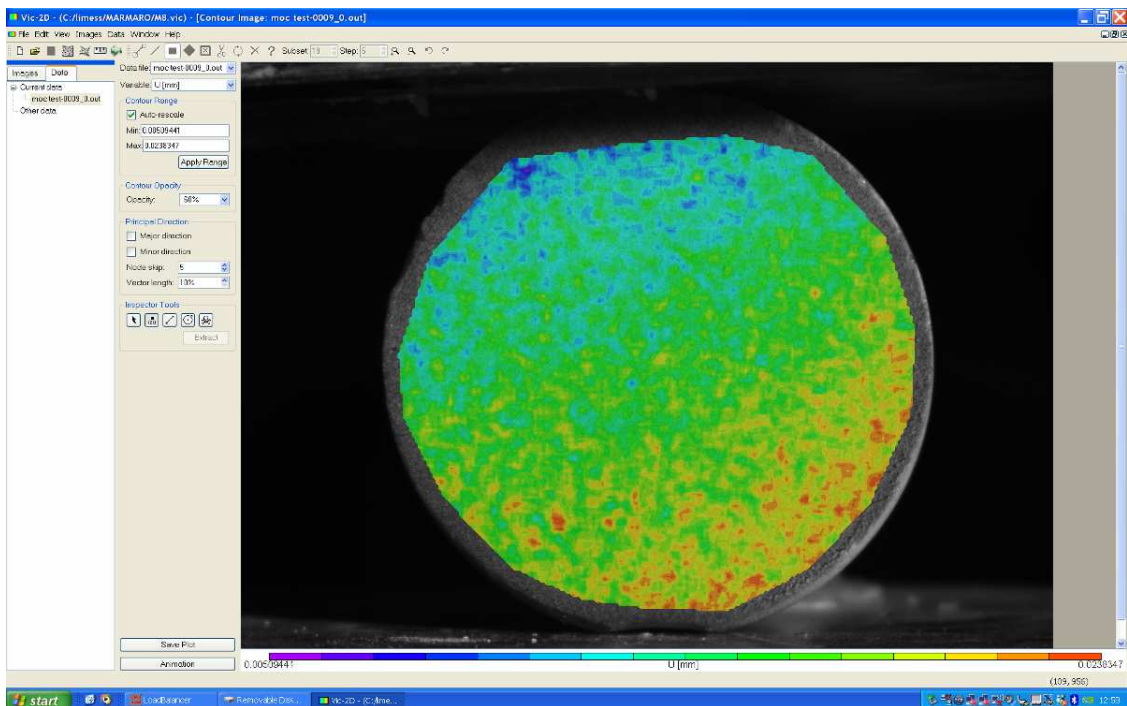
Εικόνα 5-33: Το πεδίο μετατοπίσεων V κατά Y της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.

Παρατηρείται ότι το μωβ χρώμα αντιστοιχεί στις χαμηλότερες τιμές, ενώ το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στις υψηλότερες τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων. Επίσης, είναι σημαντικό να δοθεί έμφαση στην ελλειψοειδή περιοχή με το μπλε χρώμα το οποίο δημιουργείται στο πάνω μέρος του δείγματος τη στιγμή της θραύσης. Αυτό μας υποδεικνύει το σημείο στο οποίο αρχίζει η θραύση. Τέλος, σημειώνεται ότι οι τιμές των κάθετων μετατοπίσεων είναι θετικές, πράγμα που σημαίνει ότι η μηχανή θλίψης που χρησιμοποιήθηκε ασκεί δύναμη στο δοκίμιο από το κάτω μέρος.

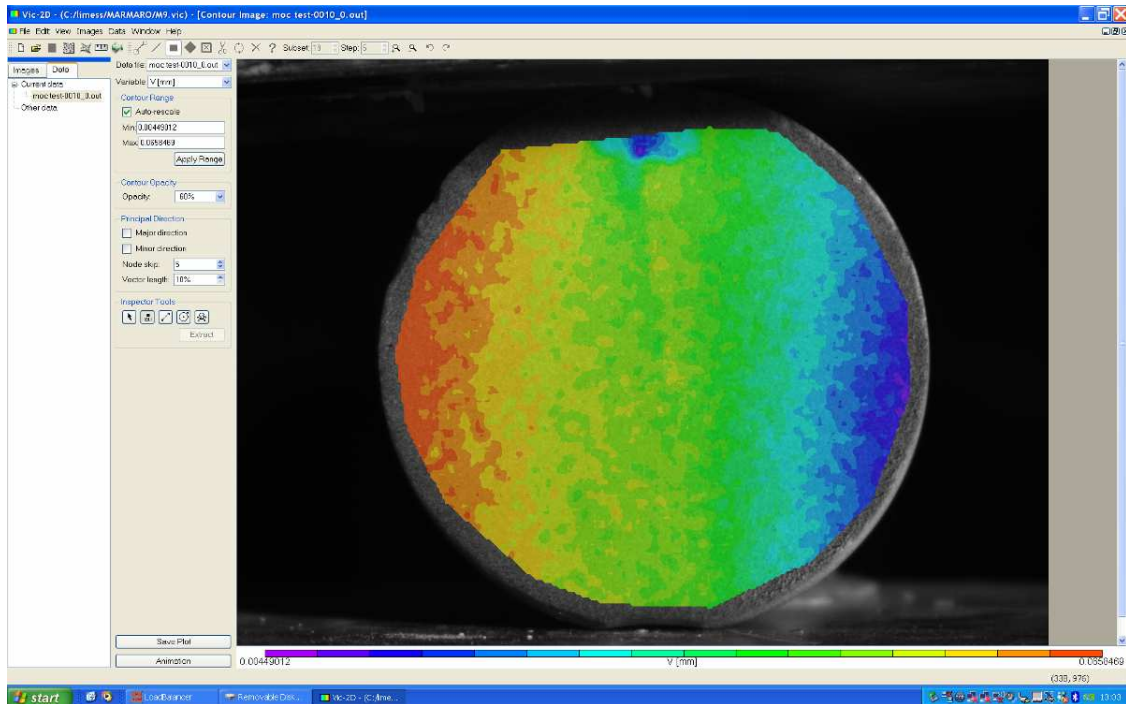
Αν πραγματοποιηθεί η διαδικασία της συσχέτισης, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για τις κάθετες μετατοπίσεις V:



Εικόνα 5-34: Το σχήμα των κάθετων μετατοπίσεων V της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, οριζοντας ως εικόνα αναφοράς την 7^η παραμορφωμένη εικόνα.



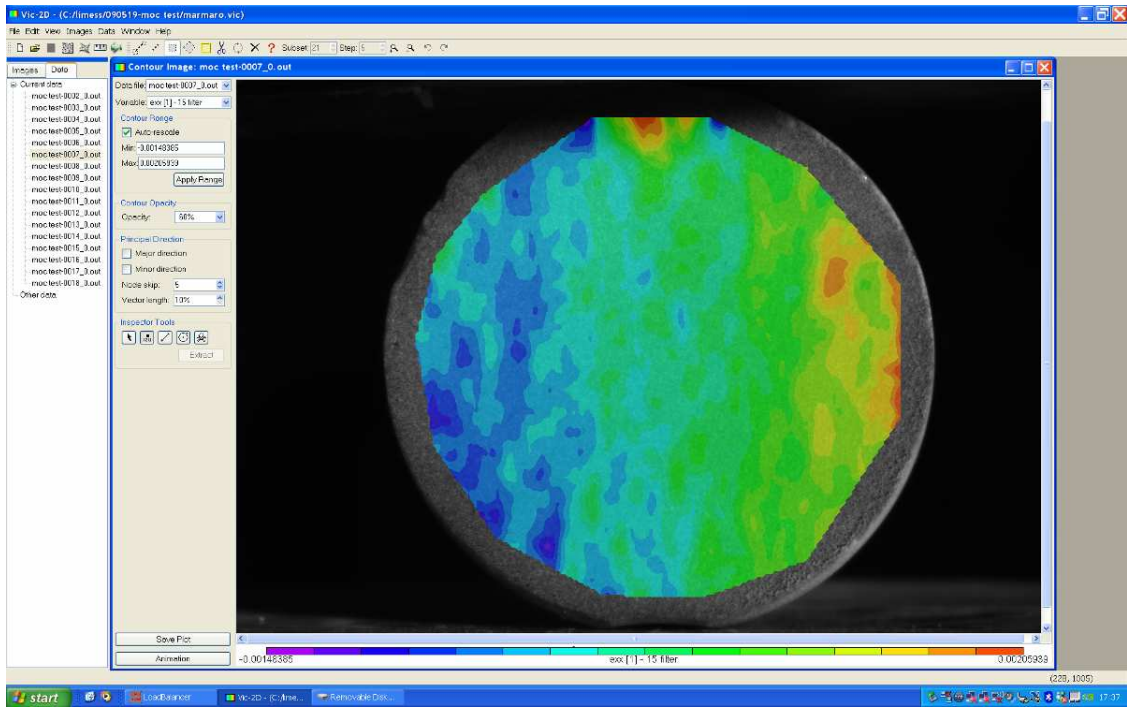
Εικόνα 5-35: Το σχήμα των κάθετων μετατοπίσεων V της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, οριζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8^η παραμορφωμένη εικόνα.



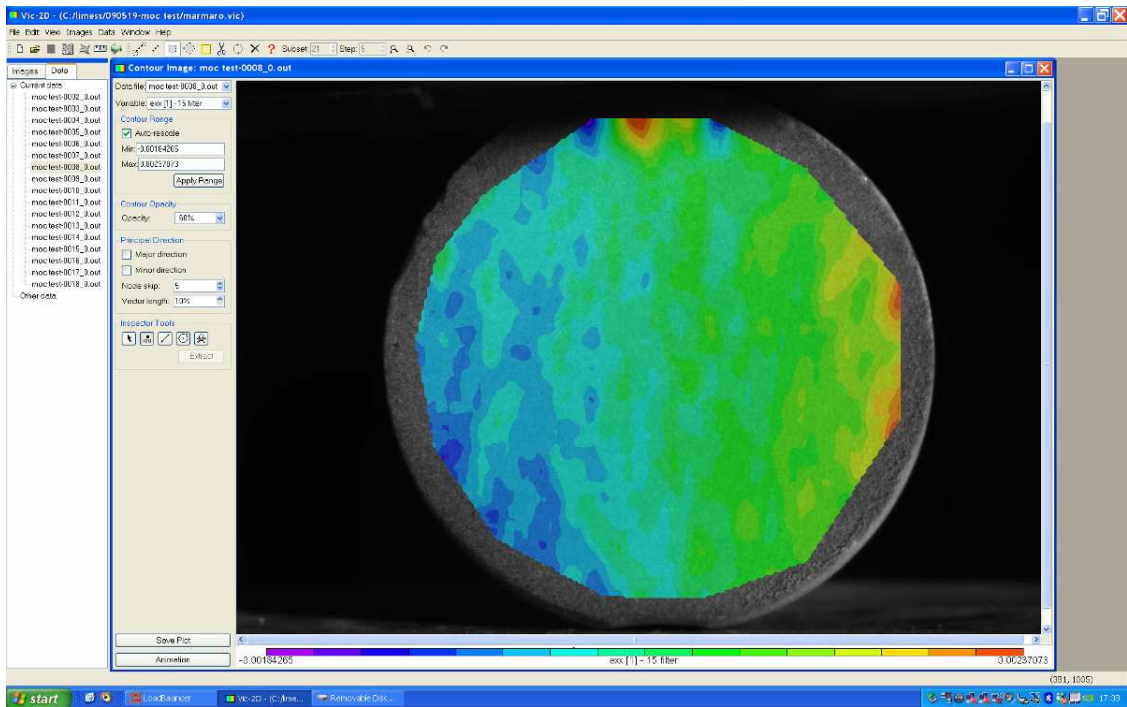
Εικόνα 5-36: Το σχήμα των κάθετων μετατοπίσεων V της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας, οριζοντας ως εικόνα αναφοράς την $9^{\text{η}}$ παραμορφωμένη εικόνα.

5.7.4. Το Πεδίο Ανηγμένων Παραμορφώσεων ϵ_{xx}

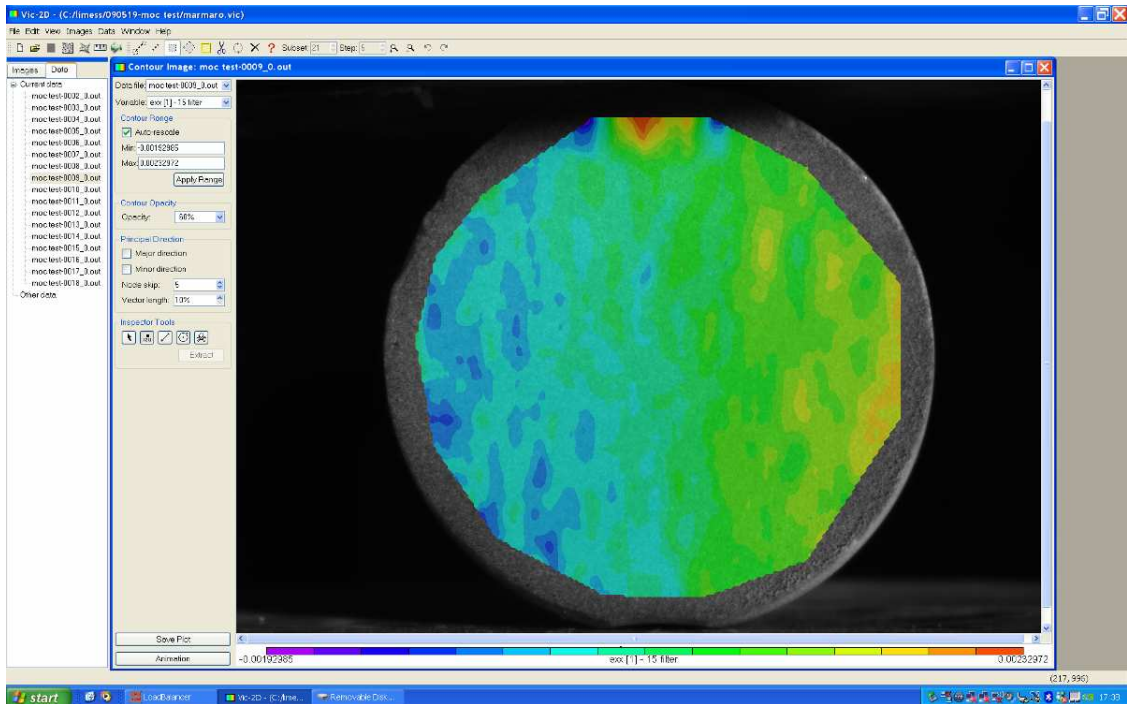
Στη συγκεκριμένη υποενότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά x . Παράλληλα, παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων, τα οποία απεικονίζουν το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{xx} κατά X :



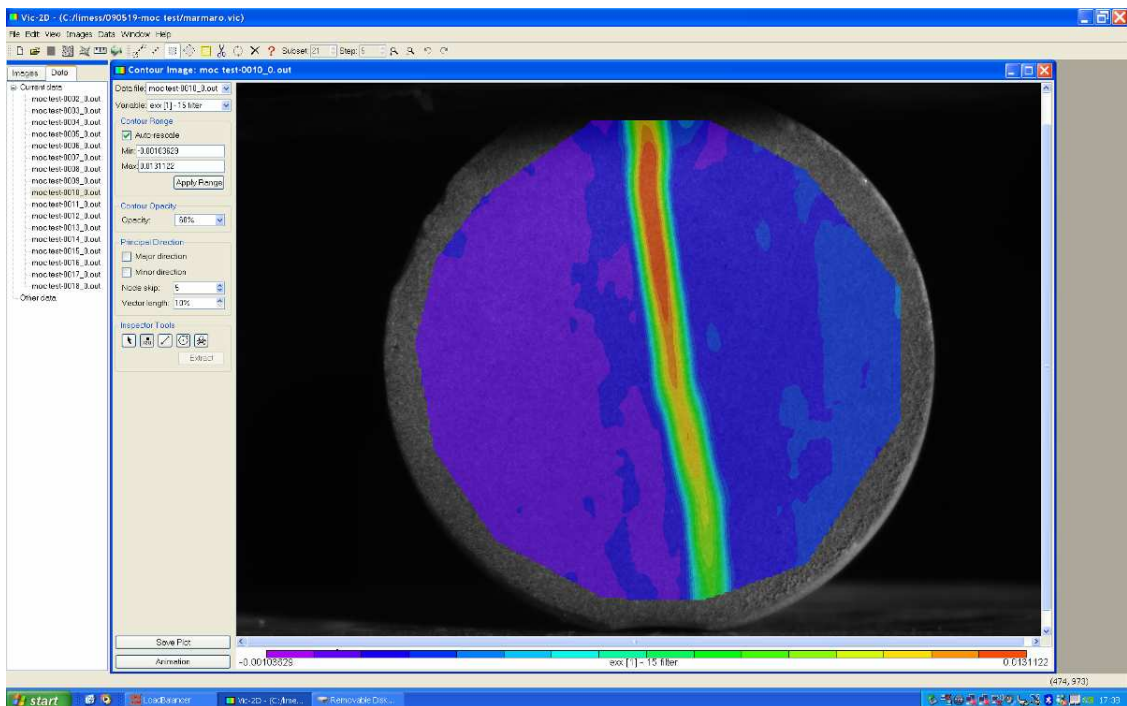
Εικόνα 5-37: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{xx} της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 5-38: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{xx} της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



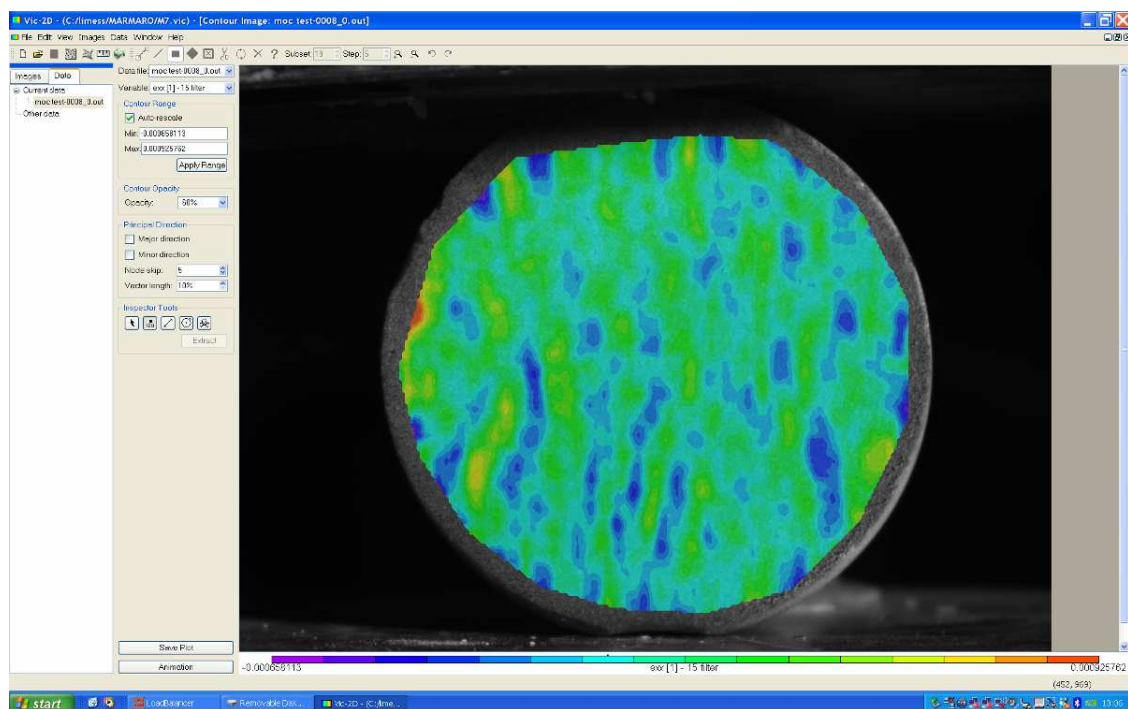
Εικόνα 5-39: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 9^{th} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.



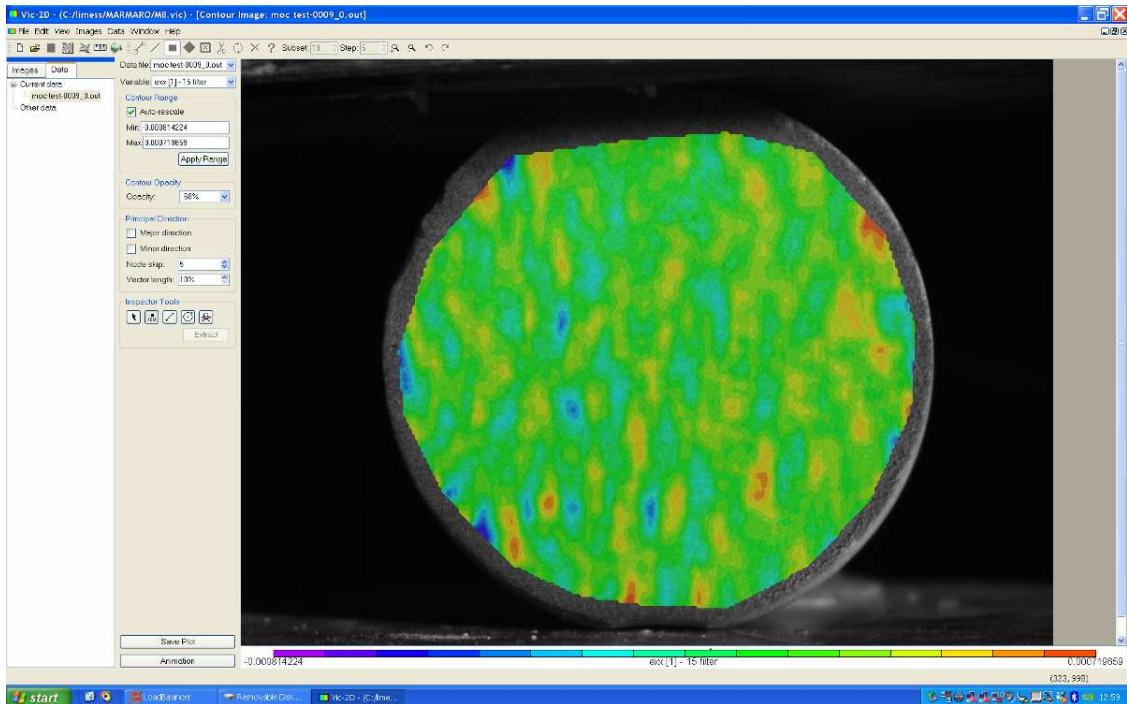
Εικόνα 5-40: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 10^{th} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.

Στα σχήματα των οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων παρατηρείται ότι το μωβ χρώμα αντιπροσωπεύει την χαμηλότερη θετική ή τη μεγαλύτερη αρνητική τιμή. Αντιθέτως, το κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη θετική ή τη χαμηλότερη αρνητική τιμή. Γενικά, παρατηρείται ότι οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} στις κόκκινες περιοχές είναι κατ' απόλυτο μεγαλύτερες από αυτές των μωβ περιοχών. Πιο συγκεκριμένα, στην εικόνα 5-40, δηλαδή στο σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας, παρατηρεί κανείς τη ρωγμή που έχει δημιουργηθεί. Εύκολα συμπεραίνεται ότι η θλίψη του δείγματος αρχίζει από το πάνω μέρος και σταδιακά προχωράει προς τα κάτω. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η περιοχή στην οποία δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση το δείγμα μαρμάρου που εξετάζεται.

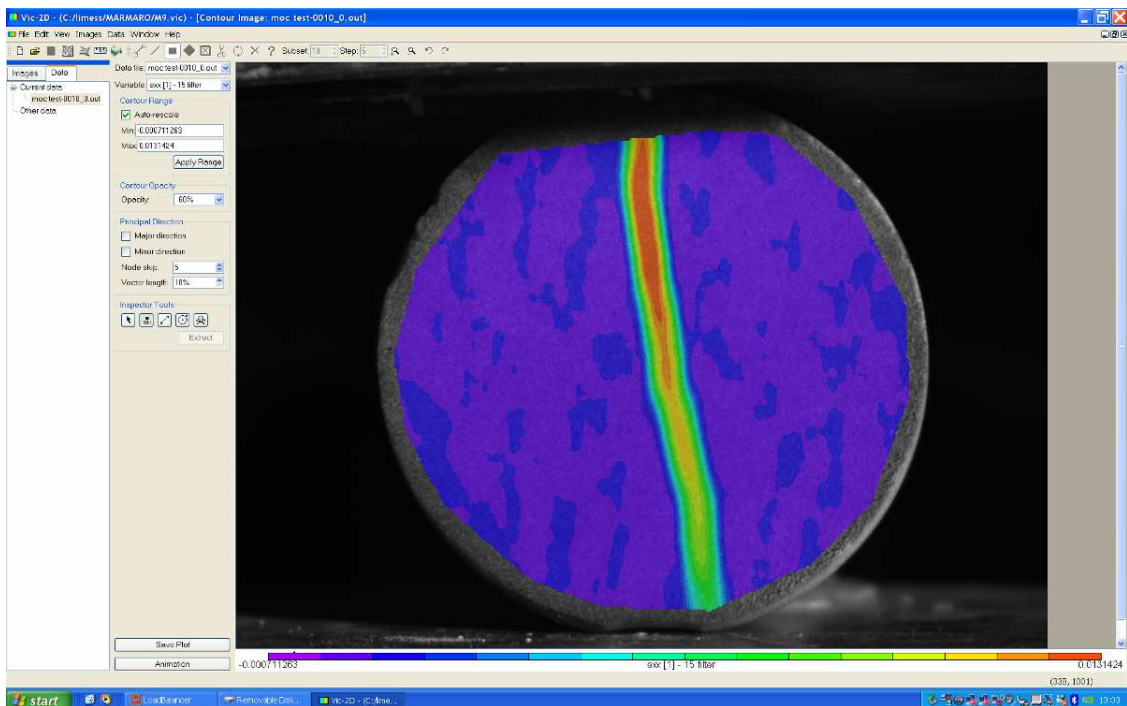
Αν πραγματοποιηθεί η διαδικασία της συσχέτισης, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για τις ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} :



Εικόνα 5-41: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της 8^{15} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την $7^{\text{η}}$ παραμορφωμένη εικόνα.



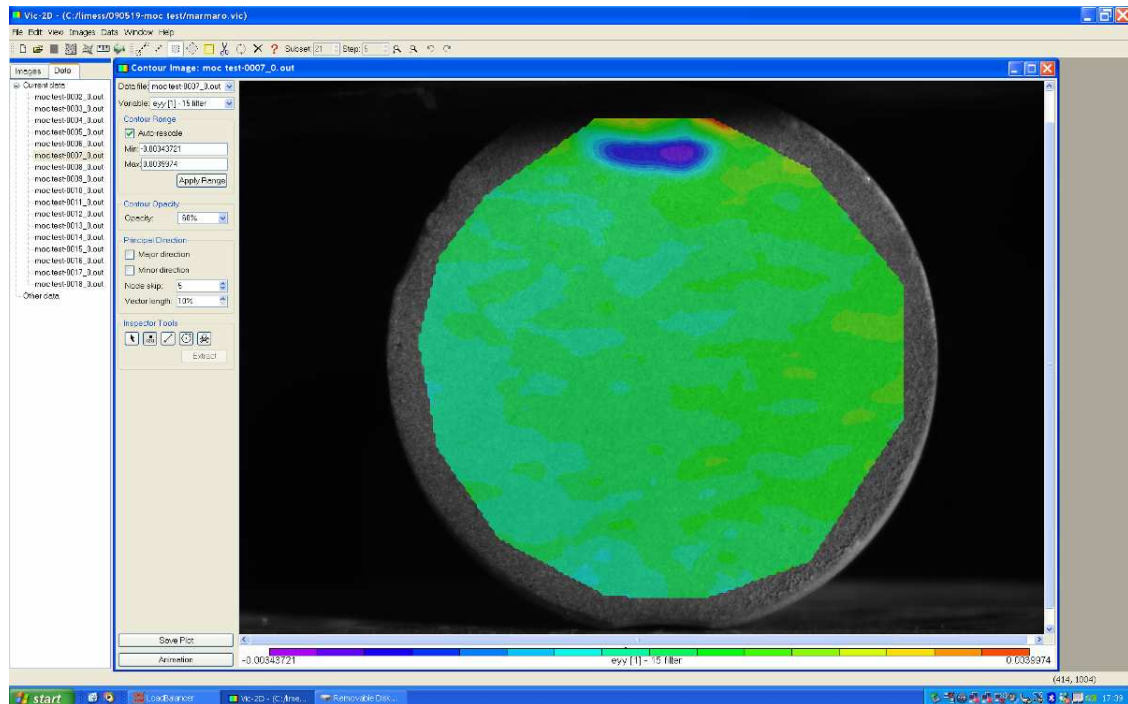
Εικόνα 5-42: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{xx} της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, οριζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8^η παραμορφωμένη εικόνα.



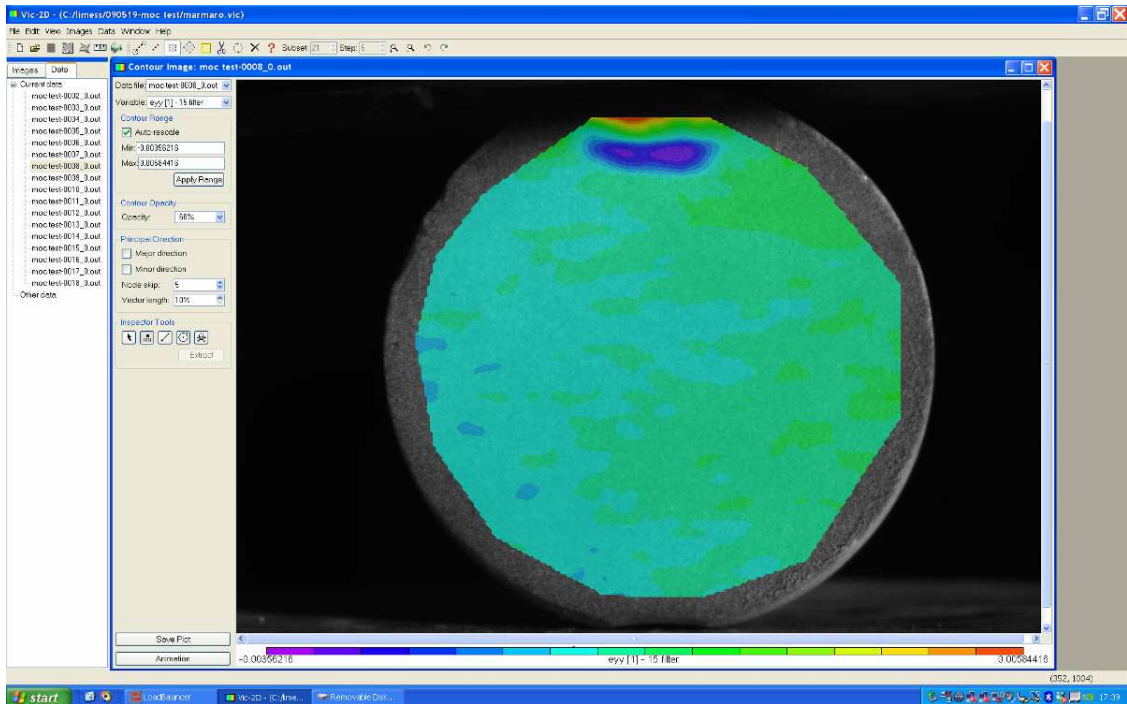
Εικόνα 5-43: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{xx} της 10^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, οριζοντας ως εικόνα αναφοράς την 9^η παραμορφωμένη εικόνα.

5.7.5. Το Πεδίο Ανηγμένων Παραμορφώσεων ϵ_{yy}

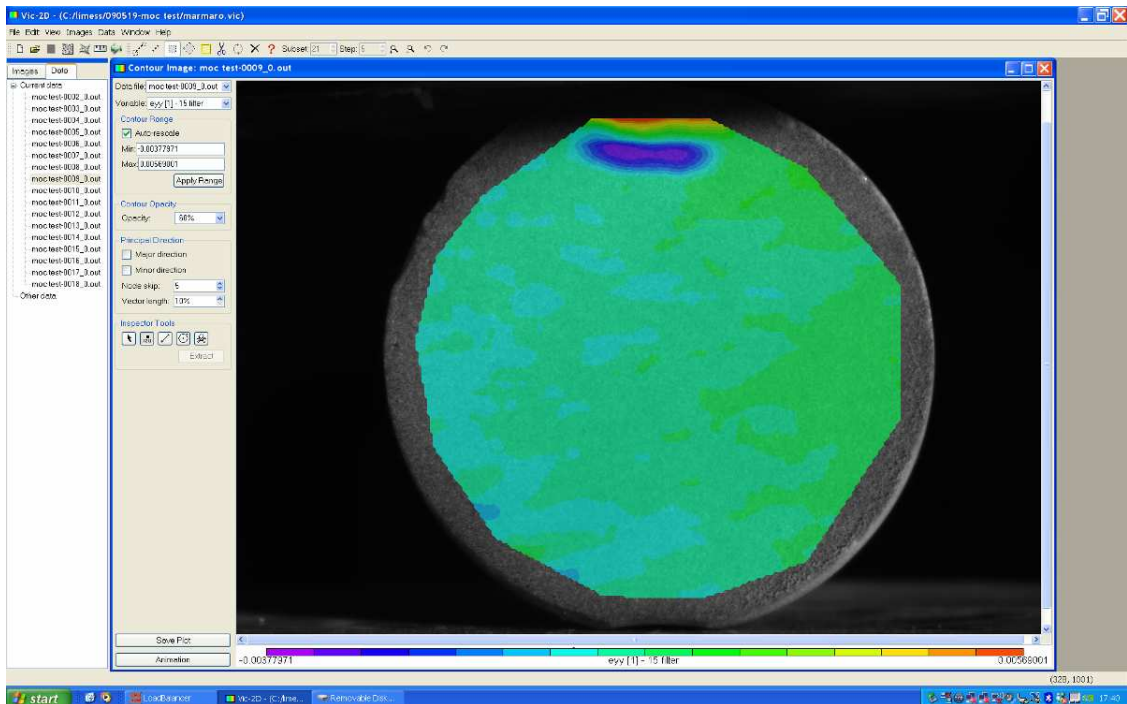
Σε αυτήν την υποενότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά y . Επίσης, παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων, τα οποία απεικονίζουν το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{yy} κατά Y :



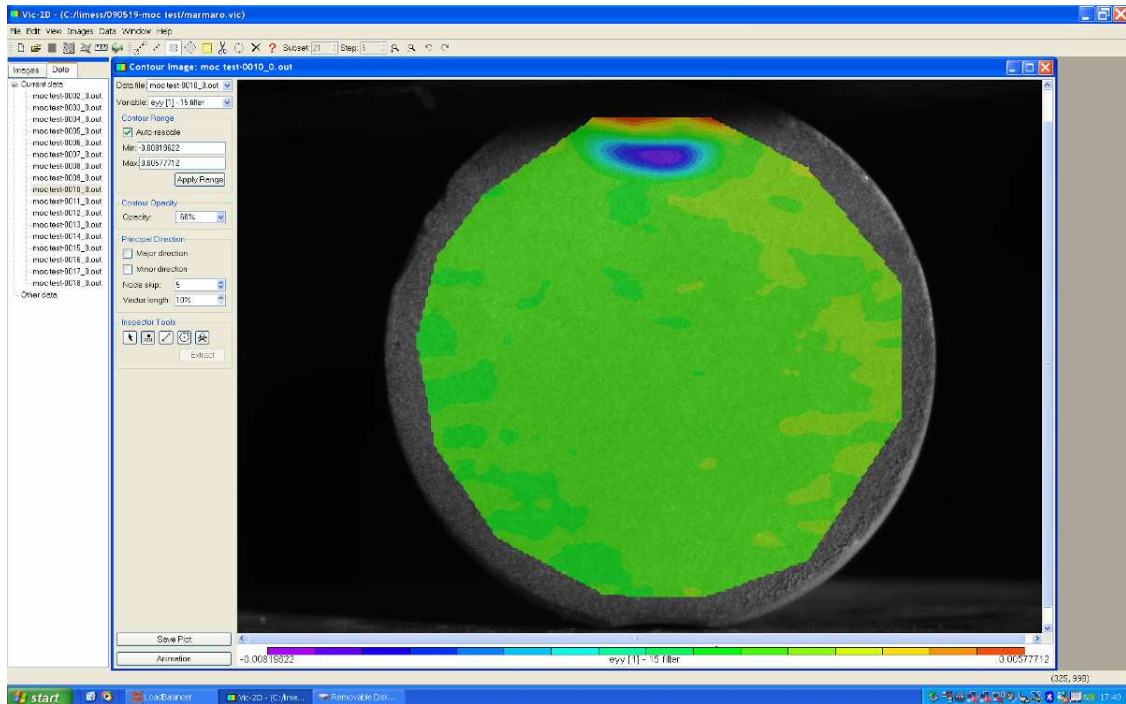
Εικόνα 5-44: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{yy} της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 5-45: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



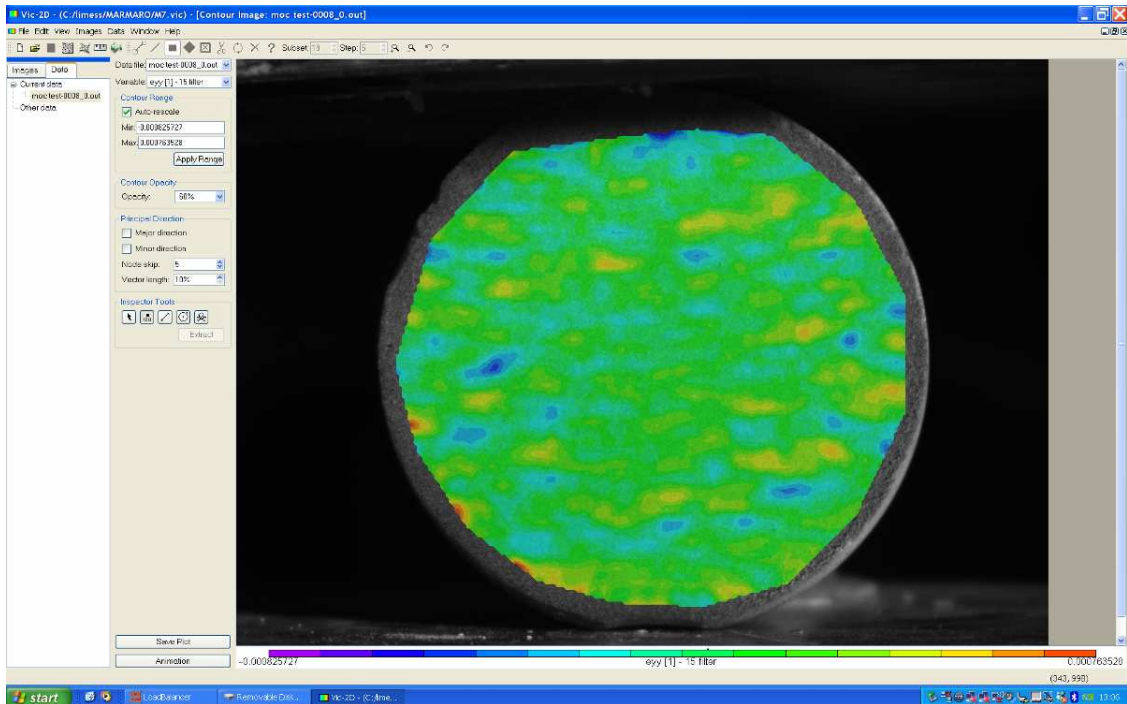
Εικόνα 5-46: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.



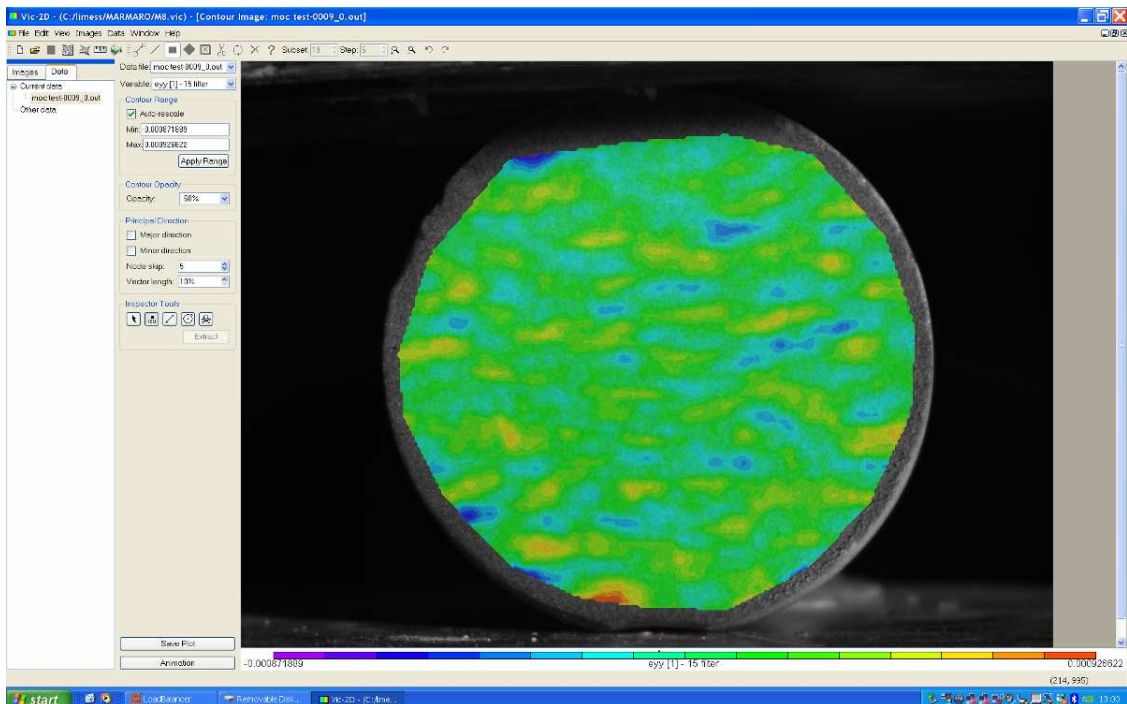
Εικόνα 5-47: Το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.

Στα σχήματα των κατακόρυφων ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} παρατηρείται ότι το μωβ χρώμα αντιπροσωπεύει την χαμηλότερη θετική ή τη μεγαλύτερη αρνητική τιμή. Αντιθέτως, το κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη θετική ή τη χαμηλότερη αρνητική τιμή. Γενικά, στις εικόνες 4-44, 4-45 και 4-46 φαίνεται ότι οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} στις κόκκινες περιοχές είναι κατ' απόλυτο μεγαλύτερες από αυτές των μωβ περιοχών. Επιπλέον, σε αυτές τις εικόνες παρατηρείται με μπλε-μωβ χρώματα η περιοχή στην οποία θα παρατηρηθεί αργότερα η μεγαλύτερη παραμόρφωση και από την οποία θα αρχίσει η θραύση του δείγματος. Από την άλλη πλευρά, στην εικόνα 4-47, παρατηρούνται μεγαλύτερες απόλυτες τιμές ανηγμένων παραμορφώσεων κατά y στις μωβ περιοχές απ' ότι στις κόκκινες περιοχές, που παρατηρούνται μικρότερες τιμές κατ' απόλυτο. Αυτό είναι λογικό, διότι η μωβ περιοχή που εμφανίζεται είναι η περιοχή που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση. Επομένως, είναι αναμενόμενο οι τιμές να είναι μεγαλύτερες κατ' απόλυτο.

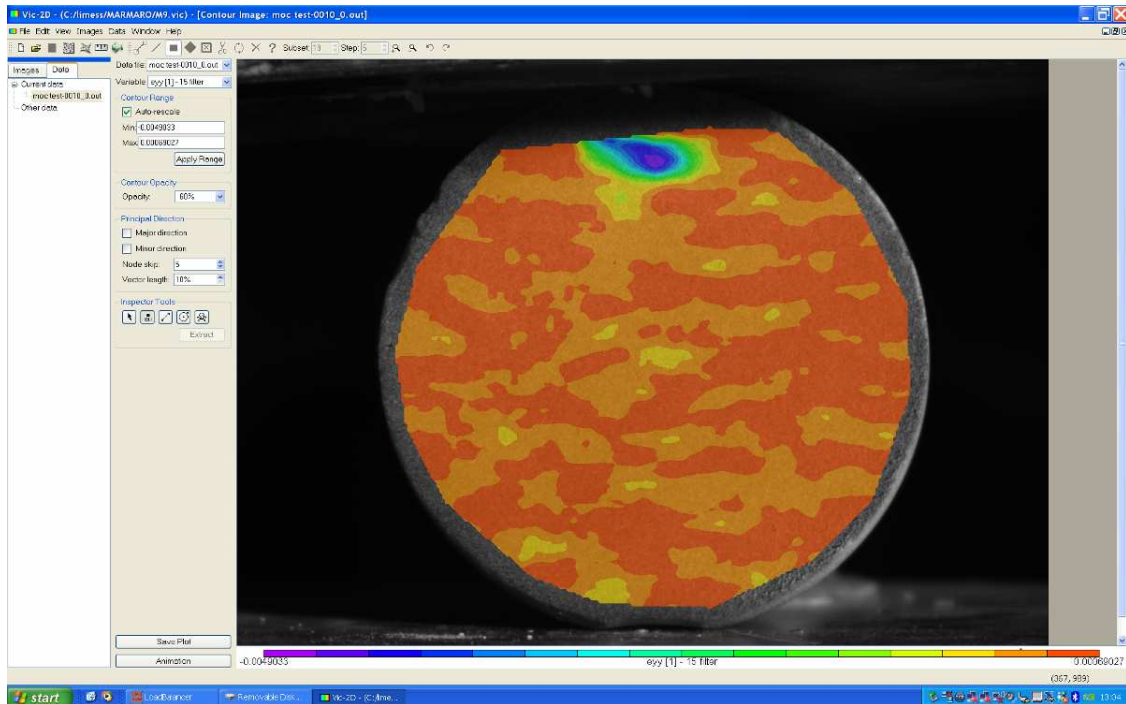
Αν πραγματοποιηθεί η διαδικασία της συσχέτισης, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για τις ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} :



Εικόνα 5-48: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 7^η παραμορφωμένη εικόνα.



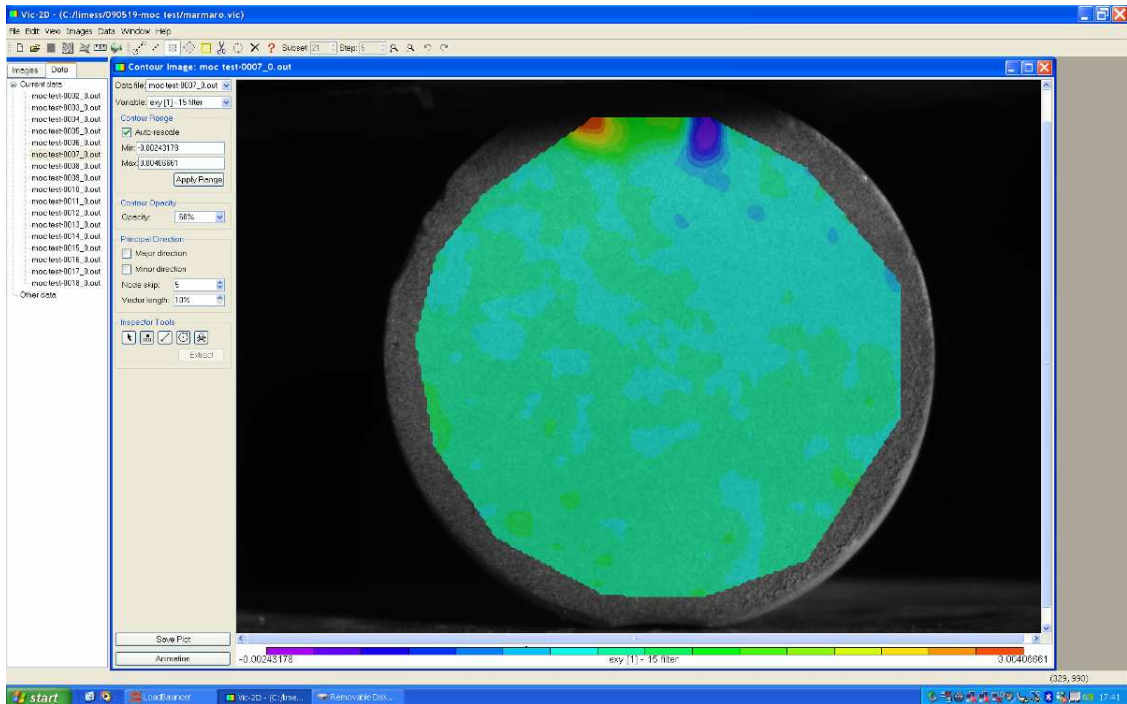
Εικόνα 5-49: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8^η παραμορφωμένη εικόνα.



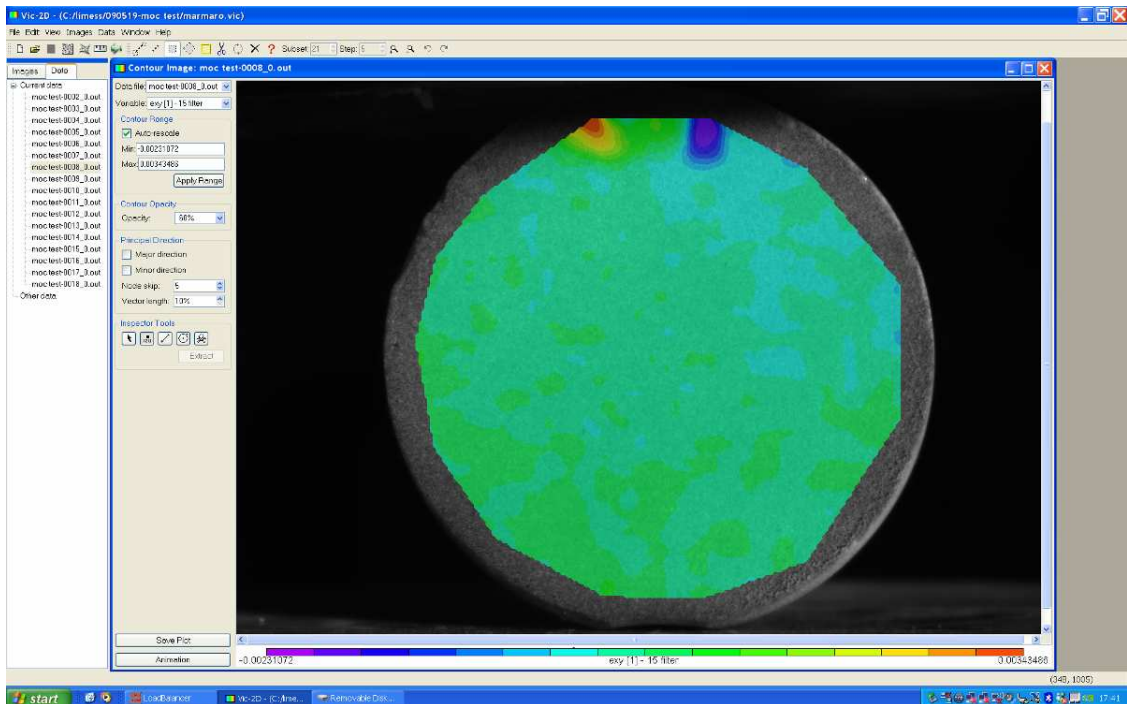
Εικόνα 5-50: Το σχήμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 9^{η} παραμορφωμένη εικόνα.

5.7.6. Το Πεδίο Διατμητικών Παραμορφώσεων e_{xy}

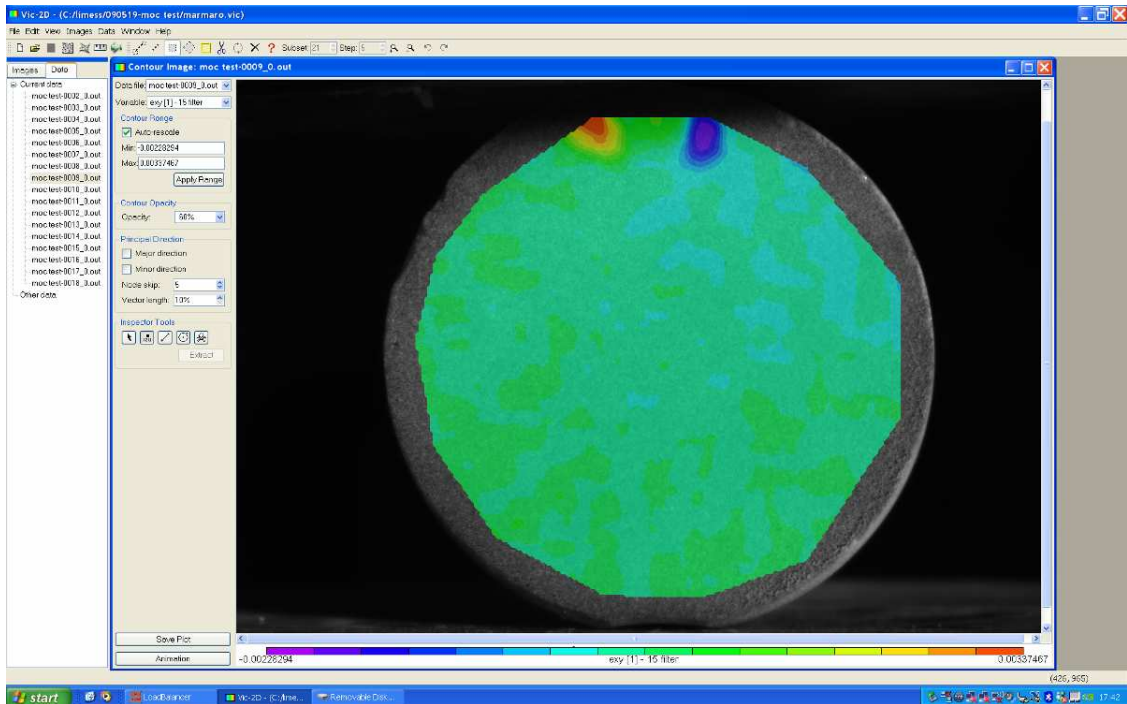
Τέλος, στην παρούσα υποενότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα των διατμητικών παραμορφώσεων. Ακόμη, παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων, τα οποία απεικονίζουν το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} :



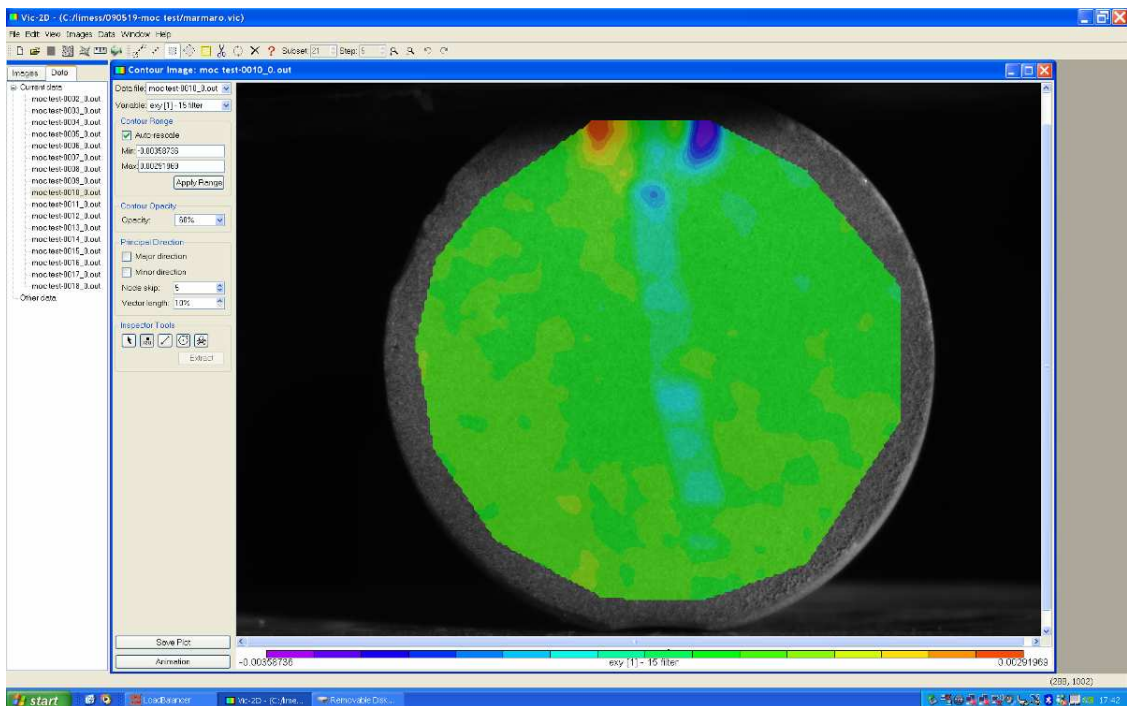
Εικόνα 5-51: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 5-52: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



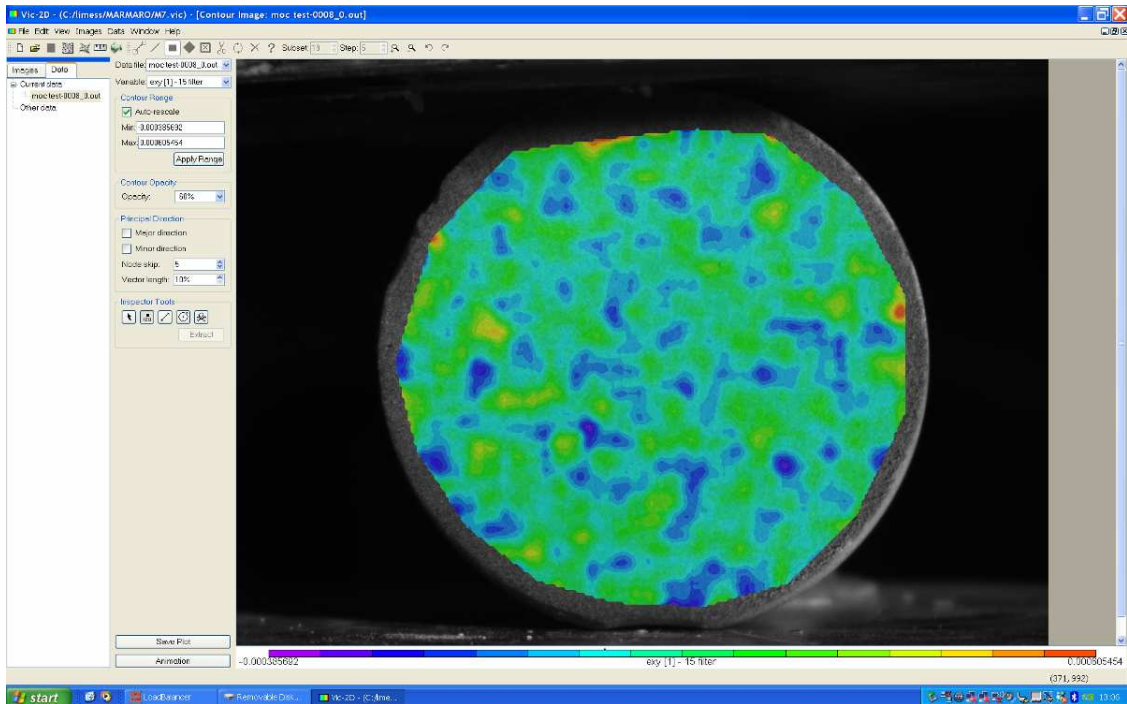
Εικόνα 5-53: Το πεδίο των διαμηθικών παραμορφώσεων ϵ_{xy} της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας πριν τη δημιουργία της ρωγμής.



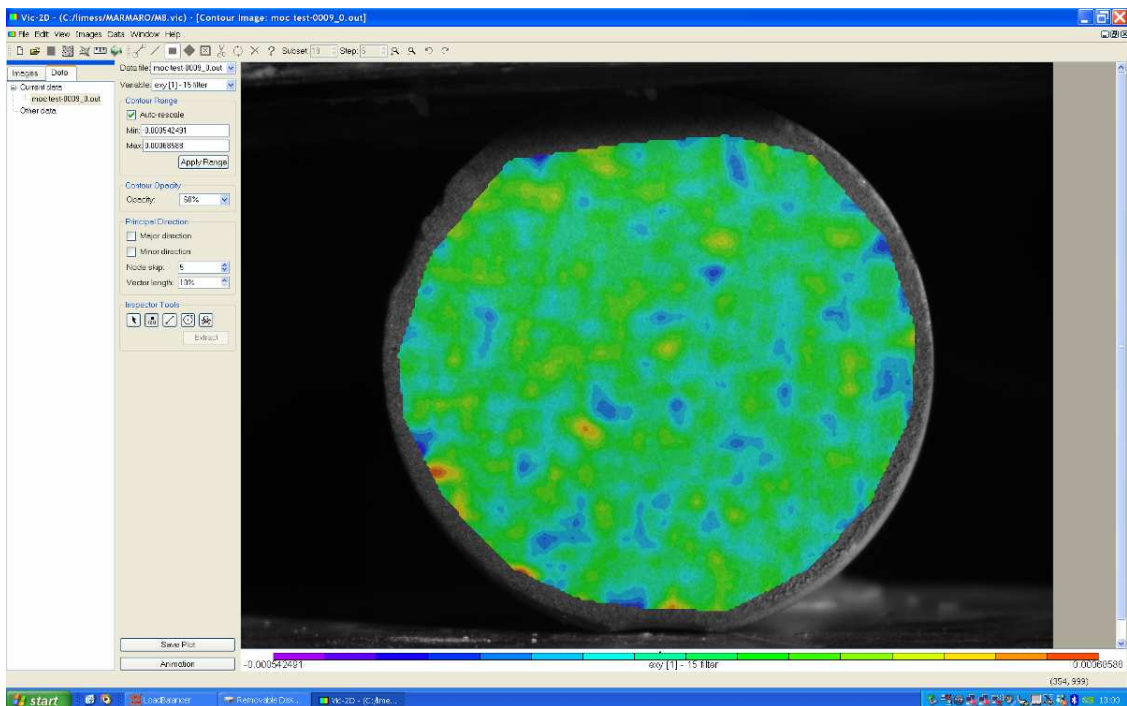
Εικόνα 5-54: Το πεδίο των διαμηθικών παραμορφώσεων ϵ_{xy} της 10^{ης} παραμορφωμένης εικόνας τη στιγμή της θραύσης.

Στις εικόνες των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} παρατηρείται ότι το μωβ χρώμα αντιπροσωπεύει την χαμηλότερη θετική ή τη μεγαλύτερη αρνητική τιμή. Αντιθέτως, το κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη θετική ή τη χαμηλότερη αρνητική τιμή. Γενικά, στις εικόνες 5-51, 5-52 και 5-53, φαίνεται ότι οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} στις κόκκινες περιοχές είναι κατ' απόλυτο μεγαλύτερες από αυτές των μωβ περιοχών. Από την άλλη πλευρά, στην εικόνα 5-54 τη στιγμή της θραύσης του δοκιμίου (10^1 παραμορφωμένη εικόνα) παρατηρούνται μεγαλύτερες απόλυτες τιμές διαμηθικών παραμορφώσεων στις μωβ περιοχές απ' ότι στις κόκκινες περιοχές που παρατηρούνται μικρότερες τιμές κατ' απόλυτο, το οποίο είναι και το αναμενόμενο. Τέλος, παρατηρείται ξεκάθαρα με αχνό γαλάζιο χρώμα η περιοχή στην οποία δημιουργείται η ρωγή.

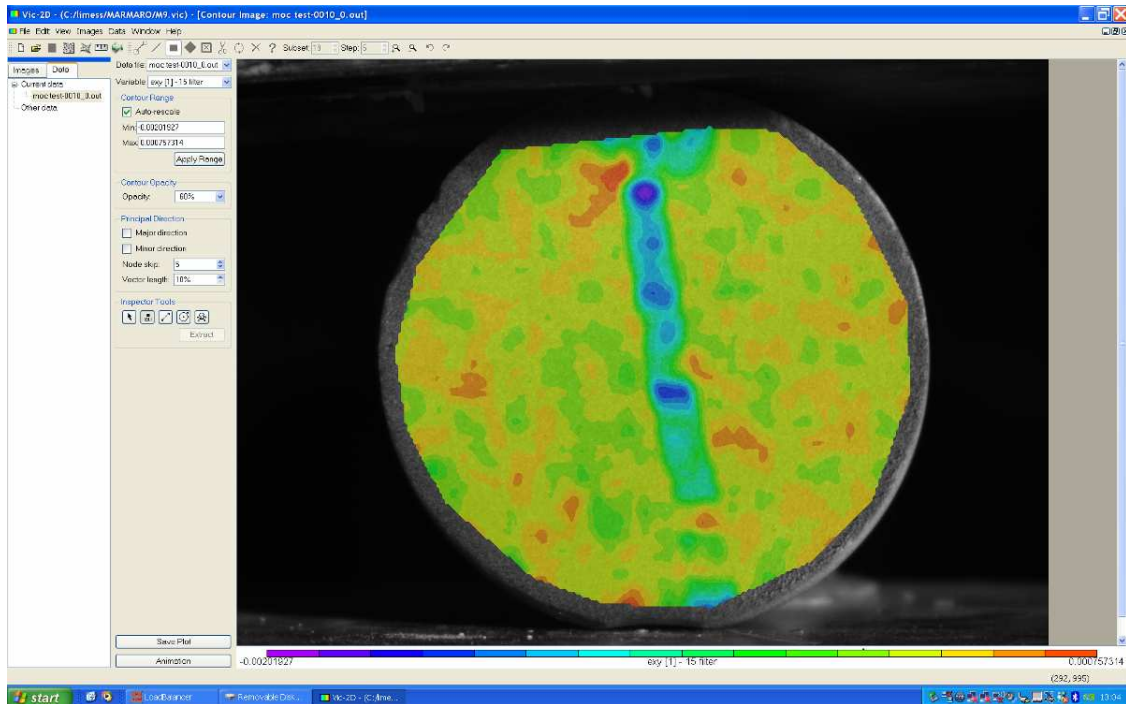
Αν πραγματοποιηθεί η διαδικασία της συσχέτισης, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για τις διαμηθικές παραμορφώσεις e_{xy} :



Εικόνα 5-55: Το σχήμα των διαμηθικών παραμορφώσεων ϵ_{xy} της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 7^η παραμορφωμένη εικόνα.



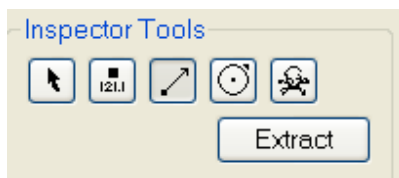
Εικόνα 5-56: Το σχήμα των διαμηθικών παραμορφώσεων ϵ_{xy} της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς την 8^η παραμορφωμένη εικόνα.



Εικόνα 5-57: Το σχήμα των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας, οριζοντας ως εικόνα αναφοράς την $9^{\text{η}}$ παραμορφωμένη εικόνα.

5.8. Σχολιασμός Αριθμητικών Αποτελεσμάτων

Στα παραπάνω σχήματα μπορούν να προσθεθούν σημεία και να εξαγουμε κάποια συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του δείγματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές των σημείων που εμφανίζονται πάνω στα σχήματα έχουν προκύψει από τη συσχέτιση της εκάστοτε εικόνας με την εικόνα αναφοράς. Συνεπώς, στις εικόνες των μετατοπίσεων οι τιμές της μετακίνησης κάθε σημείου δείχνουν το μέγεθος της μετατόπισης του κάθε σημείου από το ίδιο σημείο στην εικόνα αναφοράς. Η τοποθέτηση σημείων γίνεται με μία σειρά εργαλείων που ονομάζεται *inspector tools*.

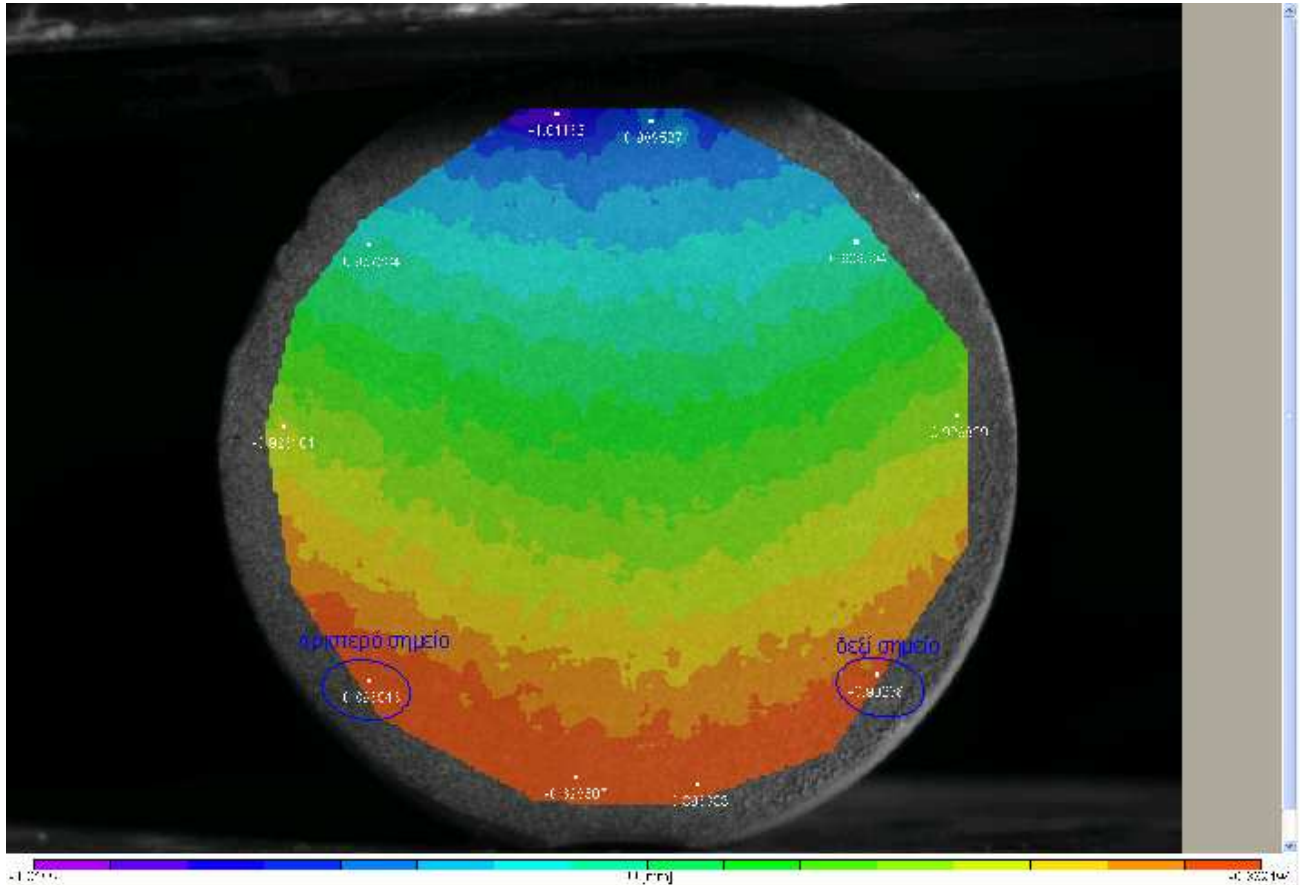


Εικόνα 5-58: Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση σημείων, γραμμών, κύκλων πάνω στις *contour* εικόνες.

Σε αυτήν την ενότητα κρίνεται σκόπιμο να ερμηνευτεί η συμπεριφορά των σημείων της επιφάνειας του δείγματος, δηλαδή πως αυτά μετακινούνται κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης.

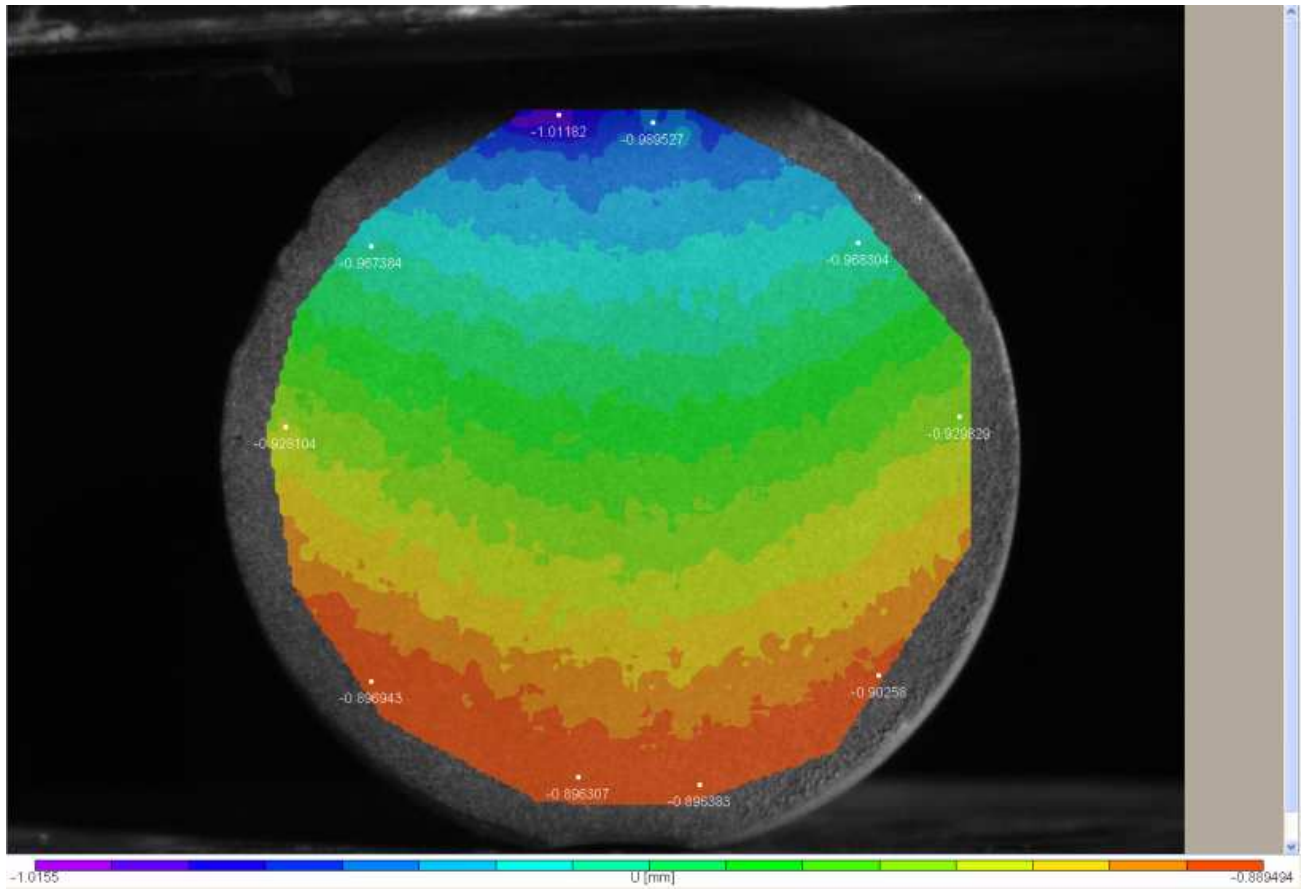
5.8.1. Μετατόπιση U κατά την οριζόντια διεύθυνση

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, θα παρατηρηθεί και θα σχολιαστεί τη συμπεριφορά 2 χαρακτηριστικών σημείων, ένα που βρίσκεται στα αριστερά και ένα στα δεξιά του δείγματος:



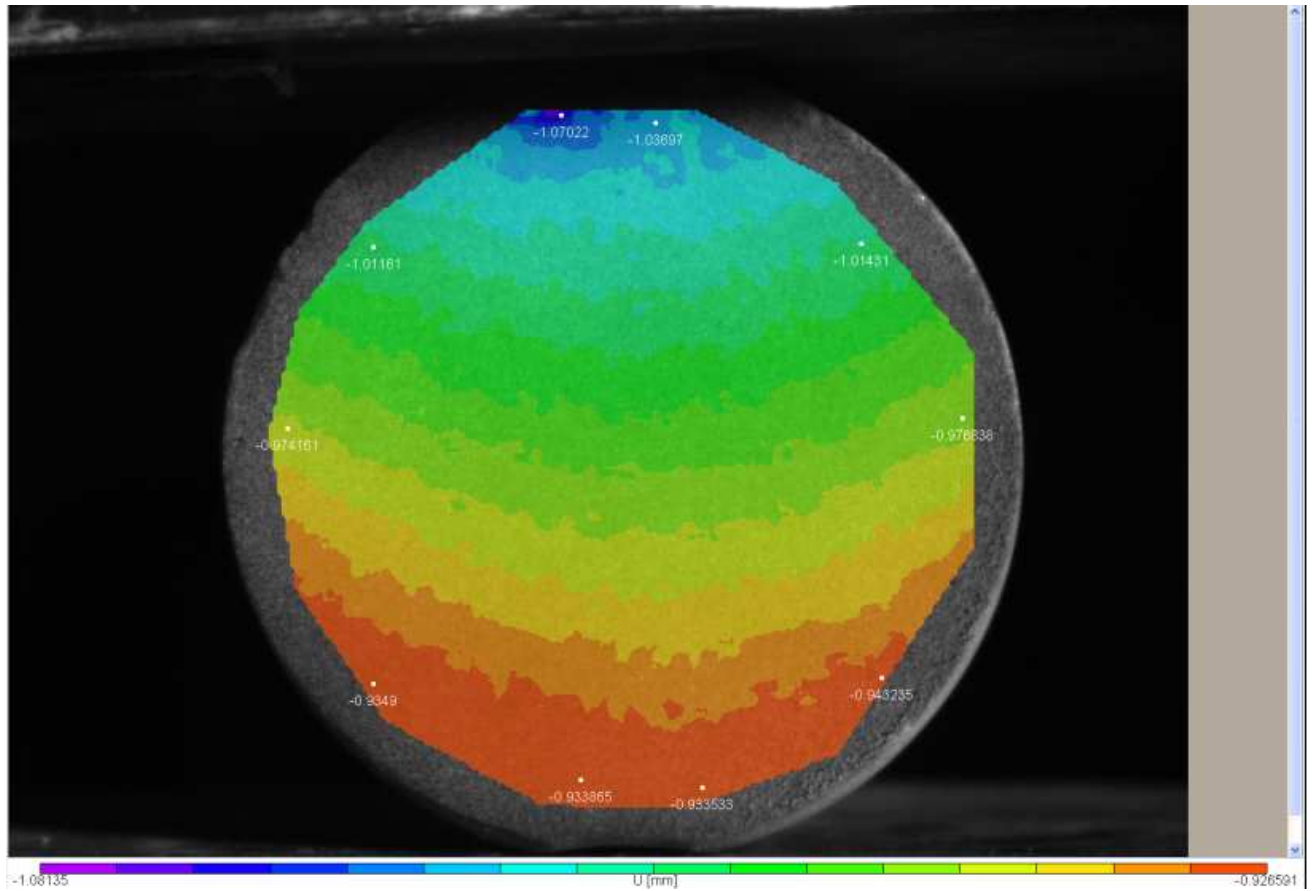
Εικόνα 5-59: Τα 2 σημεία που εξετάζονται, το ένα στα αριστερά και το άλλο στα δεξιά του δείγματος.

Παρακάτω ακολουθούν οι τιμές της μετατόπισης κατά την οριζόντια διεύθυνση, U:



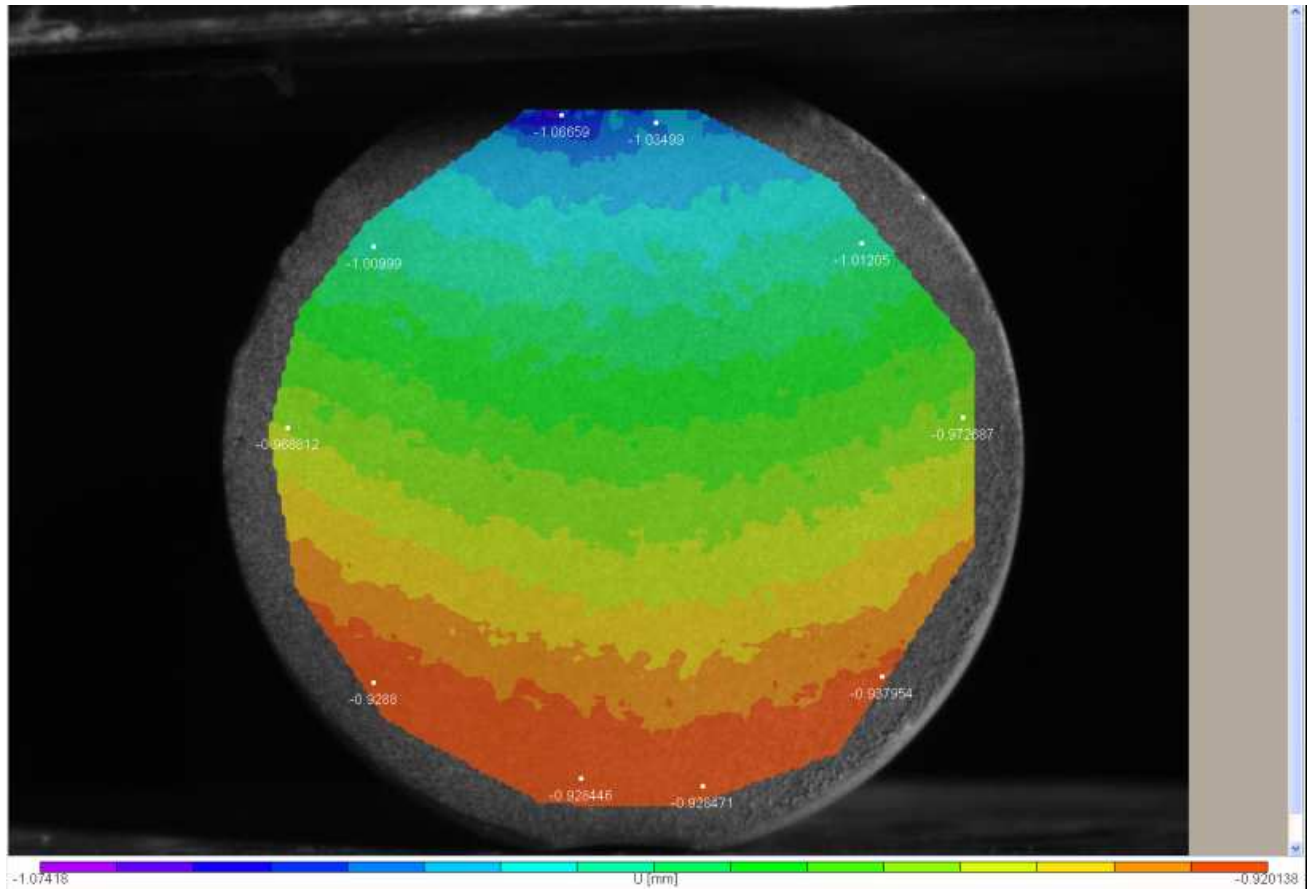
Εικόνα 5-60: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 2^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στη 2^η παραμορφωμένη εικόνα, η οποία φαίνεται παραπάνω, το σημείο αριστερά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 0,896943 mm αριστερά, εφόσον υπάρχει αρνητικό πρόσημο, ενώ το σημείο στα δεξιά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,90258 mm αριστερά, λόγω του αρνητικού προσήμου.



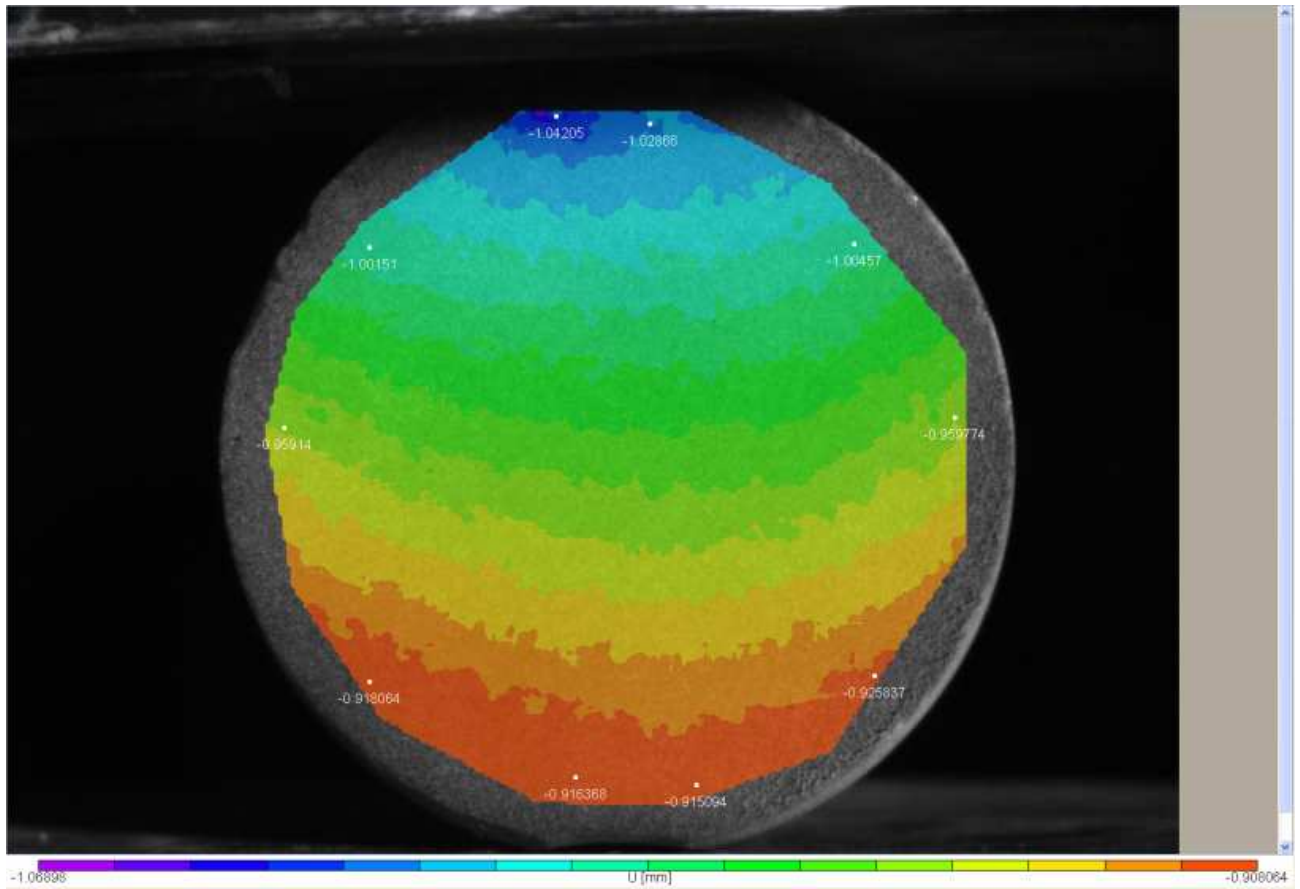
Εικόνα 5-61: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 3^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 3^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο αριστερά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 0,9349 mm αριστερά, δηλαδή ακόμα πιο αριστερά κατά 0,038 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στα δεξιά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,943235 mm αριστερά, δηλαδή ακόμα πιο αριστερά κατά 0,041 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



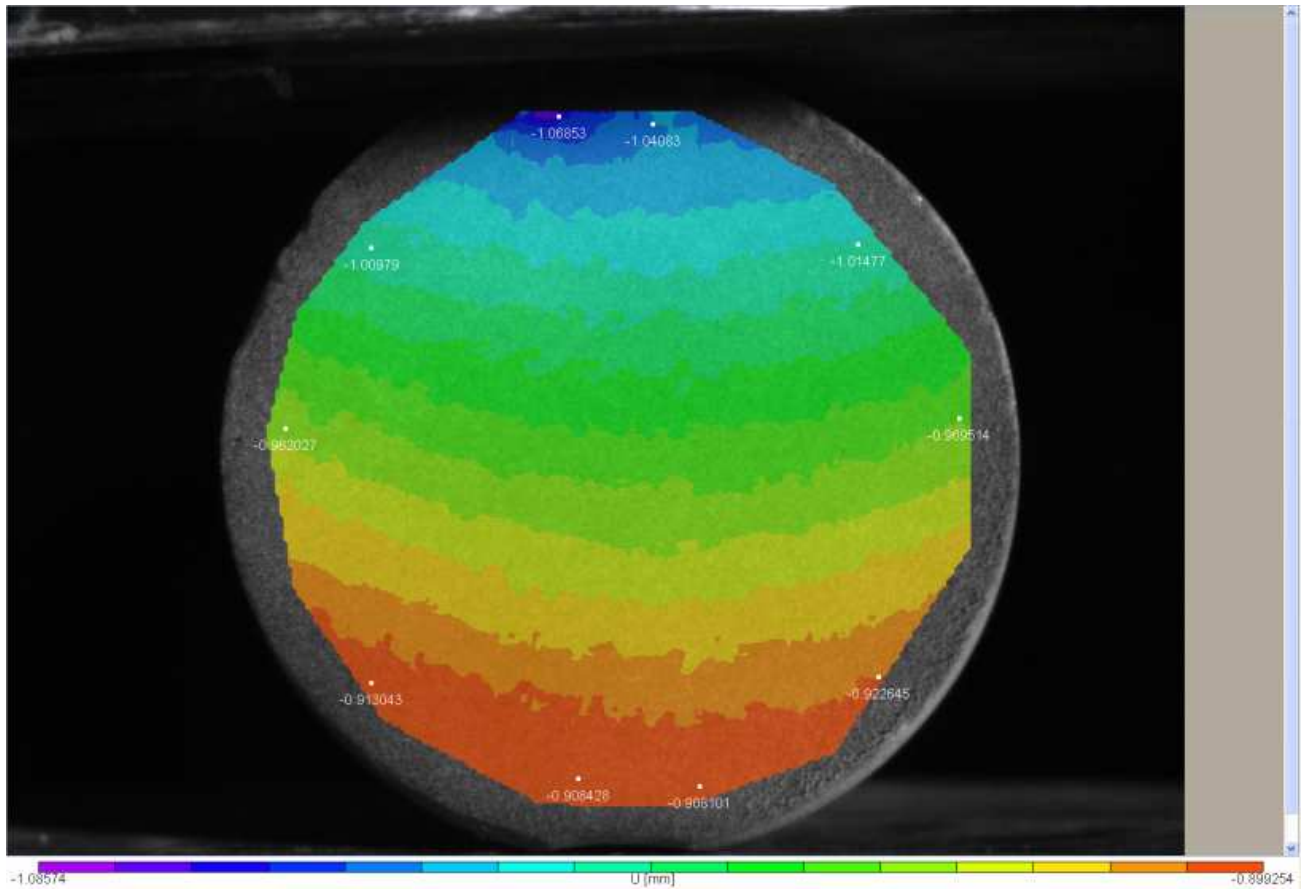
Εικόνα 5-62: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 4^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 4^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο αριστερά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 0,9288 mm αριστερά, δηλαδή πιο δεξιά κατά 0,006 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στα δεξιά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,937954 mm αριστερά, δηλαδή πιο δεξιά κατά 0,005 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



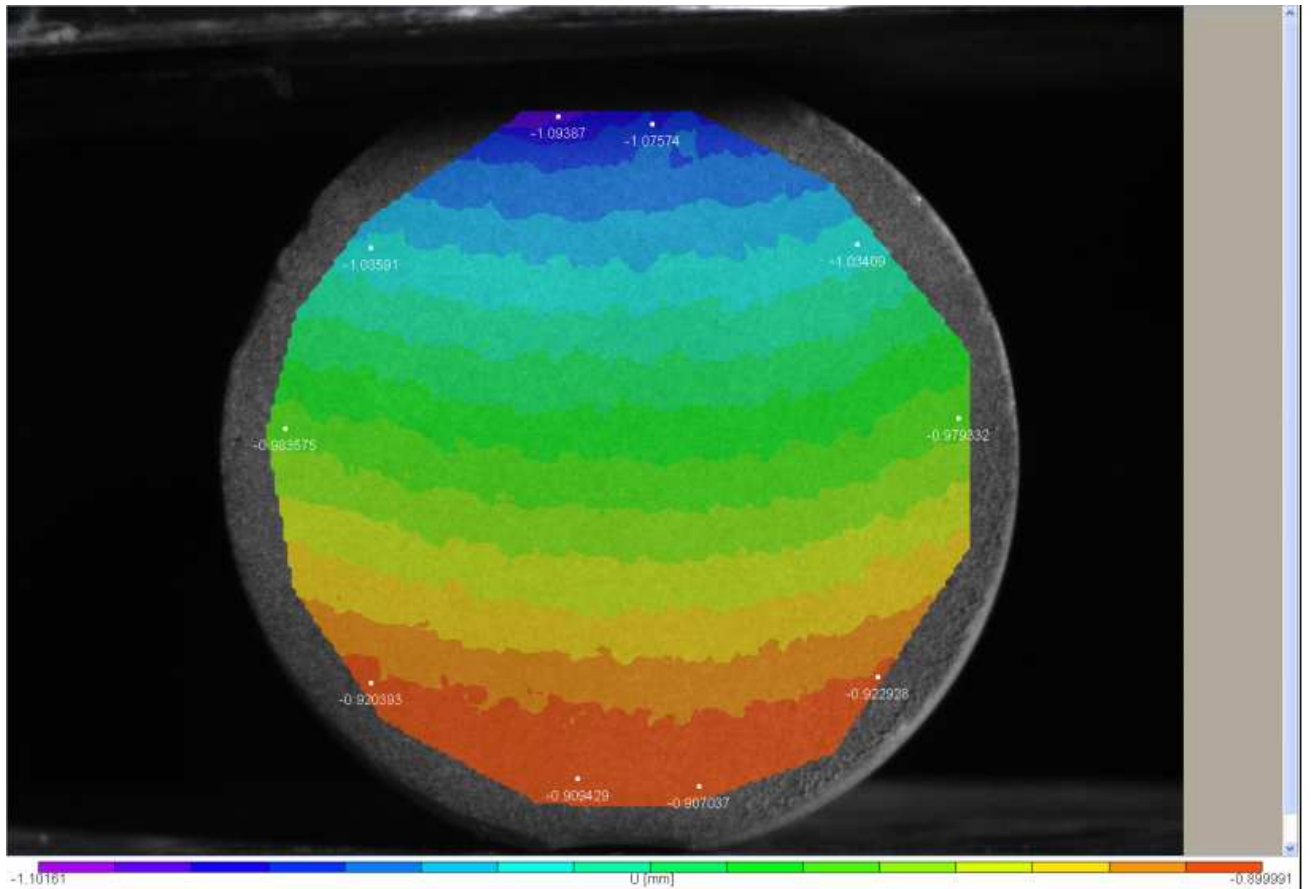
Εικόνα 5-63: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 5^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 5^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο αριστερά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 0,918064 mm αριστερά, δηλαδή ακόμα πιο δεξιά κατά 0,011 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στα δεξιά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,925837 mm αριστερά, δηλαδή ακόμα πιο δεξιά κατά 0,012 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



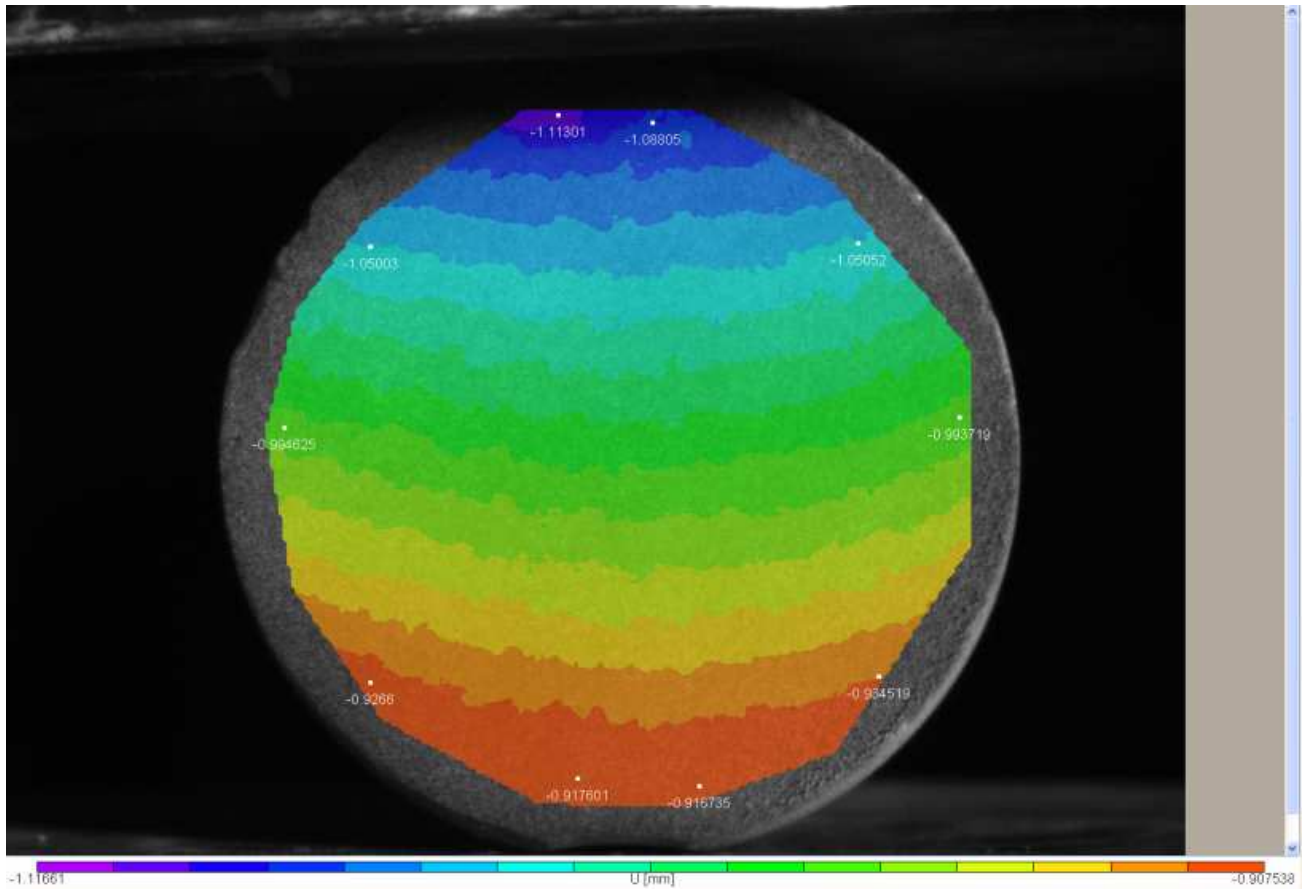
Εικόνα 5-64: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 6^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 6^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο αριστερά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 0,913043 mm αριστερά, δηλαδή ελάχιστα πιο δεξιά κατά 0,005 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στα δεξιά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,922645 mm αριστερά, δηλαδή ελάχιστα πιο δεξιά κατά 0,003 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



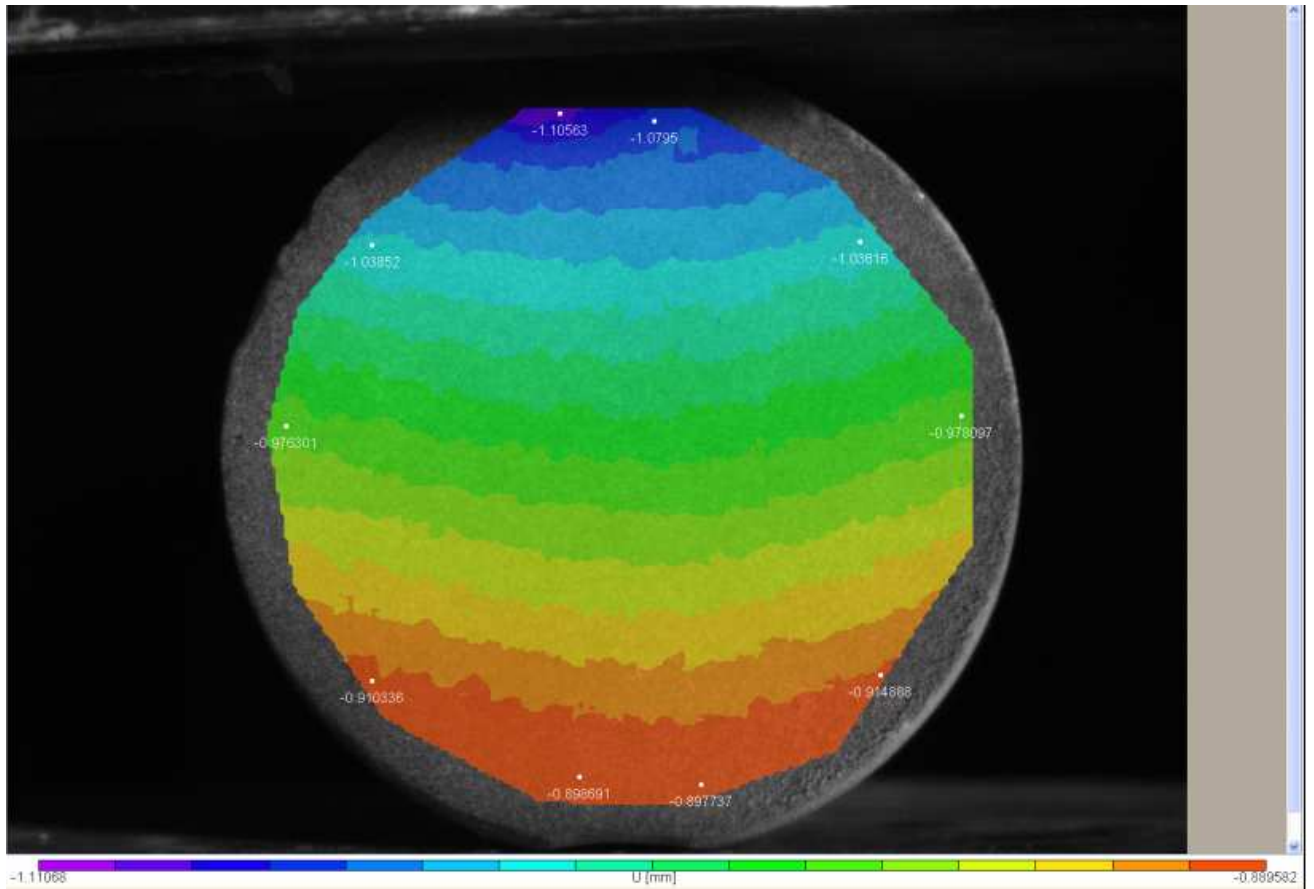
Εικόνα 5-65: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 7^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο αριστερά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 0,920393 mm αριστερά, δηλαδή λίγο πιο αριστερά κατά 0,007 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στα δεξιά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,922928 mm αριστερά, δηλαδή απειροελάχιστα πιο αριστερά κατά 0,0003 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



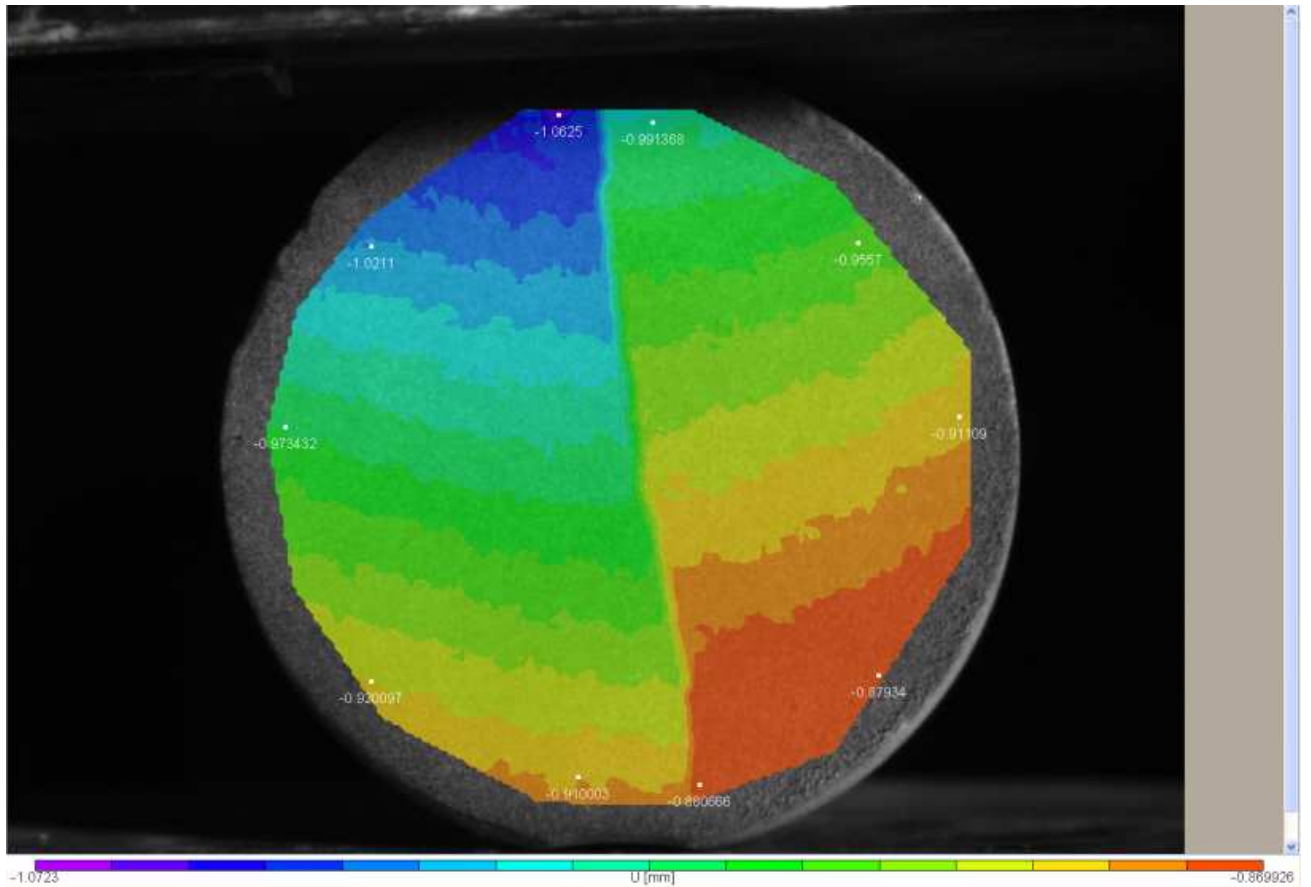
Εικόνα 5-66: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 8^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο αριστερά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 0,9266 mm αριστερά, δηλαδή λίγο πιο αριστερά κατά 0,006 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στα δεξιά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,934519 mm αριστερά, δηλαδή πιο αριστερά κατά 0,012 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



Εικόνα 5-67: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 9^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο αριστερά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 0,910336 mm αριστερά, δηλαδή πιο δεξιά κατά 0,016 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στα δεξιά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,914888 mm αριστερά, δηλαδή πιο δεξιά κατά 0,02 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



Εικόνα 5-68: Σημεία πάνω στο σχήμα της οριζόντιας μετατόπισης U της 10^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στη 10^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο αριστερά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 0,920097 mm αριστερά, δηλαδή μετακινείται αριστερά κατά 0,01 σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στα δεξιά του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,87934 mm αριστερά, δηλαδή μετακινείται δεξιά κατά 0,036 σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα.

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας στον οποίο φαίνονται αναλυτικά και συνοπτικά οι μετατοπίσεις U κατά X των 2 σημείων, αριστερού και δεξιού, από την εικόνα αναφοράς:

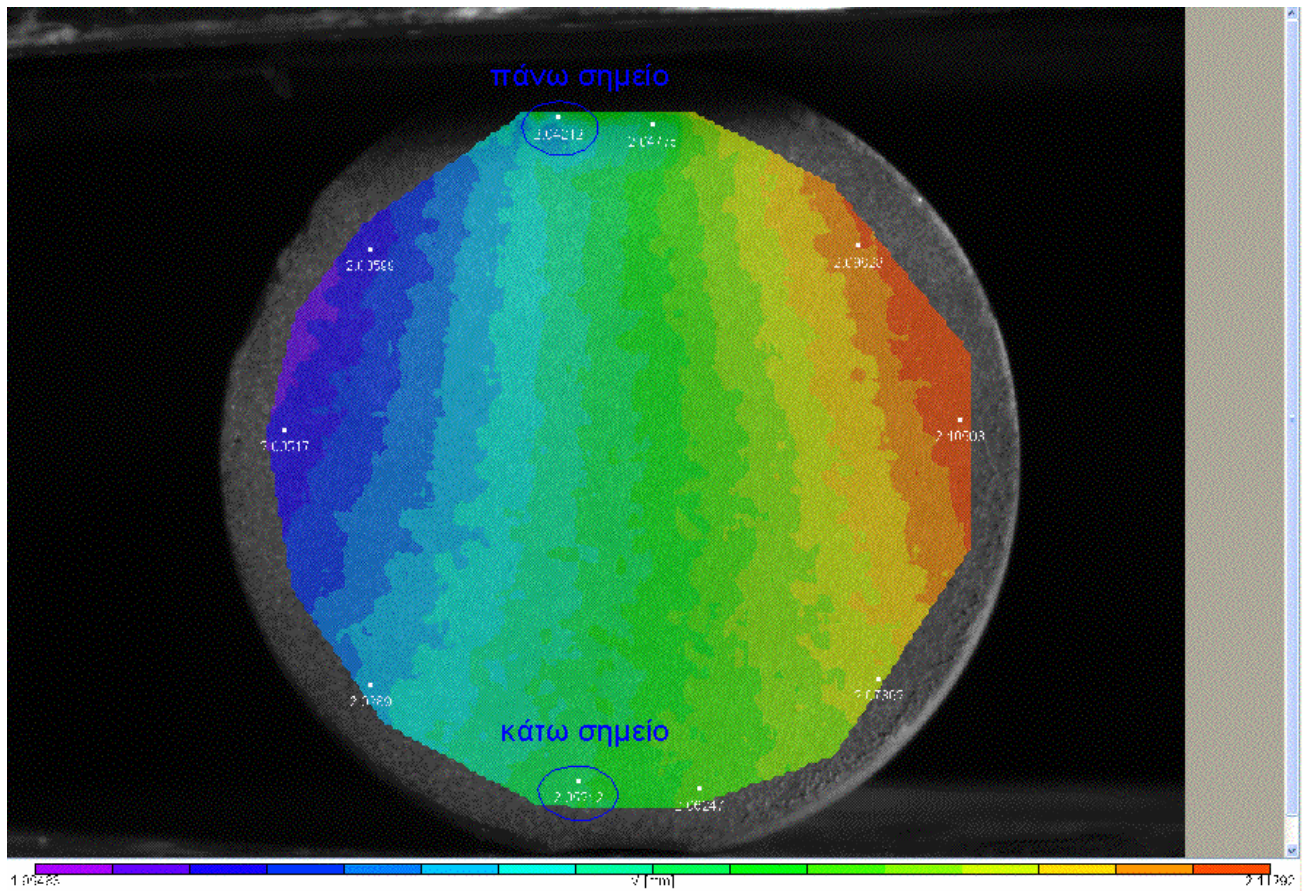
Πίνακας5-1: Οι μετατοπίσεις U κατά X του αριστερού και του δεξιού σημείου που εξετάζονται.

Εικόνα	Μετατόπιση Αριστερού Σημείου (mm)	Μετατόπιση Δεξιού Σημείου (mm)
2 ^η	-0,896943	-0,90258
3 ^η	-0,9349	-0,943235
4 ^η	-0,9288	-0,937954
5 ^η	-0,918064	-0,925837
6 ^η	-0,913043	-0,922645
7 ^η	-0,920393	-0,922928
8 ^η	-0,9266	-0,934519
9 ^η	-0,910336	-0,914888
10 ^η	-0,920097	-0,87934

Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι στα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων 2 έως 9, ολόκληρο το δείγμα κάνει μικροκινήσεις πότε δεξιά και πότε αριστερά μέχρι να σταθεροποιηθεί και να ακολουθήσει η στιγμή της θραύσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη 2^η παραμορφωμένη εικόνα, καθώς δηλαδή ξεκινά η προσθήκη φορτίου από τη μηχανή θλίψης, υπάρχει μία αρκετά μεγάλη μετατόπιση προς τα αριστερά της τάξης των 0,9 mm. Αυτό συμβαίνει λόγω ενός συνδυασμού παραγόντων. Πρώτον, διότι το δείγμα μαρμάρου που εξετάζεται είναι κυλινδρικό και όχι επίπεδο και δεύτερον, λόγω της ευαισθησίας του μηχανήματος να καταγράφει την παραμικρή μικροκίνηση. Εν συνεχεία, στην εικόνα 10, η οποία απεικονίζει τη θραύση, παρατηρείται ότι το αριστερό σημείο κινείται προς τα αριστερά και το δεξί σημείο κινείται προς τα δεξιά, καθώς το δείγμα «σπάει». Αυτό άλλωστε είναι και το αναμενόμενο. Συνεπώς, το λογισμικό του συστήματος *Vic-2D* έχει τη δυνατότητα να αντιλαμβάνεται τις απειροελάχιστες μετακινήσεις και να τις εμφανίζει στα αριθμητικά αποτελέσματα που εξάγει (εικόνες 2 έως 9). Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα που εμφανίζει κατά τη θραύση (εικόνα 10), ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικότητα.

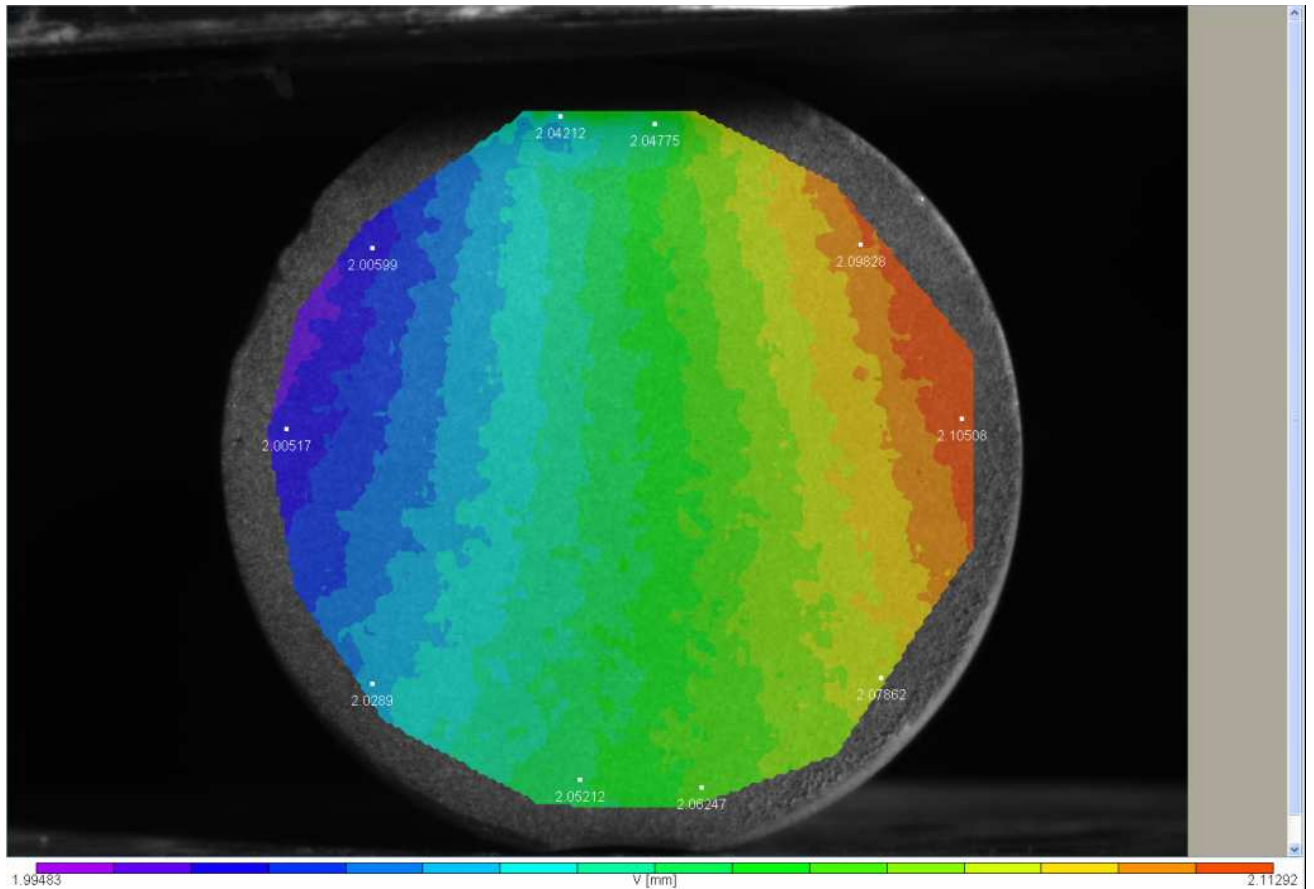
5.8.2. Μετατόπιση V κατά την κάθετη διεύθυνση

Στην παρούσα υποενότητα, θα παρατηρηθεί και θα σχολιαστεί τη συμπεριφορά 2 χαρακτηριστικών σημείων, ένα που βρίσκεται στο πάνω και ένα στο κάτω μέρος του δείγματος:



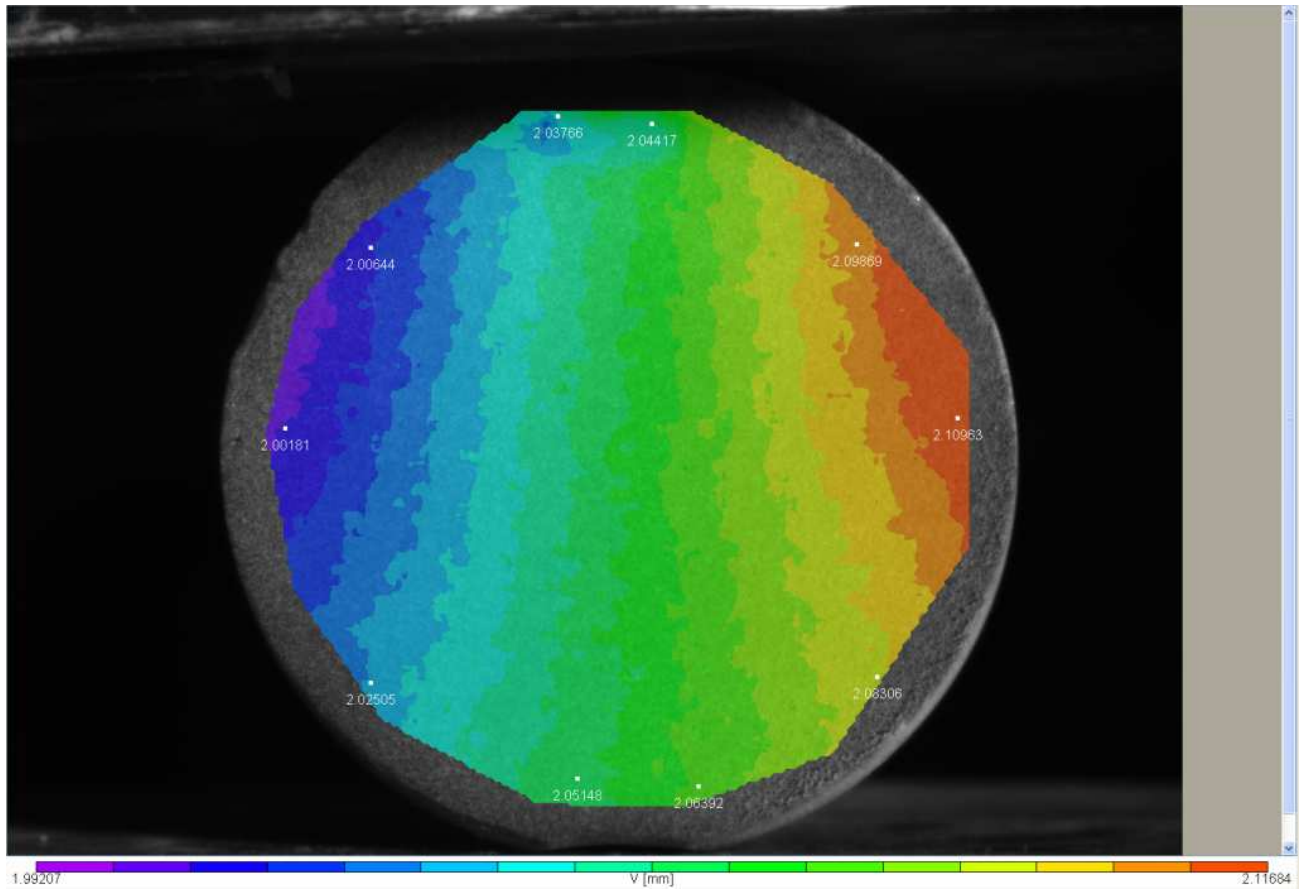
Εικόνα 5-69: Τα 2 σημεία που εξετάζονται, το ένα στο πάνω και το άλλο στο κάτω μέρος του δείγματος.

Παρακάτω ακολουθούν οι τιμές της μετατόπισης κατά την κάθετη διεύθυνση, V:



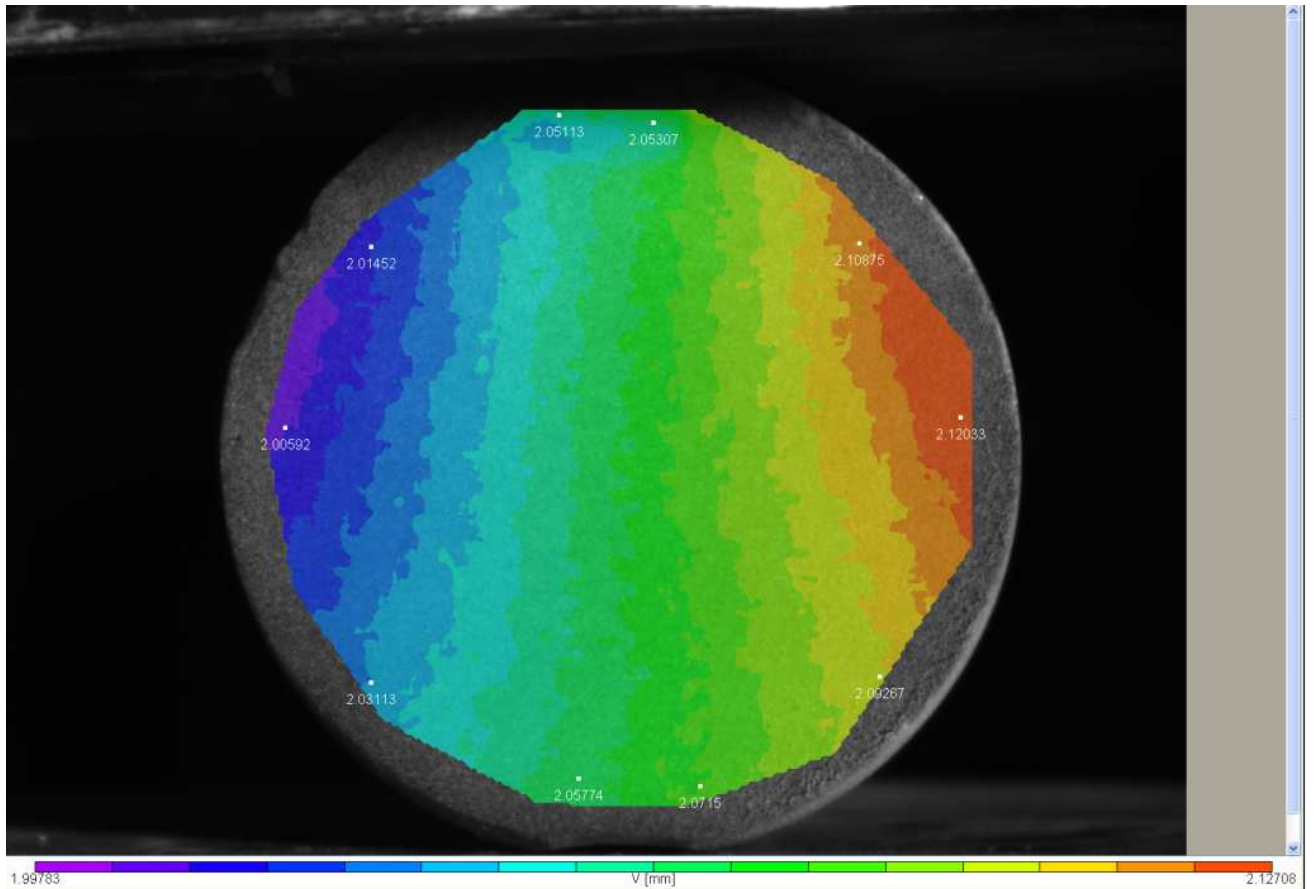
Εικόνα 5-70: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 2^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στη 2^η παραμορφωμένη εικόνα, η οποία φαίνεται παραπάνω, το σημείο στο πάνω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 2,04212 mm προς τα πάνω, εφόσον υπάρχει θετικό πρόσημο, ενώ το σημείο στο κάτω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 2,0512 mm προς τα πάνω, λόγω του θετικού προσήμου.



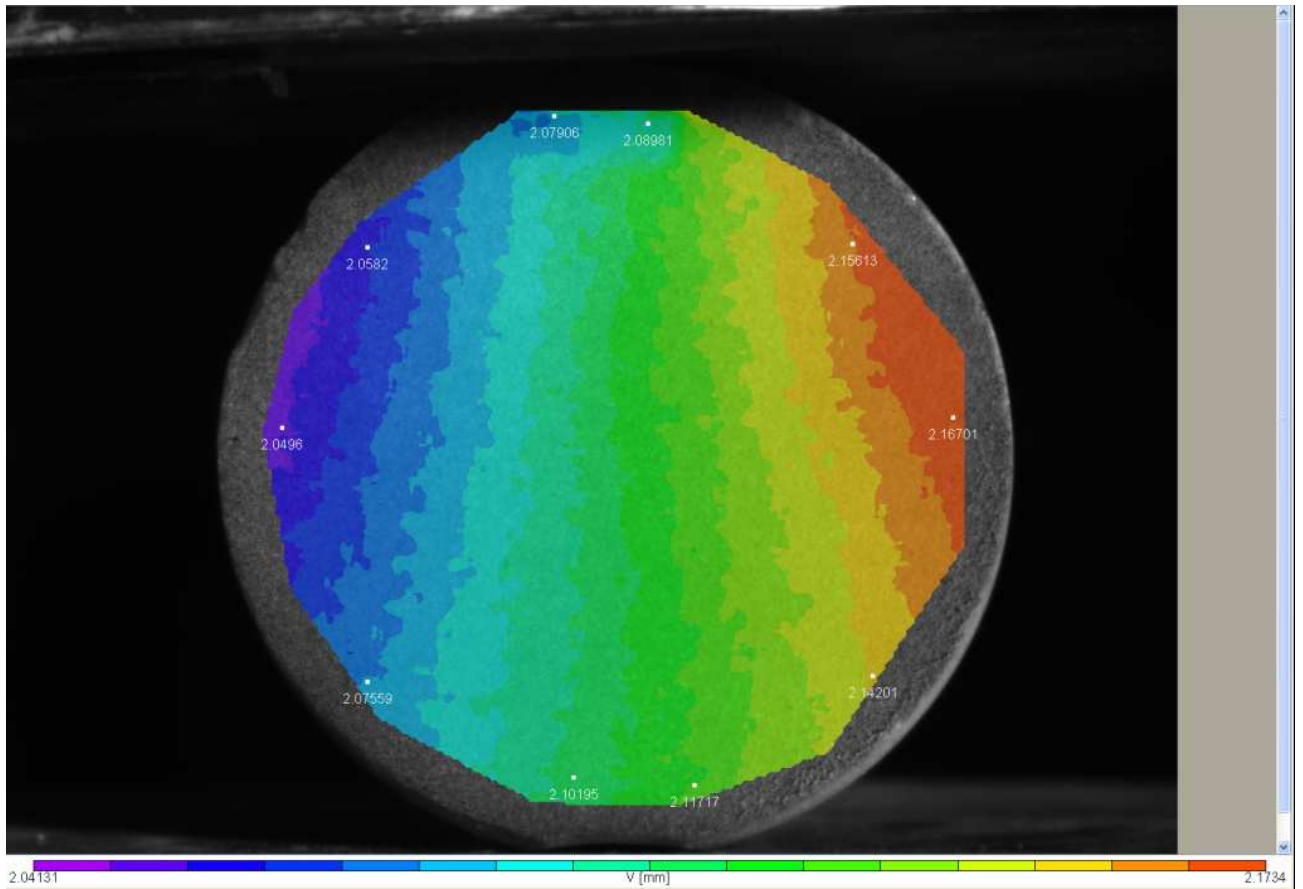
Εικόνα 5-71: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 3^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 3^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο στο πάνω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 2,03766 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο κάτω κατά 0,004 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στο κάτω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 2,05148 mm προς τα πάνω, δηλαδή απειροελάχιστα πιο πάνω κατά 0,0003 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



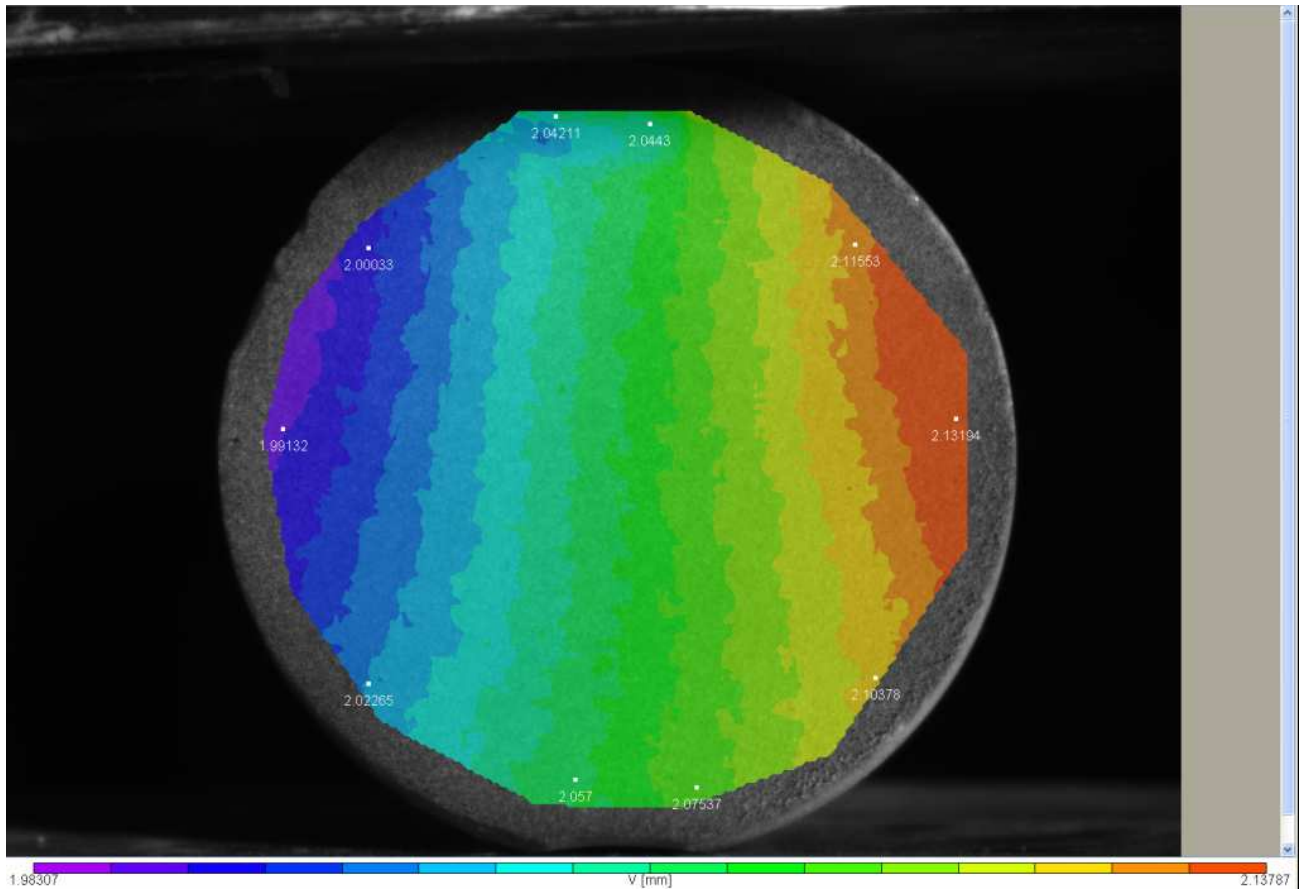
Εικόνα 5-72: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 4^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 4^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο στο πάνω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 2,05113 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο πάνω κατά 0,013 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στο κάτω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 2,05774 mm προς τα πάνω, δηλαδή ελάχιστα πιο πάνω κατά 0,007 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



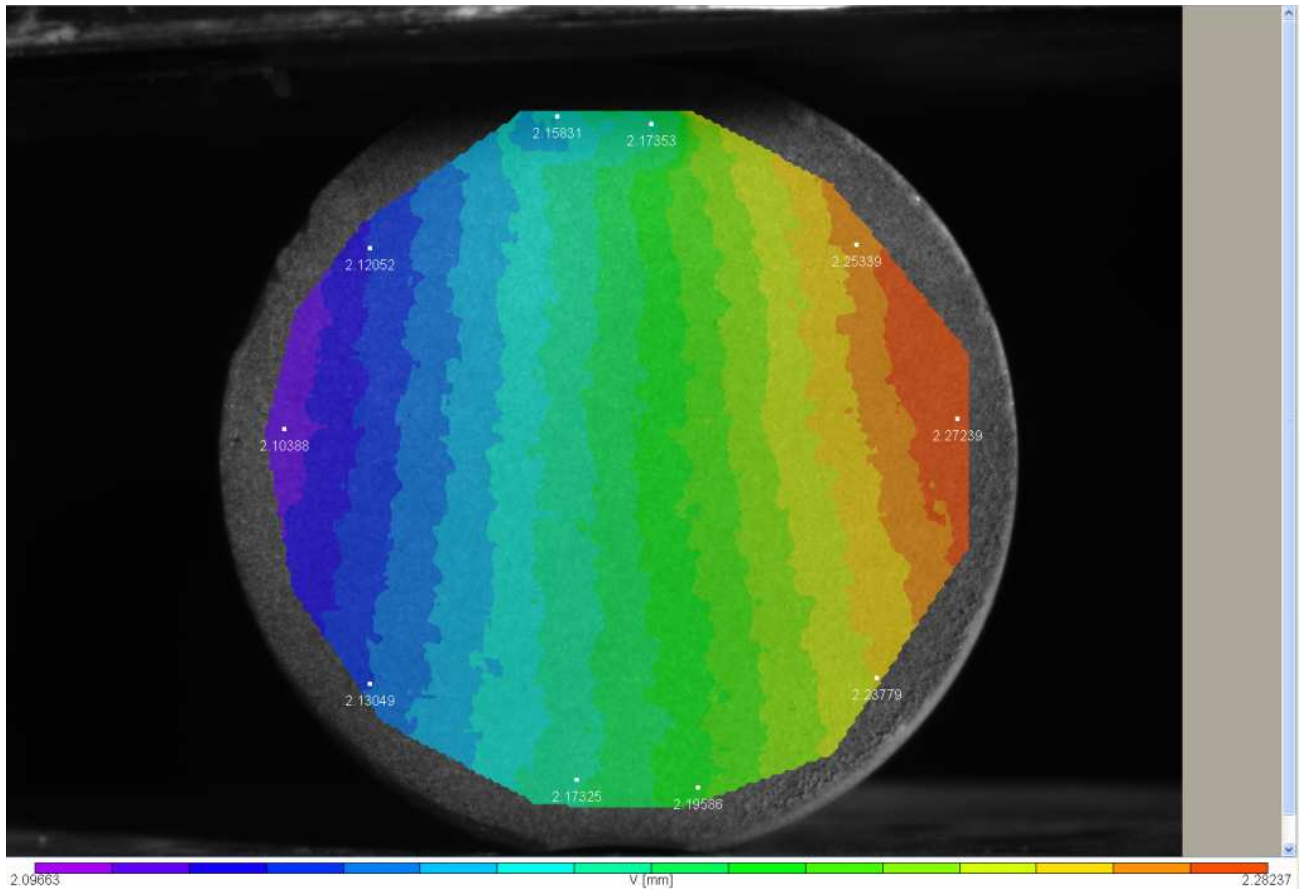
Εικόνα 5-73: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 5^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 5^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο στο πάνω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 2,07906 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο πάνω κατά 0,03 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στο κάτω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 2,10195 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο πάνω κατά 0,04 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



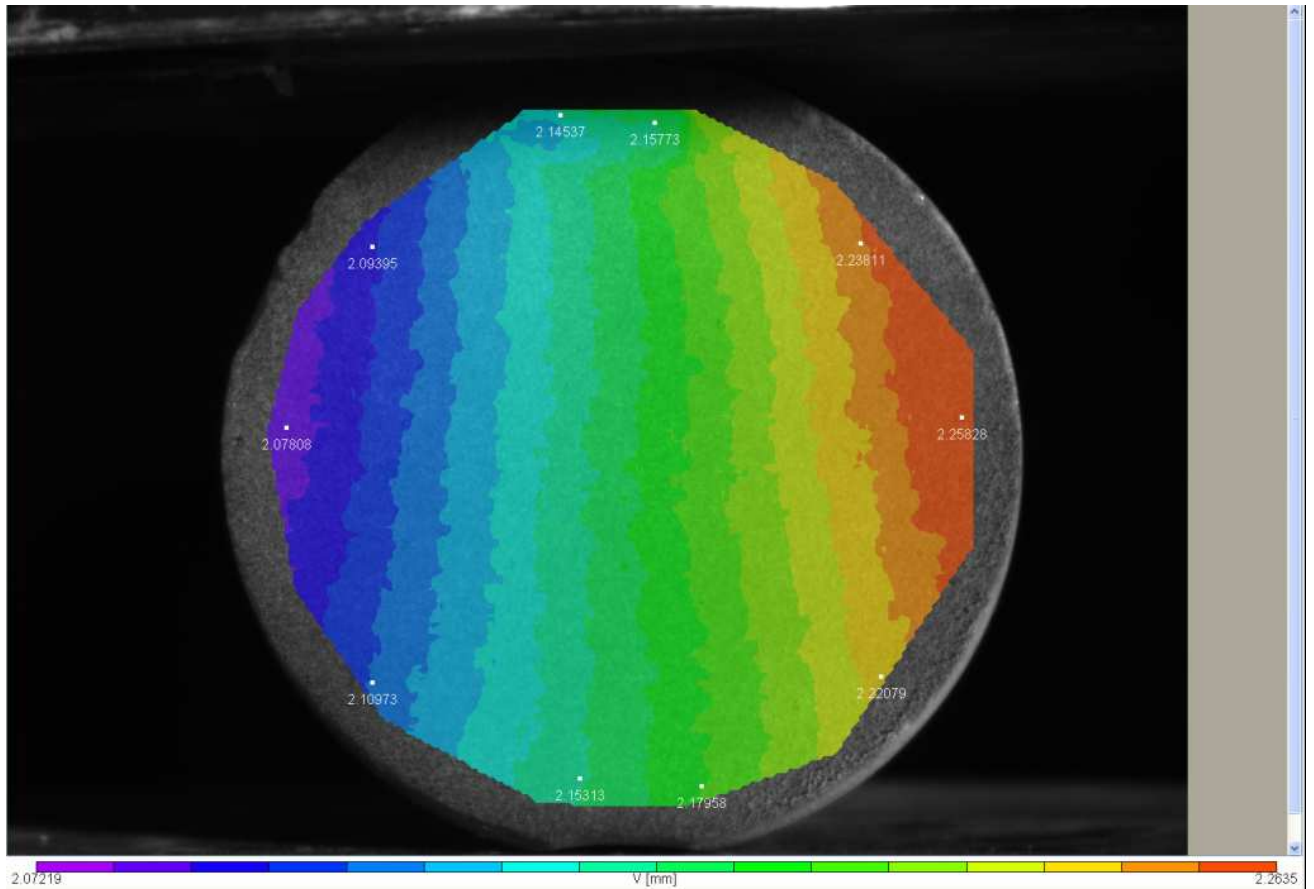
Εικόνα 5-74: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 6^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 6^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο στο πάνω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 2,04211 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο κάτω κατά 0,037 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στο κάτω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 2,057 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο κάτω κατά 0,045 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



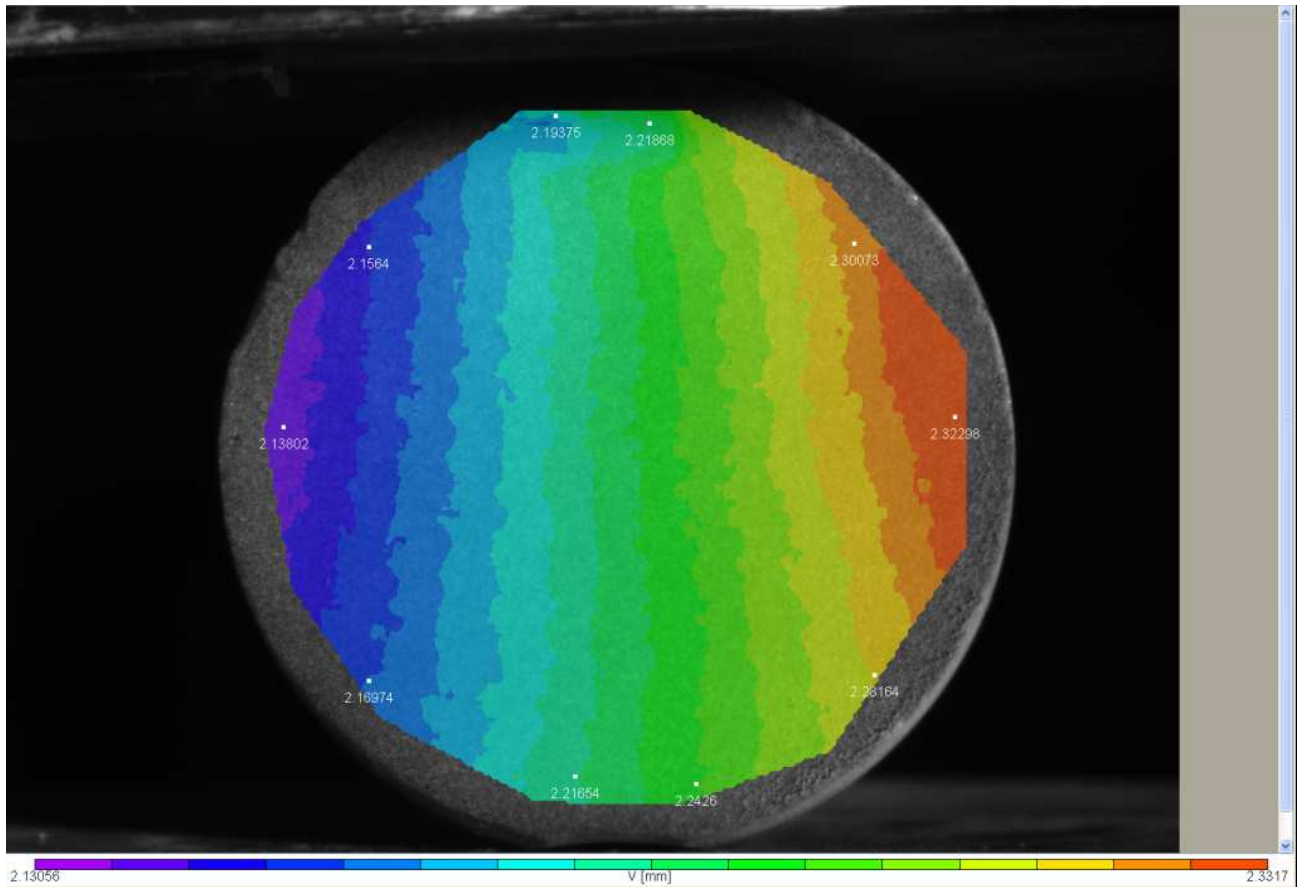
Εικόνα 5-75: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 7^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο στο πάνω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 2,15831 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο πάνω κατά 0,116 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στο κάτω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 2,17325 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο πάνω κατά 0,116 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



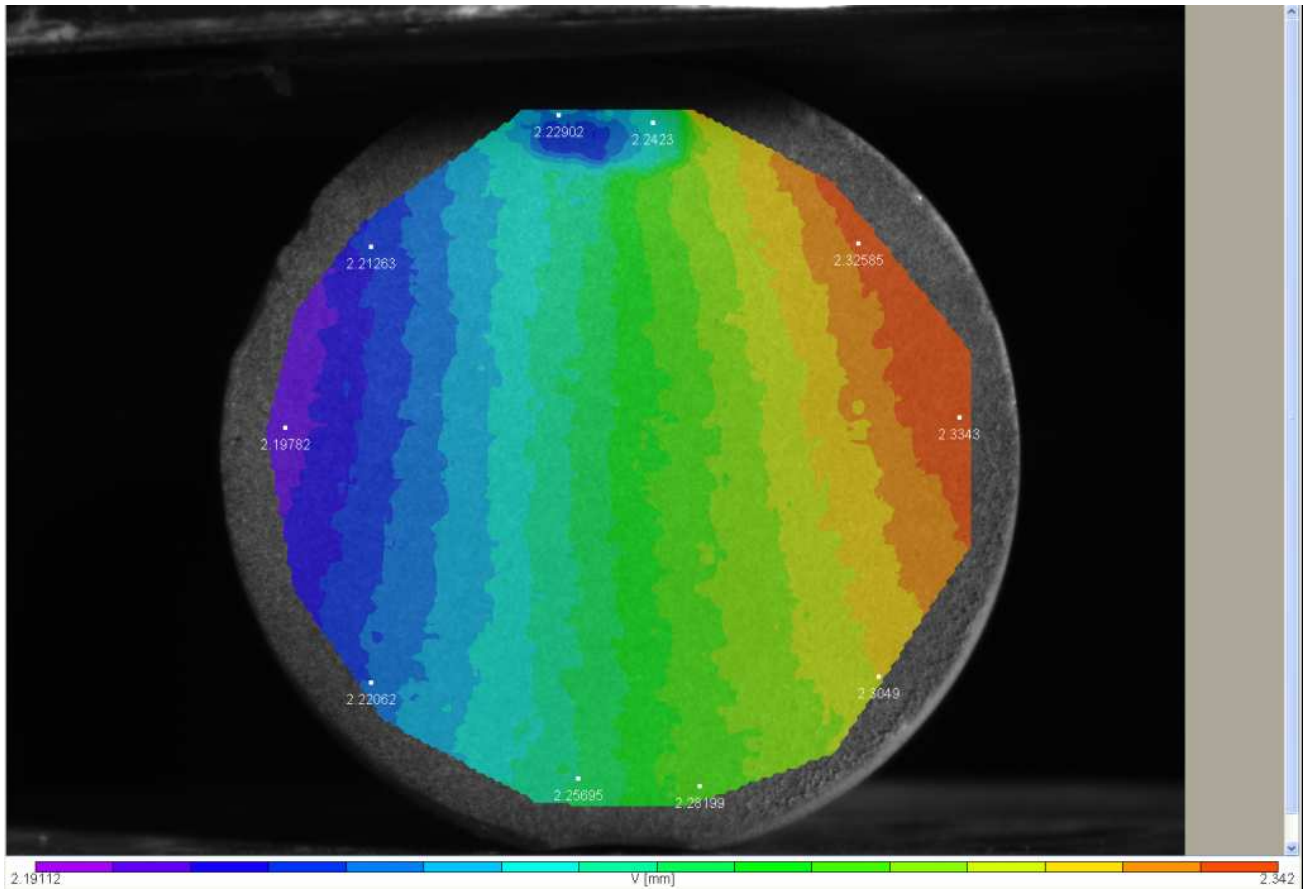
Εικόνα 5-76: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 8^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο στο πάνω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 2,14537 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο κάτω κατά 0,013 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στο κάτω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 2,15313 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο κάτω κατά 0,02 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



Εικόνα 5-77: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 9^η παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο στο πάνω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 2,19375 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο πάνω κατά 0,013 mm από την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στο κάτω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 2,21654 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο πάνω κατά 0,02 mm, από την προηγούμενη εικόνα.



Εικόνα 5-78: Σημεία πάνω στο σχήμα της κάθετης μετατόπισης V της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας.

Στην 10^1 παραμορφωμένη εικόνα, το σημείο στο πάνω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση στην εικόνα αναφοράς κατά 2,22902 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο πάνω κατά 0,035 mm σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα, ενώ το σημείο στο κάτω μέρος του δείγματος έχει μετακινηθεί σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 2,25695 mm προς τα πάνω, δηλαδή πιο πάνω κατά 0,04 mm σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα.

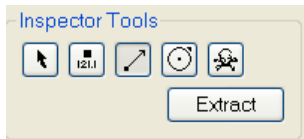
Πίνακας 5-2: Οι μετατοπίσεις V κατά Y του πάνω και του κάτω σημείου που εξετάζονται.

Εικόνα	Μετατόπιση Πάνω Σημείου (mm)	Μετατόπιση Κάτω Σημείου (mm)
2 ^η	2,04212	2,0512
3 ^η	2,03766	2,05148
4 ^η	2,05113	2,05774
5 ^η	2,07906	2,10195
6 ^η	2,04211	2,057
7 ^η	2,15831	2,17325
8 ^η	2,14537	2,15313
9 ^η	2,19375	2,21654
10 ^η	2,22902	2,25695

Το γενικό συμπέρασμα που εξαγεται είναι ότι στις εικόνες 2 έως 10, ολόκληρο το δείγμα κάνει μικροκινήσεις πότε πάνω και πότε κάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη 2^η παραμορφωμένη εικόνα, καθώς δηλαδή ξεκινά η προσθήκη φορτίου από τη μηχανή θλίψης, υπάρχει μία αρκετά μεγάλη μετατόπιση προς τα πάνω της τάξης των 2 mm. Αυτό συμβαίνει διότι η μεγάλη μηχανή θλίψης στην οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα, ασκεί δύναμη στο δοκίμιο από το κάτω μέρος. Έτσι, μέχρι το δείγμα να ακουμπήσει εντελώς στο πάνω μέρος της μηχανής και να αρχίσει να δέχεται δύναμη και από κει, μετακινείται ελάχιστα προ τα πάνω. Ακόμη, στις εικόνες 2 έως 6, οι κάθετες μετατοπίσεις είναι πολύ μικρές, σχεδόν απειροελάχιστες. Αντιθέτως, στις εικόνες 7 έως 10, οι κάθετες μετατοπίσεις είναι εμφανώς μεγαλύτερες. Αυτό συμβαίνει διότι πλησιάζει η στιγμή της θραύσης (εικόνα 10).

5.9. Διαγράμματα

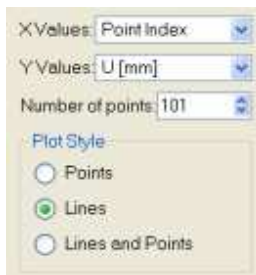
Το σύστημα *Vic-2D* δίνει, επιπλέον, τη δυνατότητα εξαγωγής κάποιων διαγραμμάτων που αφορούν τη συμπεριφορά των μεταβλητών του προγράμματος, δηλαδή της οριζόντιας μετατόπισης U , της κάθετης μετατόπισης V , της ανηγμένης παραμόρφωσης e_{xx} , της ανηγμένης παραμόρφωσης e_{yy} και της διαμηθικής παραμόρφωσης e_{xy} . Τα διαγράμματα που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι αυτά που προκύπτουν κατά μήκος μιας γραμμής πάνω στο σχήμα. Στην προκειμένη περίπτωση, θα εξεταστούν τα διαγράμματα που προκύπτουν από μία κάθετη και μία οριζόντια γραμμή πάνω στην επιφάνεια του δείγματος για τις εικόνες 9 και 10, οι οποίες είναι και οι πιο αντιπροσωπευτικές του πειράματος, καθώς απεικονίζουν τις στιγμές πριν και μετά τη θραύση του δείγματος αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι για την τοποθέτηση γραμμών στα σχήματα χρησιμοποιούνται τα *inspector tools*.



Εικόνα 5-79: Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση των γραμμών πάνω στις *contour* εικόνες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα τα διαγράμματα να μπορούν να παρουσιαστούν μόνο με σημεία, μόνο με γραμμές ή με γραμμές και σημεία μαζί. Αυτές οι επιλογές μπορούν να ρυθμιστούν από το *plot style*. Επιπλέον, για τους άξονες X και Y μπορεί να επιλεγεί οποιαδήποτε μεταβλητή από το πρόγραμμα, και με αυτόν τον τρόπο να προκύψει το αντίστοιχο διάγραμμα.

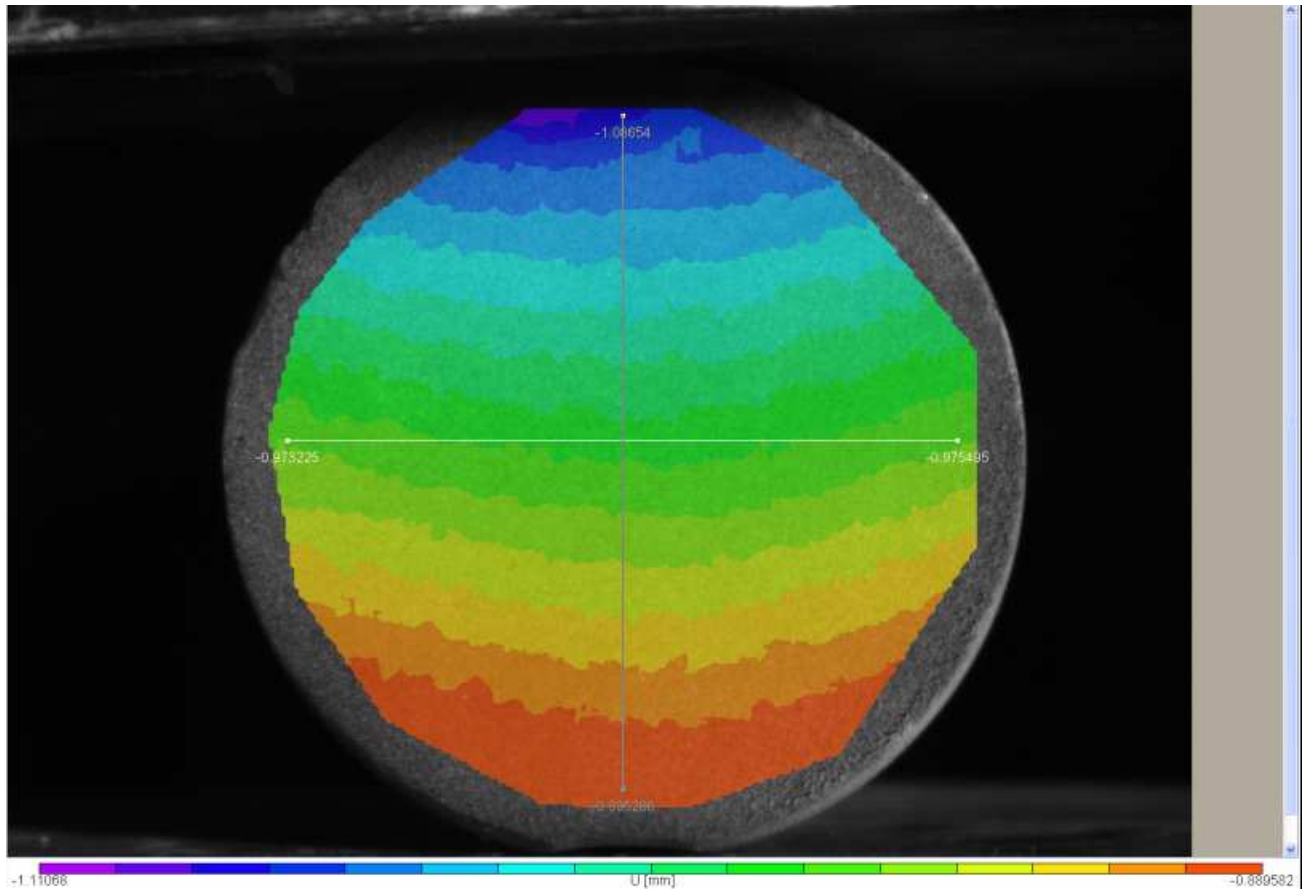
Στα παρακάτω διαγράμματα, οι τιμές των μεταβλητών που θέλουμε να εξετάσουμε (U , V , e_{xx} , e_{yy} , e_{xy}) τοποθετούνται στον άξονα Y. Ο άξονας X είναι χωρισμένος σε ίσα διαστήματα σημείων, ο αριθμός των οποίων έχει προεπιλεχθεί. Με άλλα λόγια, ορίζεται ο αριθμός των σημείων (*number of points*) πάνω στη γραμμή που θέλουμε να εξεταστεί και χωρίζεται πάνω στον άξονα X σε ίσα διαστήματα. Σημειώνεται ότι όσο πιο μεγάλος είναι αυτός ο αριθμός, τόσο πιο λεπτομερές είναι και το διάγραμμα που προκύπτει.



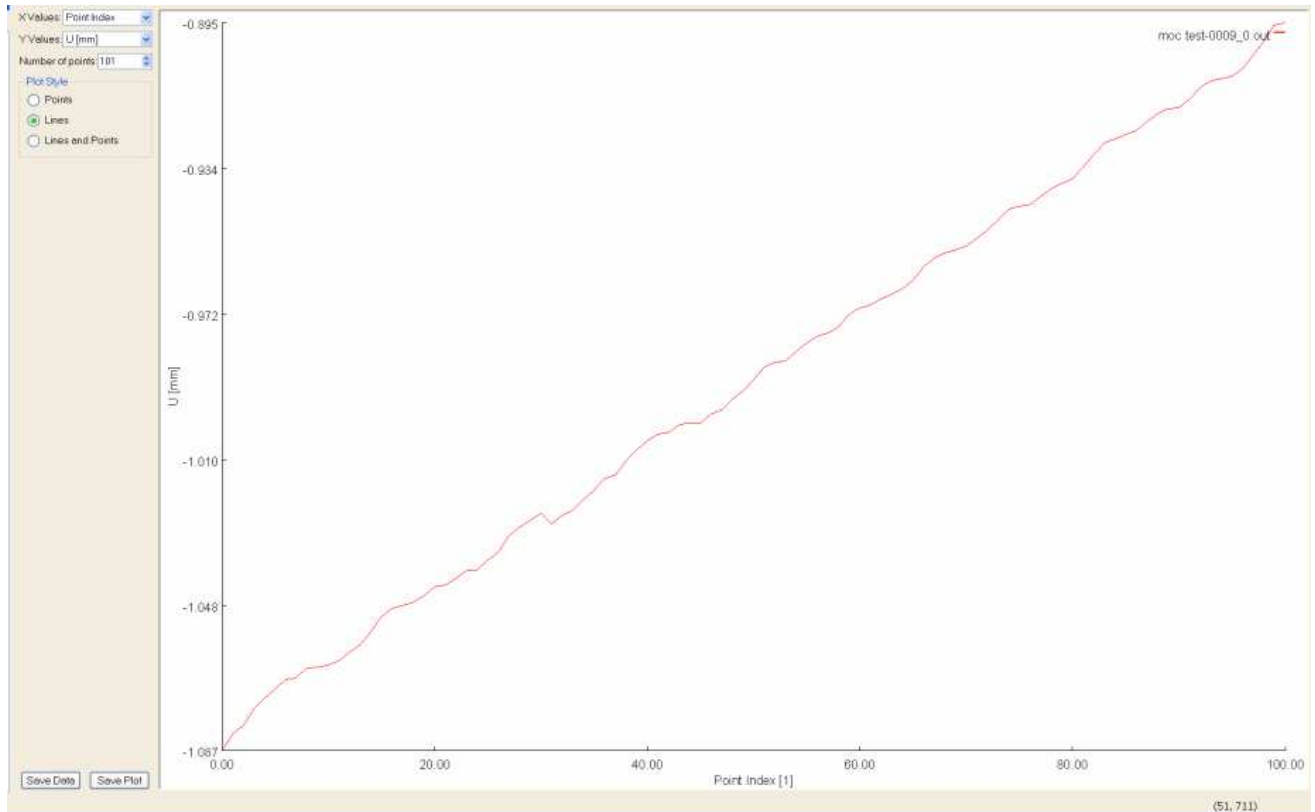
Εικόνα 5-80: Οι επιλογές που υπάρχουν στο πρόγραμμα για την παρουσίαση των διαγραμμάτων.

5.9.1. Τα Διαγράμματα των Οριζόντιων Μετατοπίσεων U

Σε αυτήν την υποενότητα, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα διαγράμματα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της επιφάνειας του δείγματος μαρμάρου που εξετάζεται, τα οποία προκύπτουν κατά μήκος μίας κάθετης και μίας οριζόντιας γραμμής που ορίζουμε. Παρακάτω ακολουθούν και εξετάζονται τα διαγράμματα των οριζόντιων μετατοπίσεων U που προκύπτουν από την κάθετη γραμμή που ορίζεται:

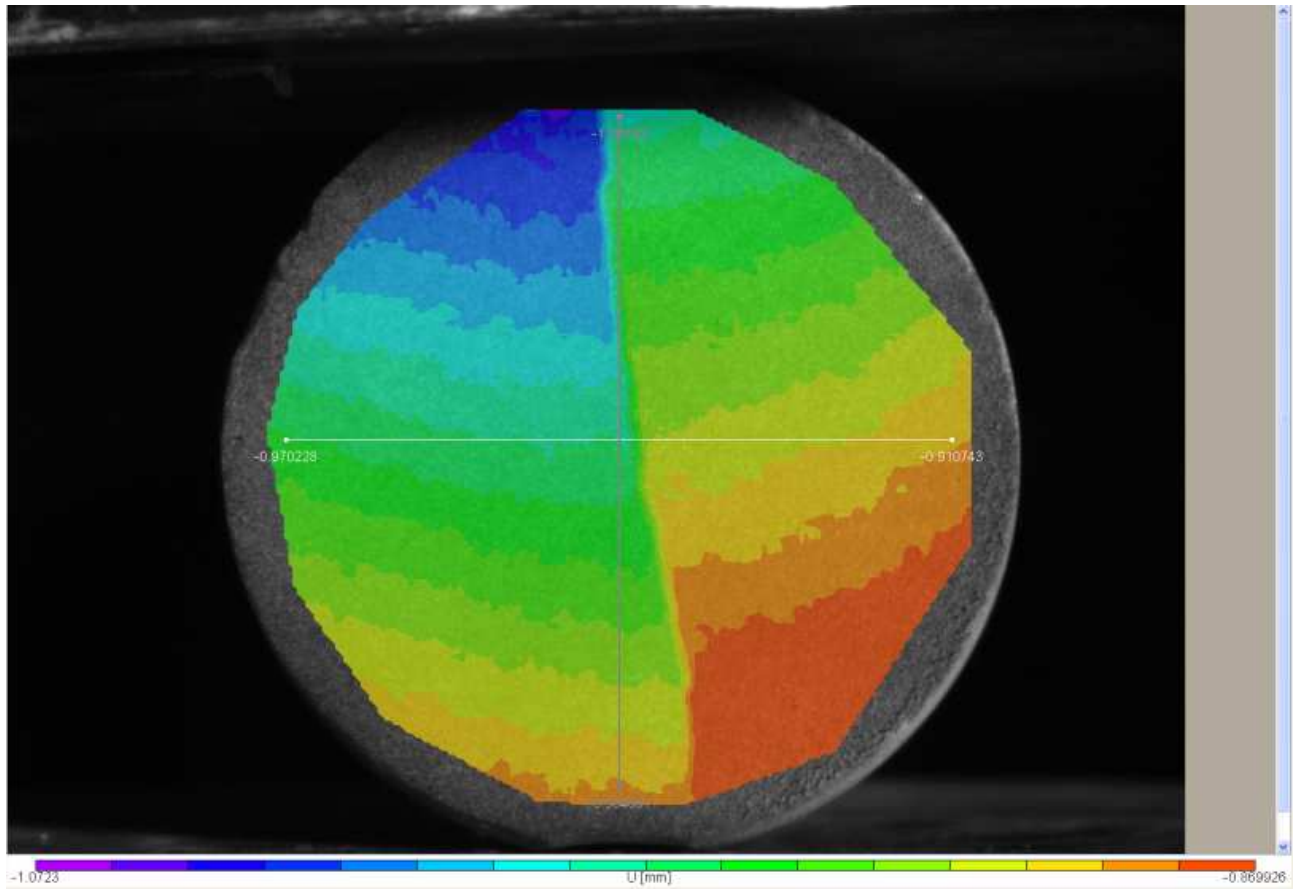


Εικόνα 5-81: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι μετατοπίσεις U της παραμορφωμένης εικόνας 9.

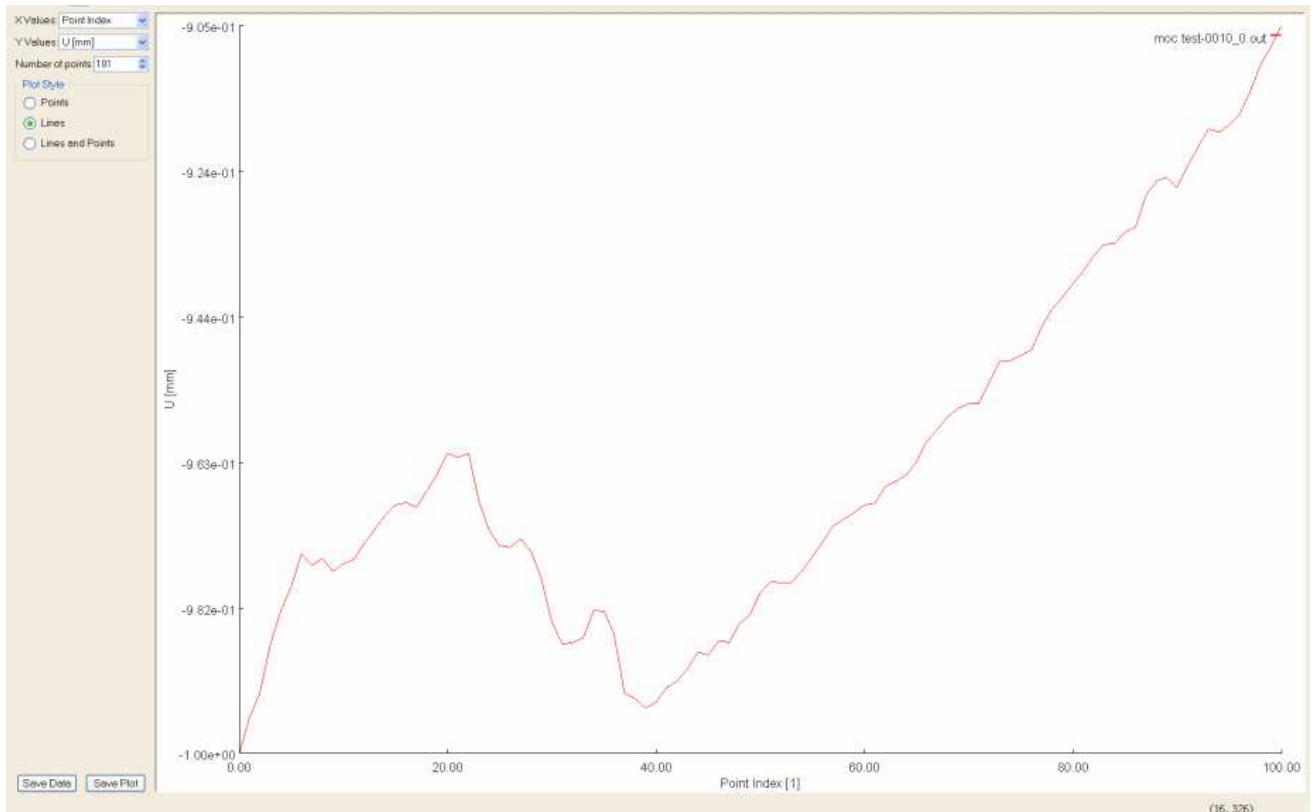


Διάγραμμα 5-1: Το διάγραμμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Για την παραμορφωμένη εικόνα 9, το διάγραμμα των μετατοπίσεων U , εξετάζοντας την κάθετη γραμμή, έχει τη μορφή σχεδόν ευθείας γραμμής. Στη γραμμή που απεικονίζεται, οι τιμές της κατά X μετατόπισης όλο και αυξάνονται από το πάνω μέρος της επιφάνειας του δοκιμίου προς το κάτω.



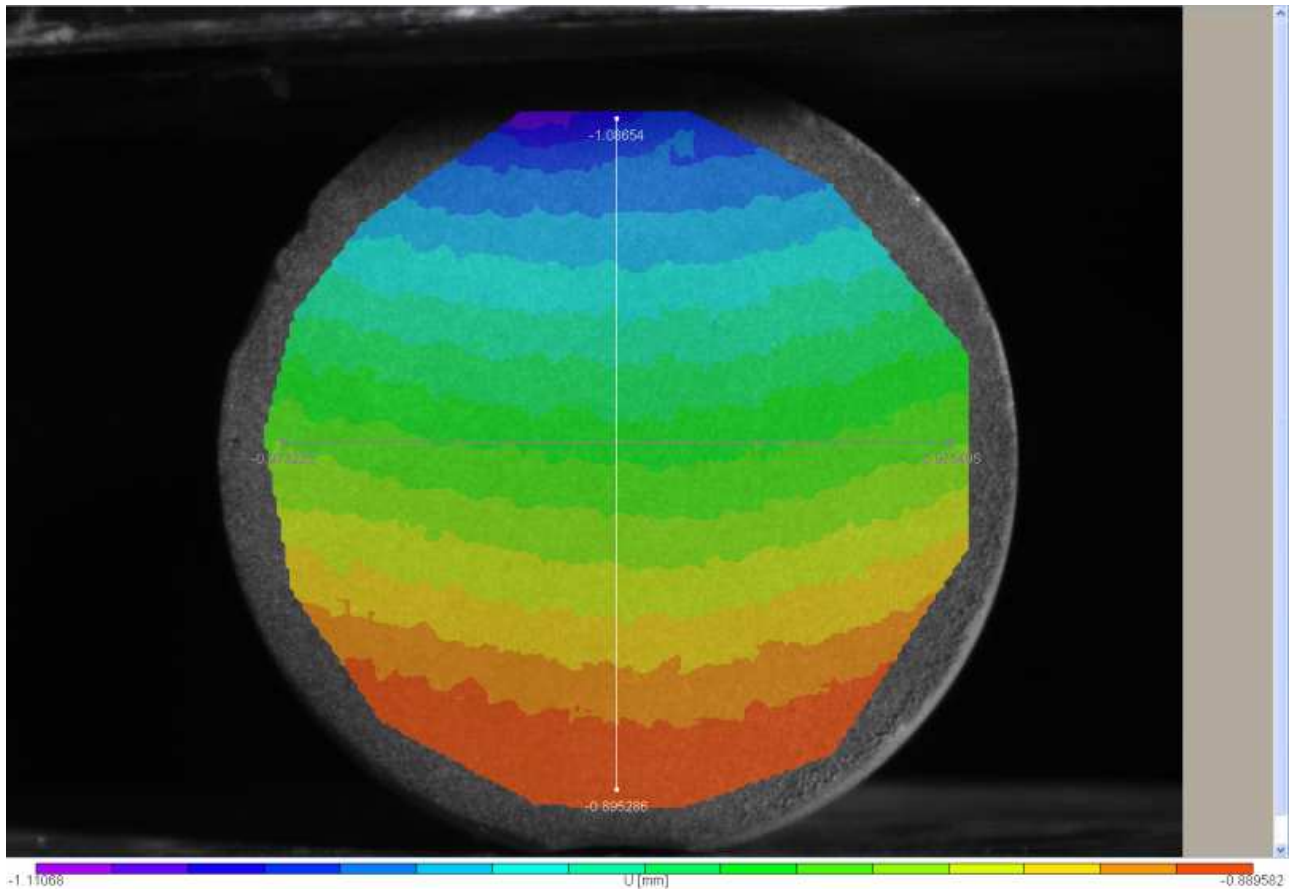
Εικόνα 5-82: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις U της παραμορφωμένης εικόνας 10.



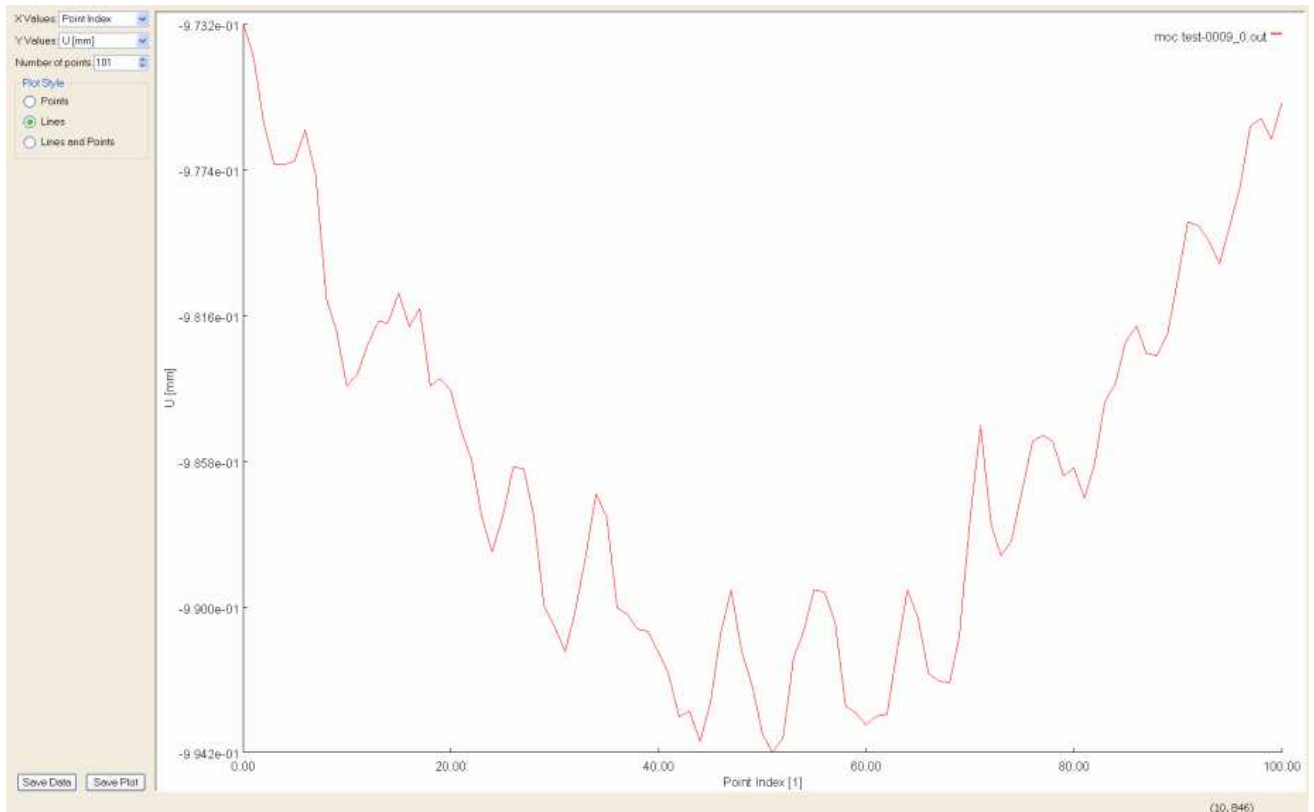
Διάγραμμα 5-2: Το διάγραμμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 10, παρατηρείται ότι κοντά στο 40° σημείο κατά μήκος της κάθετης γραμμής φαίνεται η τομή της γραμμής αυτής με τη ρωγμή που έχει δημιουργηθεί. Ύστερα από αυτό το σημείο οι τιμές των μετατοπίσεων U κατά τη X διεύθυνση αυξάνονται. Αυτό φαίνεται από την ευθεία μορφή που αποκτά το διάγραμμα μετά το σημείο αυτό.

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των οριζόντιων μετατοπίσεων U που προκύπτουν από την οριζόντια γραμμή που εξετάζεται:

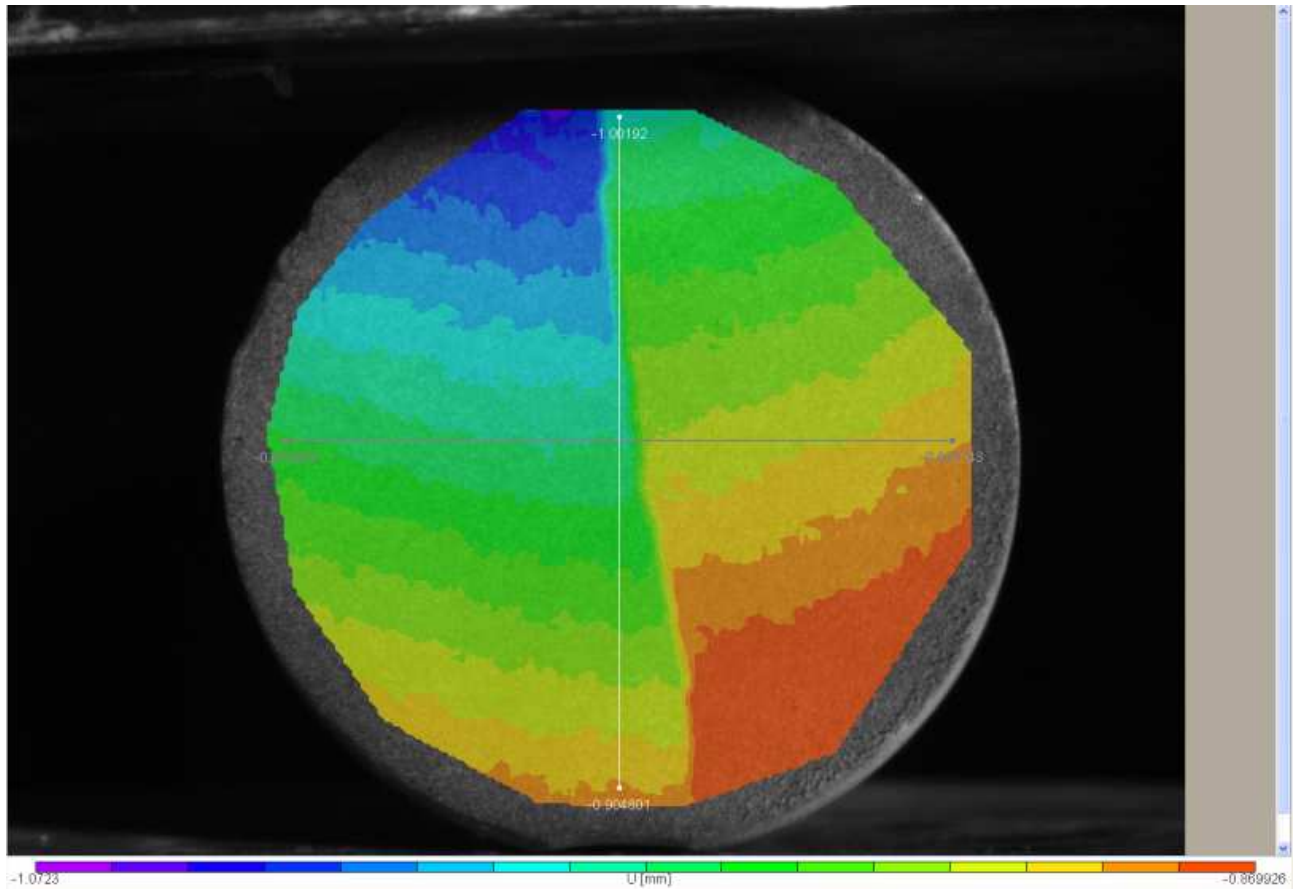


Εικόνα 5-83: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις U της παραμορφωμένης εικόνας 9.

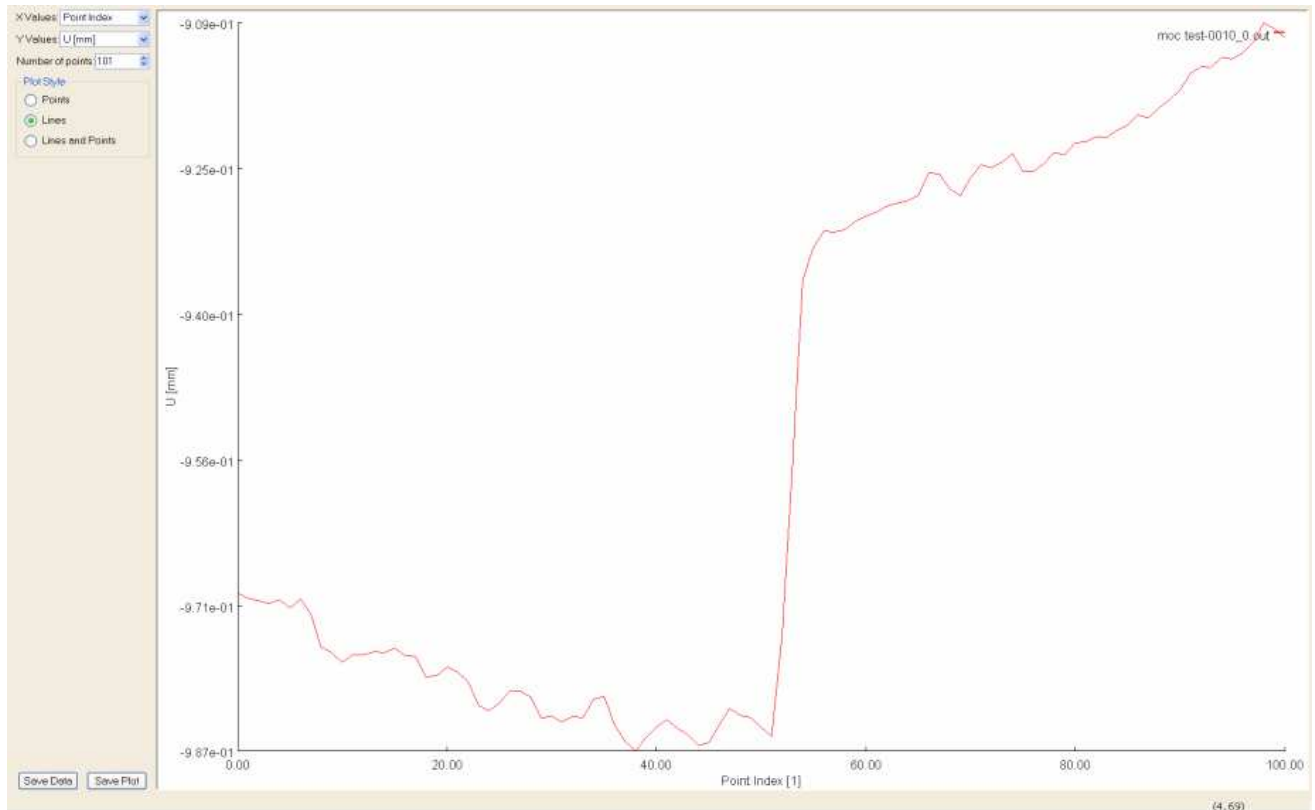


Διάγραμμα 5-3: Το διάγραμμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

Για την παραμορφωμένη εικόνα 9 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής που εξετάζεται, το διάγραμμα των μετατοπίσεων U παρουσιάζει μεγάλο θόρυβο. Αν, λοιπόν, εξαιρέσει κανείς τον θόρυβο, το σχήμα που παρατηρείται να έχει η συγκεκριμένη γραφική παράσταση είναι μία καμπύλη σε μορφή παραβολής.



Εικόνα 5-84: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις U της παραμορφωμένης εικόνας 10.

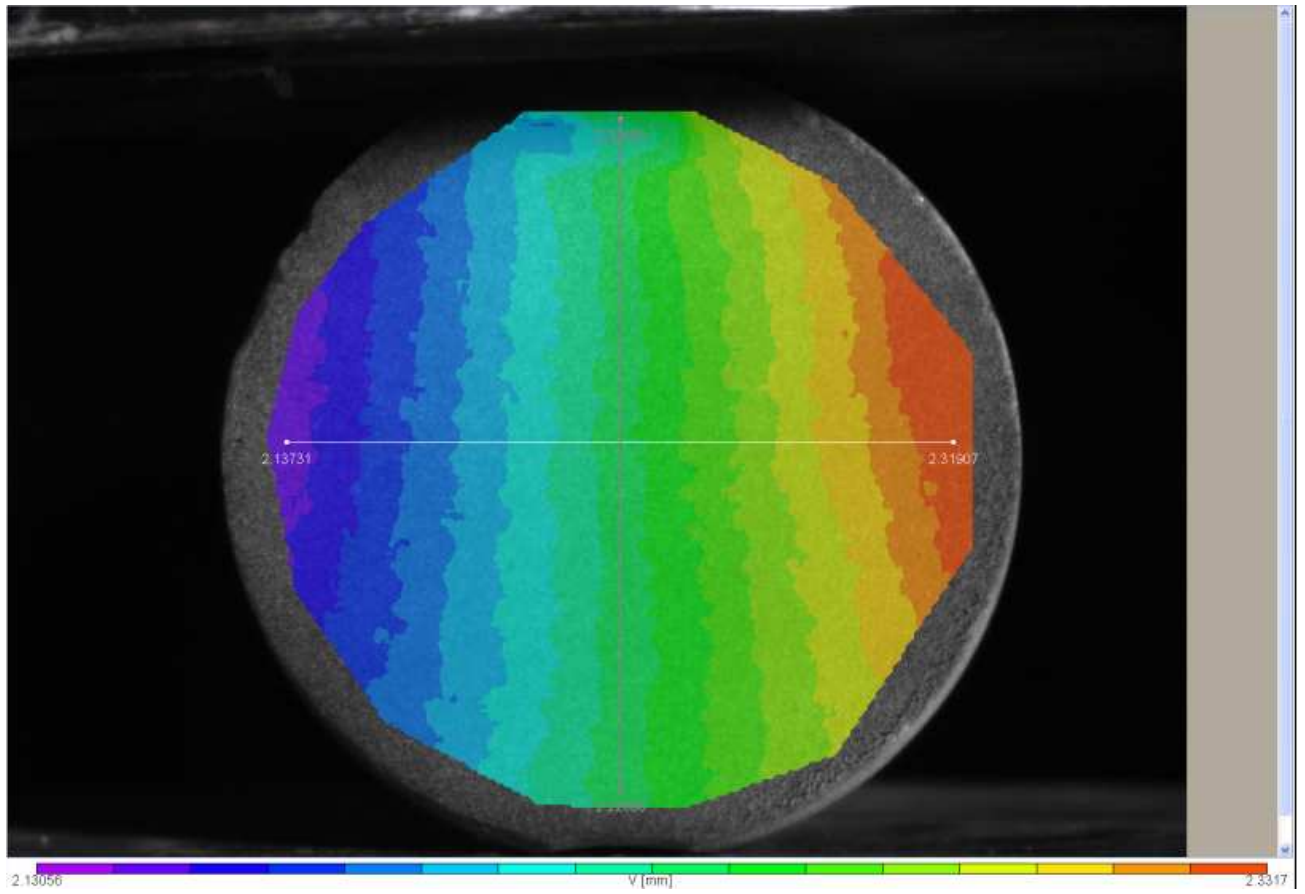


Διάγραμμα 5-4: Το διάγραμμα των οριζόντιων μετατοπίσεων U της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

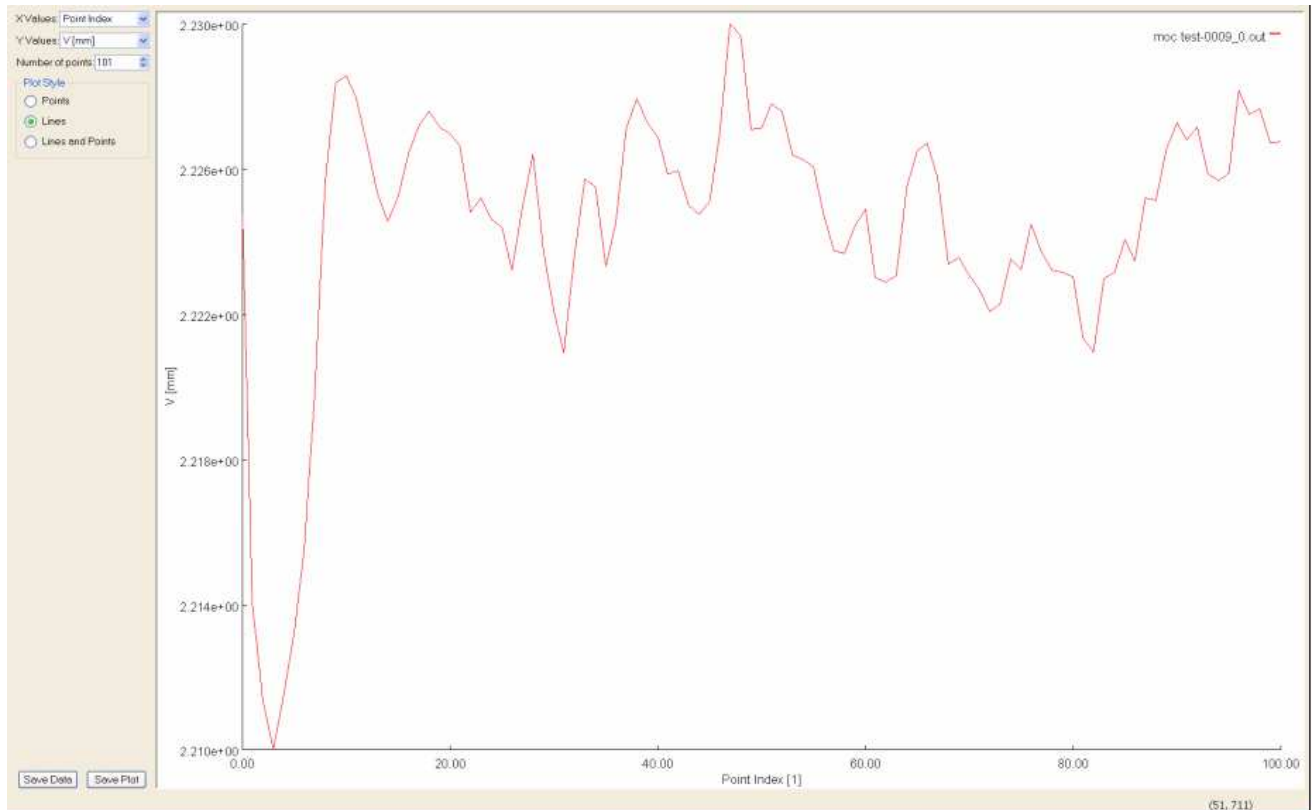
Για το διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 10, στο 50° σημείο περίπου, φαίνεται η τομή της οριζόντιας γραμμής που εξετάζεται με τη ρωγμή που δημιουργείται στην επιφάνεια του δείγματος. Το τμήμα της γραμμής αριστερά της τομής βρίσκεται εντός πρασίνων περιοχών και έτσι, παρατηρούνται χαμηλές τιμές μετατόπισης κατά X . Από την άλλη, το τμήμα της γραμμής δεξιά της τομής που βρίσκεται εντός των κίτρινων περιοχών, οπότε οι τιμές της μετατόπισης U εκτοξεύονται. Είναι, δηλαδή, εμφανές μία απότομη μετάβαση από τις πράσινες στις κίτρινες περιοχές.

5.9.2. Τα Διαγράμματα των Κάθετων Μετατοπίσεων V

Σε αυτήν την υποενότητα, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα διαγράμματα των κάθετων μετατοπίσεων V της επιφάνειας του δείγματος μαρμάρου που εξετάζεται, τα οποία προκύπτουν κατά μήκος μίας κάθετης και μίας οριζόντιας γραμμής που ορίζουμε. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των κάθετων μετατοπίσεων V που προκύπτουν από την κάθετη γραμμή που εξετάζεται:

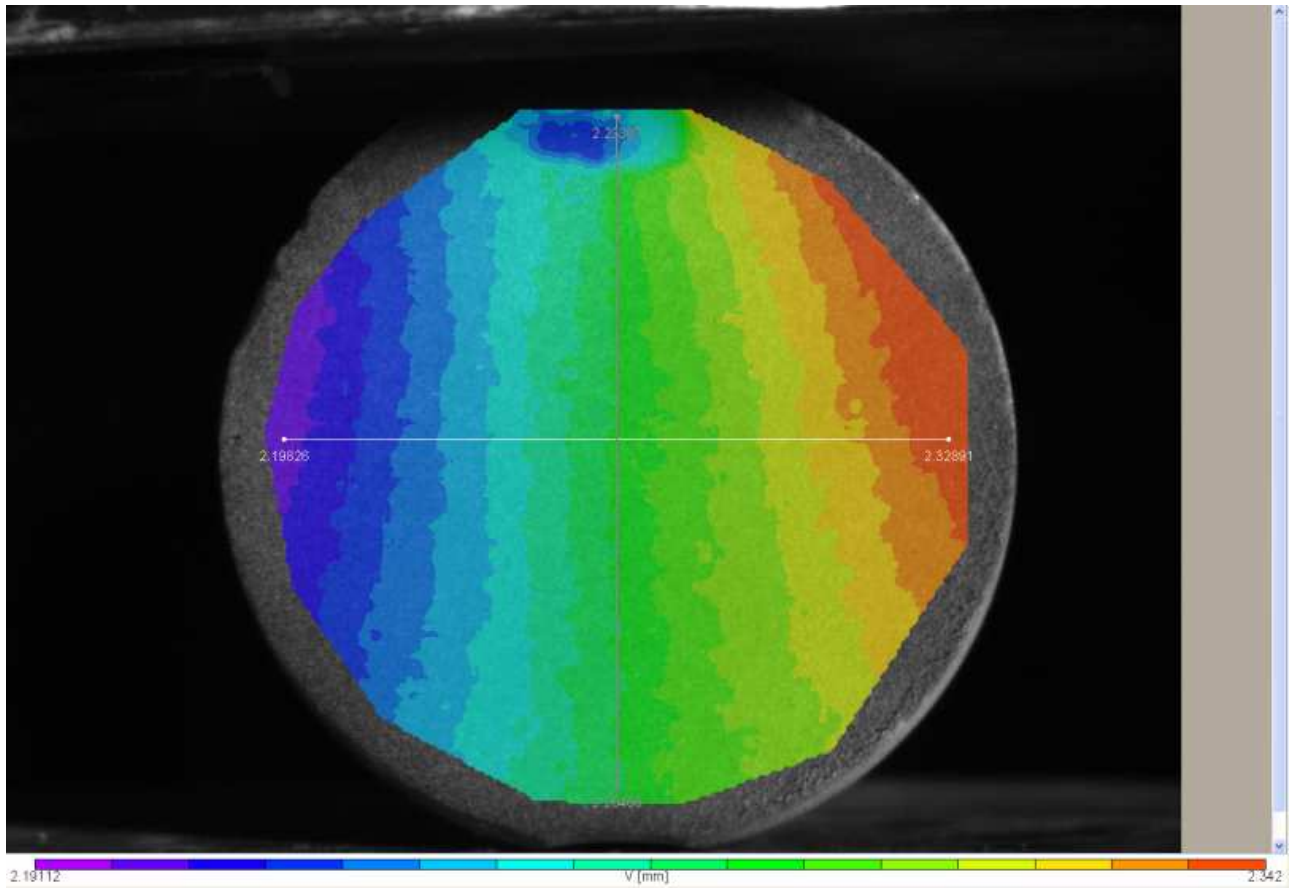


Εικόνα 5-85: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι κάθετες μετατοπίσεις V της παραμορφωμένης εικόνας 9.

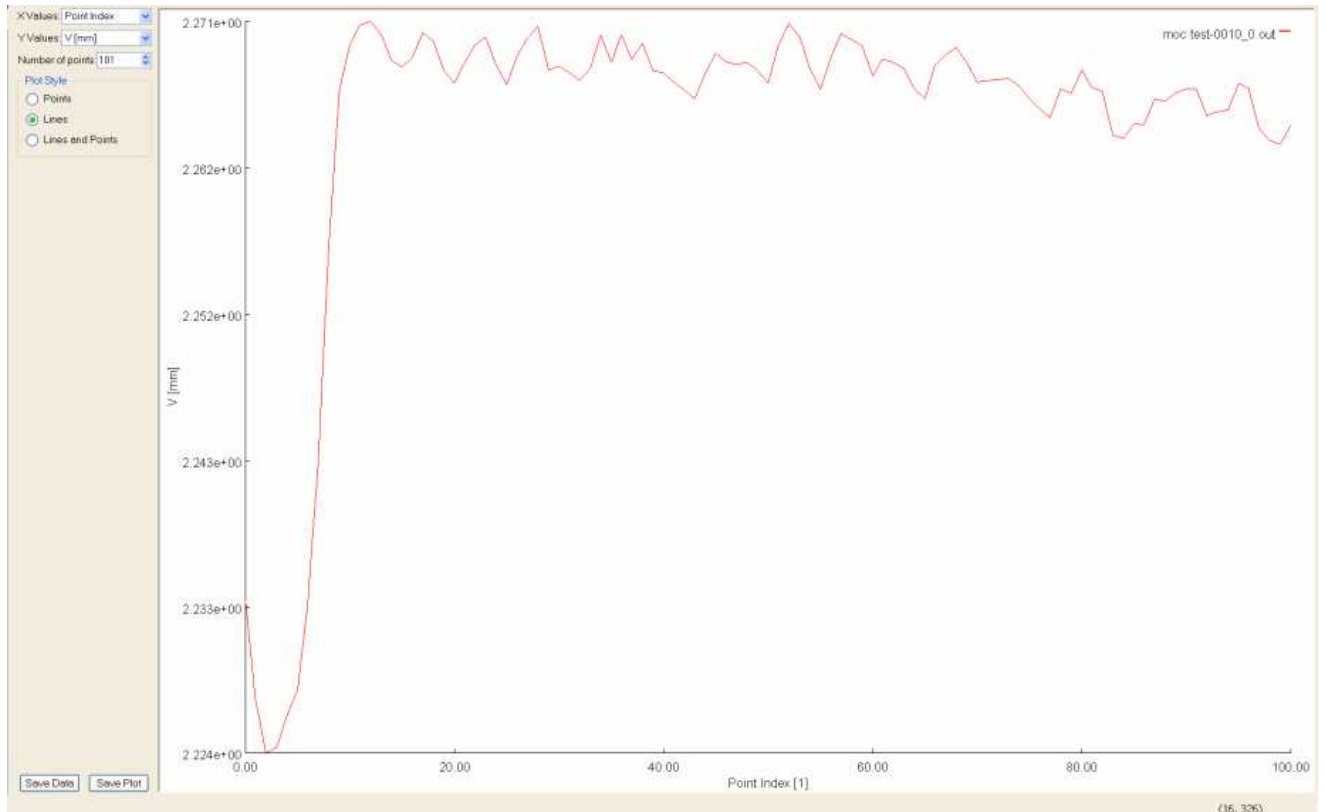


Διάγραμμα 5-5: Το διάγραμμα των κάθετων μετατοπίσεων V της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Στο διάγραμμα των μετατοπίσεων V της παραμορφωμένης εικόνας 9, κατά μήκος της κάθετης γραμμής που εξετάζεται, παρατηρείται μεγάλος θόρυβος. Εύκολα εξαγεται το συμπέρασμα ότι το δείγμα κάνει αμέτρητες μικρομετακινήσεις μέχρι τη δημιουργία της ρωγμής, μέχρι δηλαδή να «σπάσει».



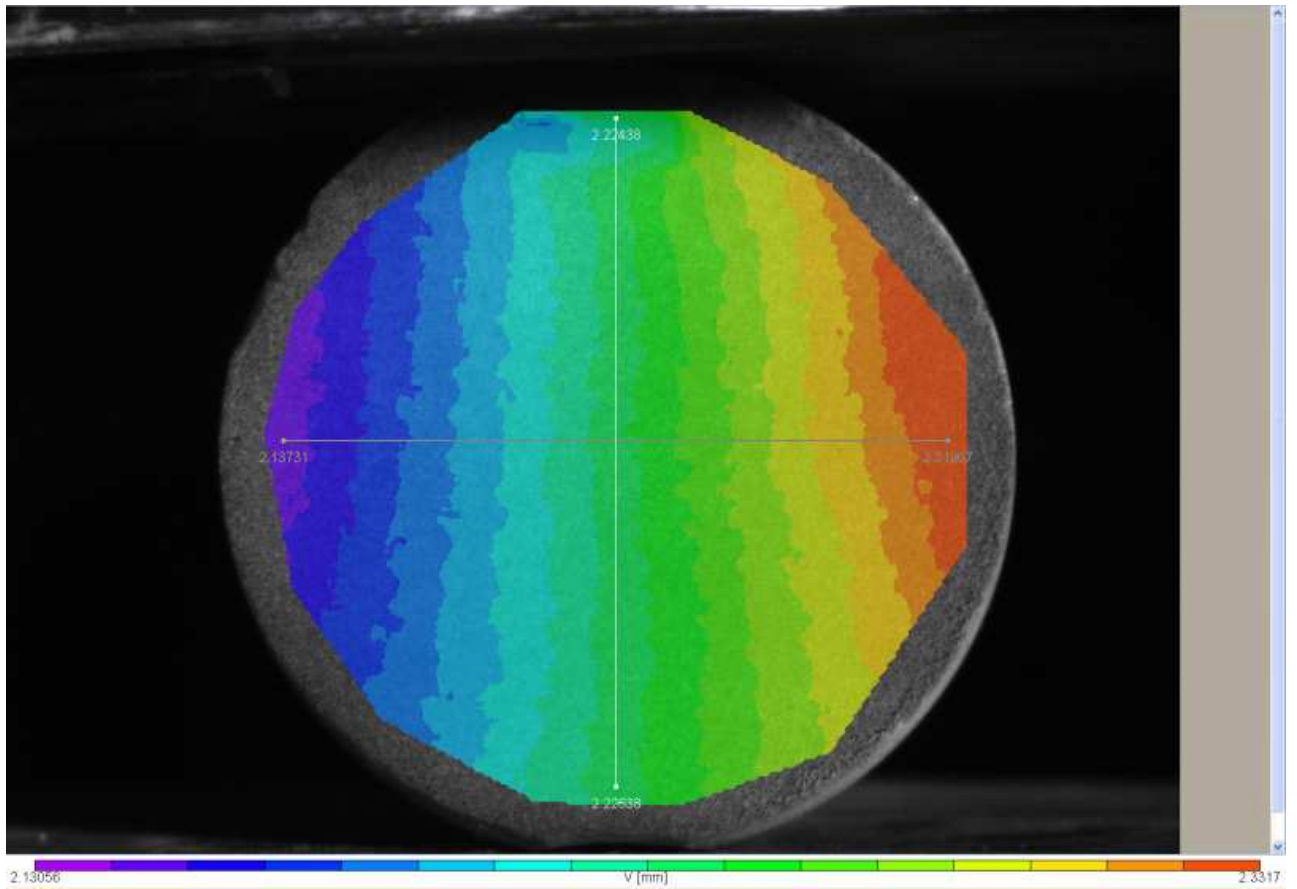
Εικόνα 5-86: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι κάθετες μετατοπίσεις V της παραμορφωμένης εικόνας 10.



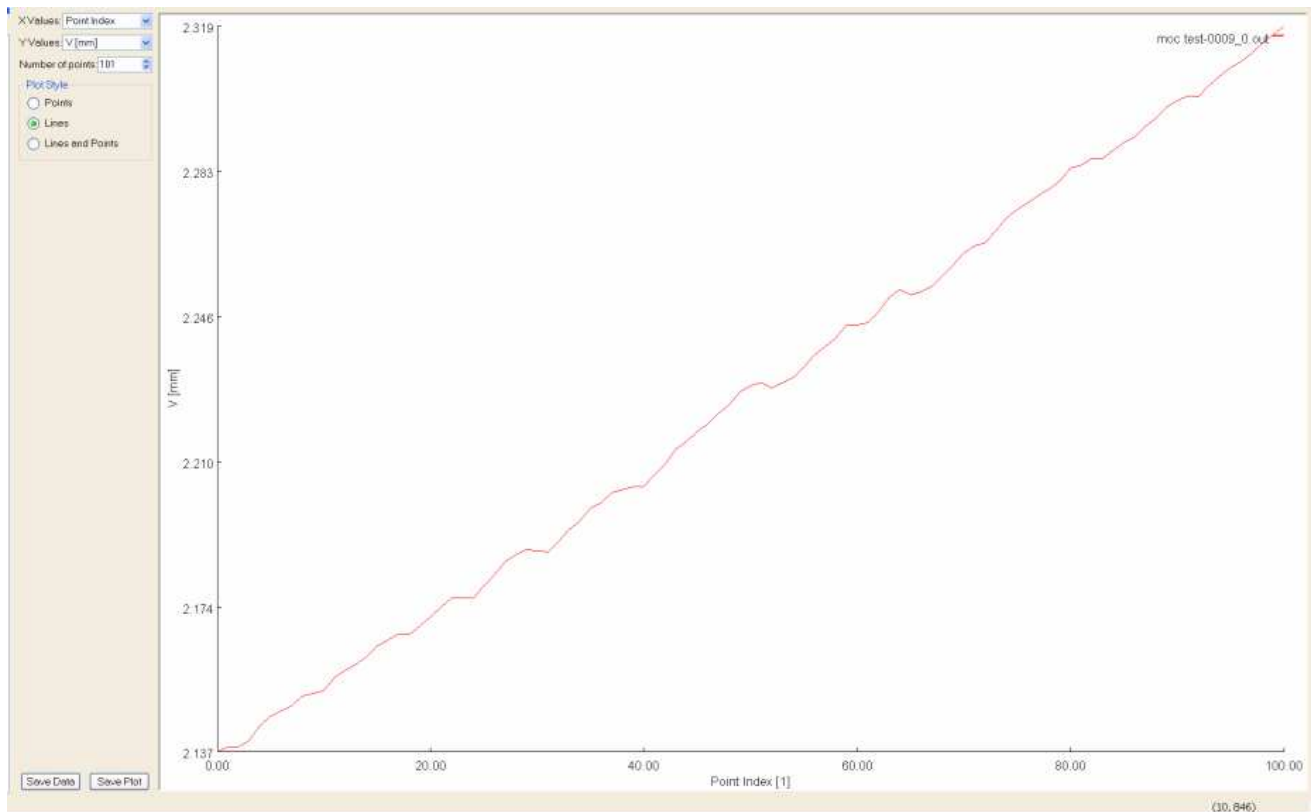
Διάγραμμα 5-6: Το διάγραμμα των κάθετων μετατοπίσεων V της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Στο διάγραμμα των μετατοπίσεων κατά Y της παραμορφωμένης εικόνας 10, κατά τη δημιουργία της ρωγμής, παρατηρείται πολύ λιγότερος θόρυβος. Το διάγραμμα παρουσιάζει μεγαλύτερη ομαλότητα και οι μικρομετακινήσεις δεν είναι τόσο μεγάλες. Γενικά, σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα, η χαμηλότερη τιμή των μετατοπίσεων V ανήκει στην κυκλική γαλάζια-μπλε περιοχή στο πάνω μέρος του δείγματος, η οποία δέχεται την πίεση από τη μηχανή θλίψης. Συνεπώς, στο κάτω μέρος του δείγματος οι μετατοπίσεις V είναι μεγαλύτερες απ' ό,τι στο πάνω μέρος.

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των κάθετων μετατοπίσεων V που προκύπτουν από την οριζόντια γραμμή που εξετάζεται:

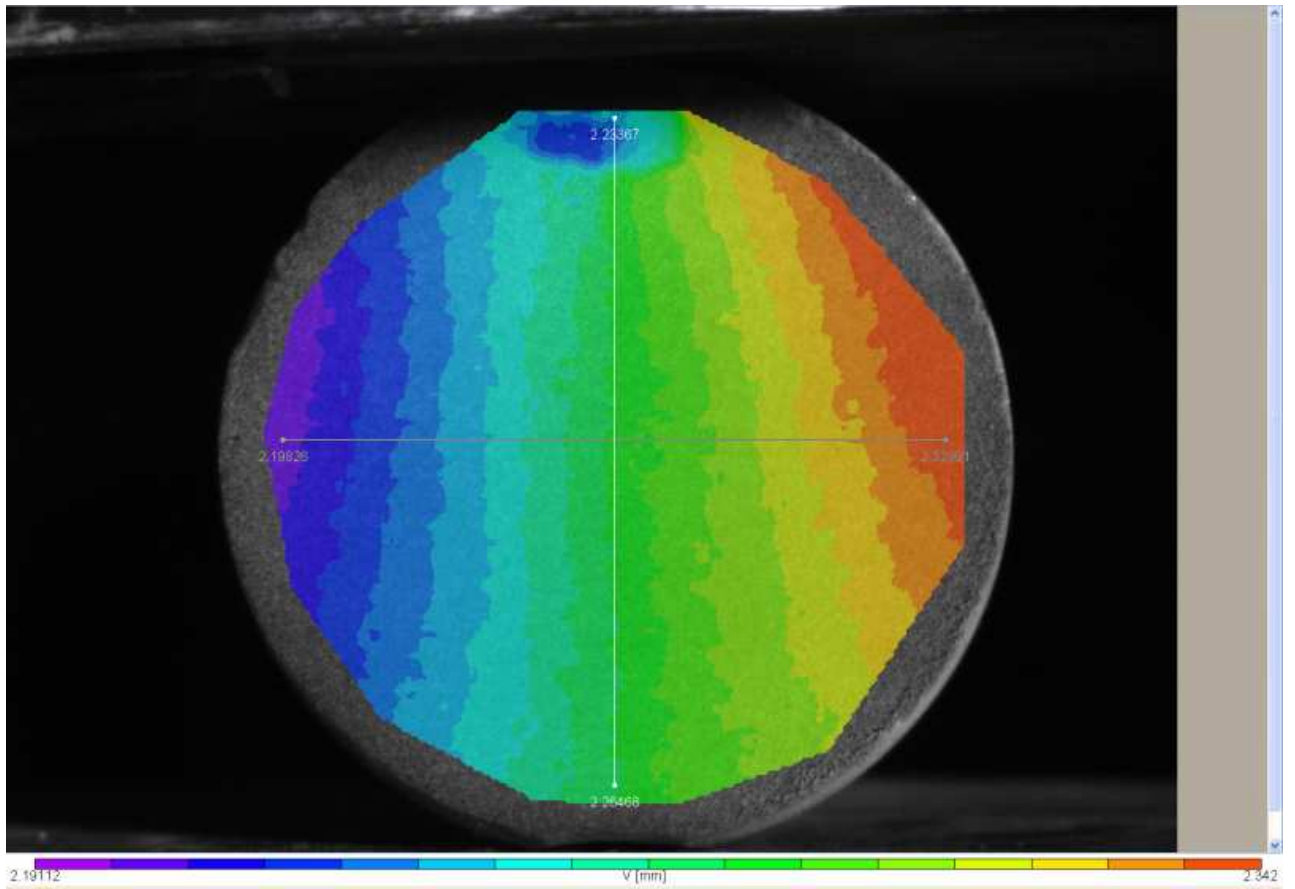


Εικόνα 5-87: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι κάθετες μετατοπίσεις V της παραμορφωμένης εικόνας 9.

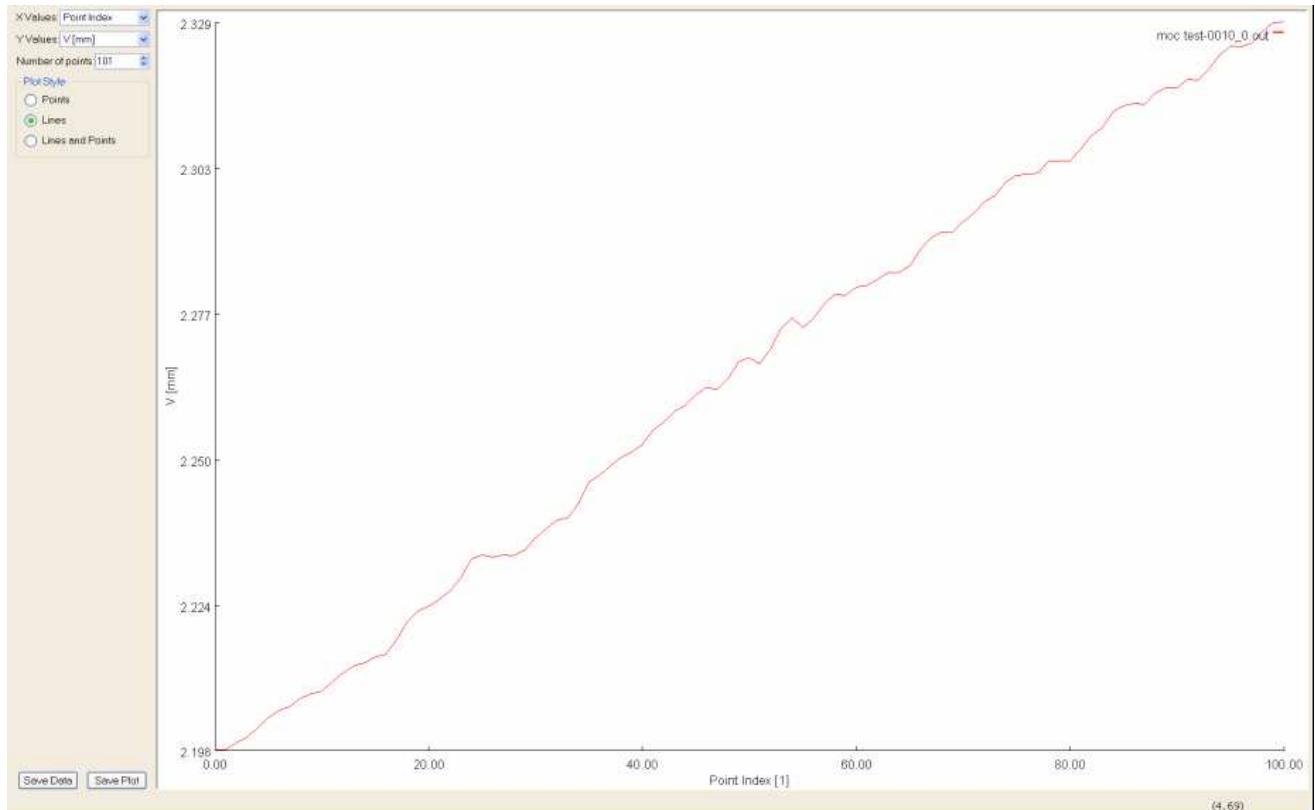


Διάγραμμα 5-7: Το διάγραμμα των κάθετων μετατοπίσεων V της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

Στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 9, οι τιμές των κάθετων μετατοπίσεων V κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής που εξετάζεται έχουν τη μορφή ευθείας γραμμής. Παρατηρείται ότι οι τιμές αυξάνονται από το αριστερό μέρος της επιφάνειας του δείγματος στο δεξιό.



Εικόνα 5-88: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι κάθετες μετατοπίσεις V της παραμορφωμένης εικόνας 10.

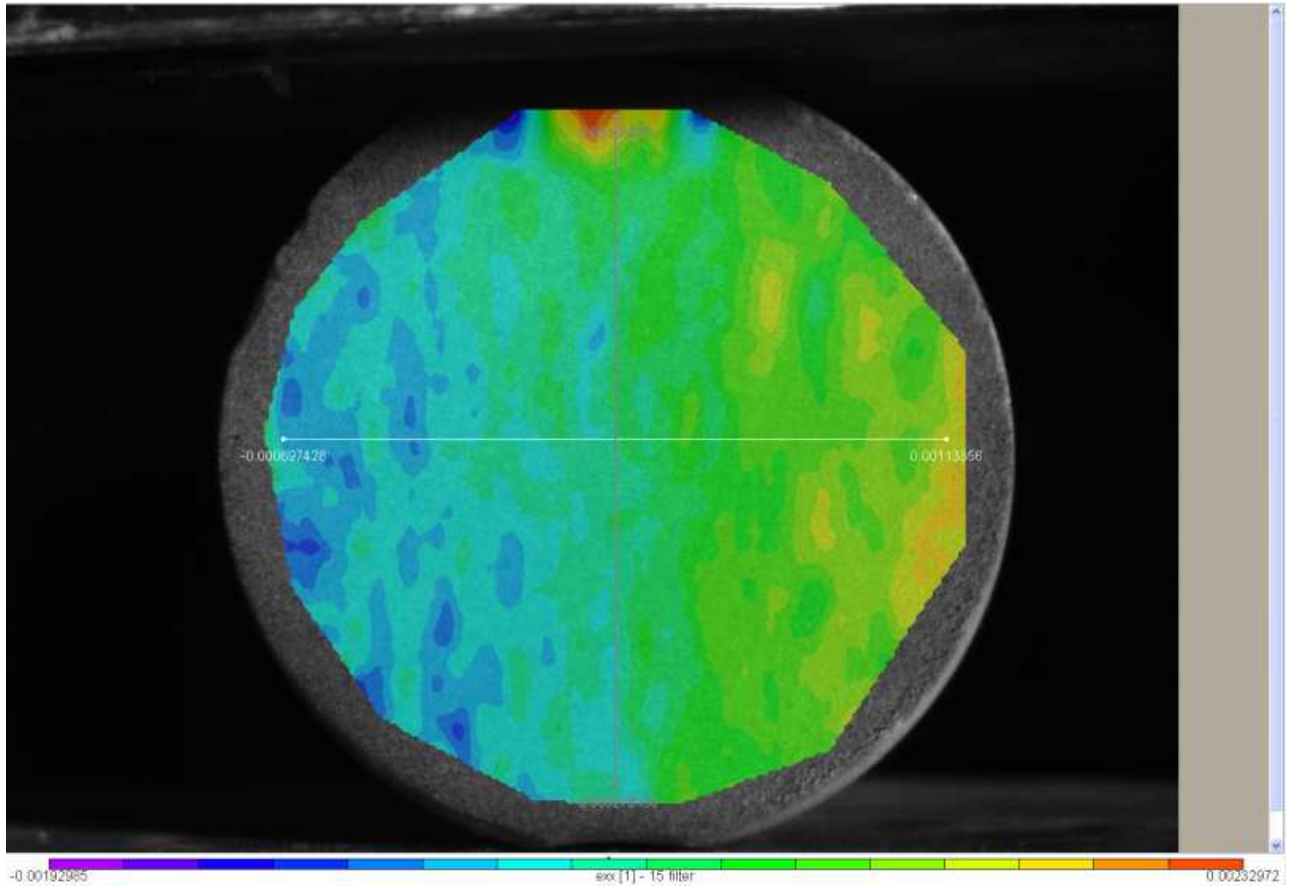


Διάγραμμα 5-8: Το διάγραμμα των κάθετων μετατοπίσεων V της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

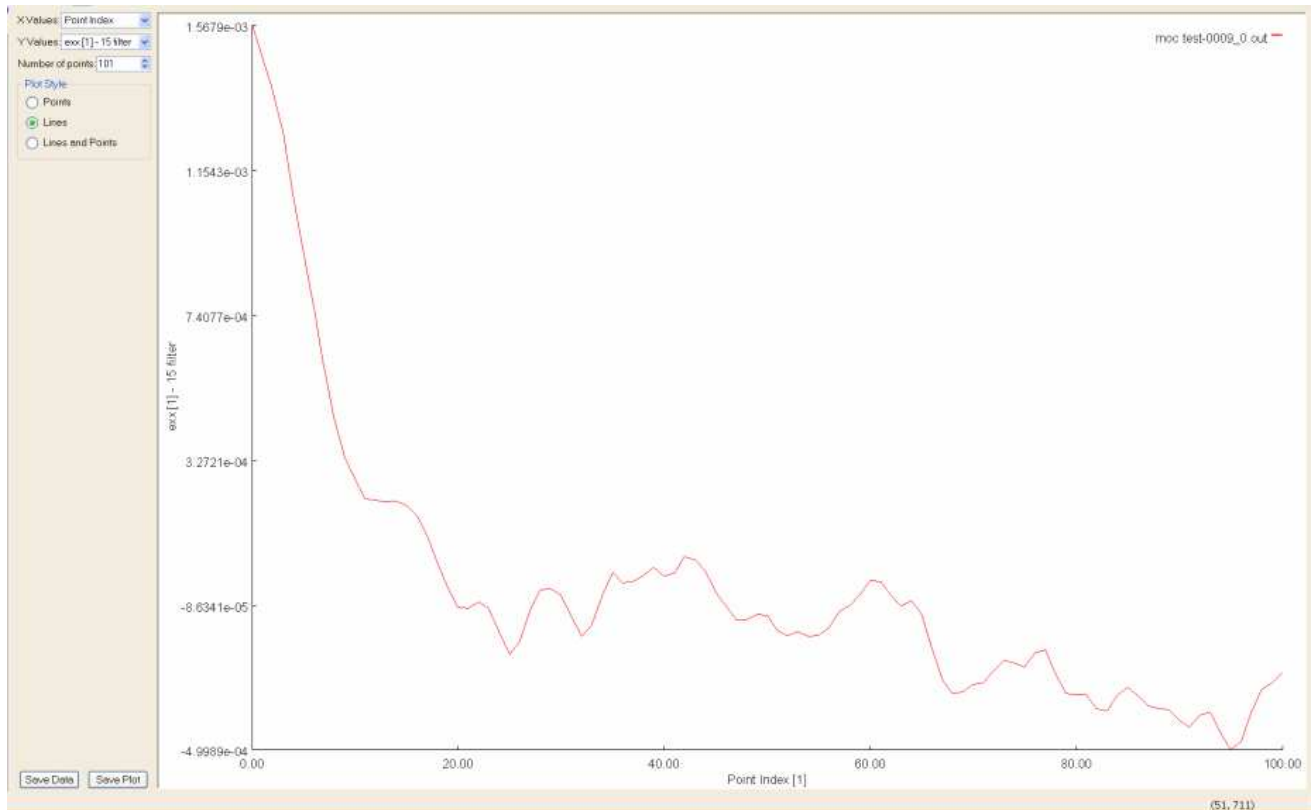
Στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 10, οι τιμές των κάθετων μετατοπίσεων σχηματίζουν επίσης σχεδόν ευθεία γραμμή με τις τιμές να αυξάνονται από τα αριστερά στα δεξιά του δείγματος. Δηλαδή, οι κατά Y -μετατοπίσεις δεν επηρεάζονται σημαντικά από τη ρωγμή κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής που εξετάζεται.

5.9.3. Τα Διαγράμματα των Ανηγμένων Παραμορφώσεων e_{xx}

Σε αυτήν την υποενότητα, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα διαγράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της επιφάνειας του δείγματος μαρμάρου που εξετάζεται, τα οποία προκύπτουν κατά μήκος μίας κάθετης και μίας οριζόντιας γραμμής που ορίζουμε. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} που προκύπτουν από την κάθετη γραμμή που εξετάζεται:

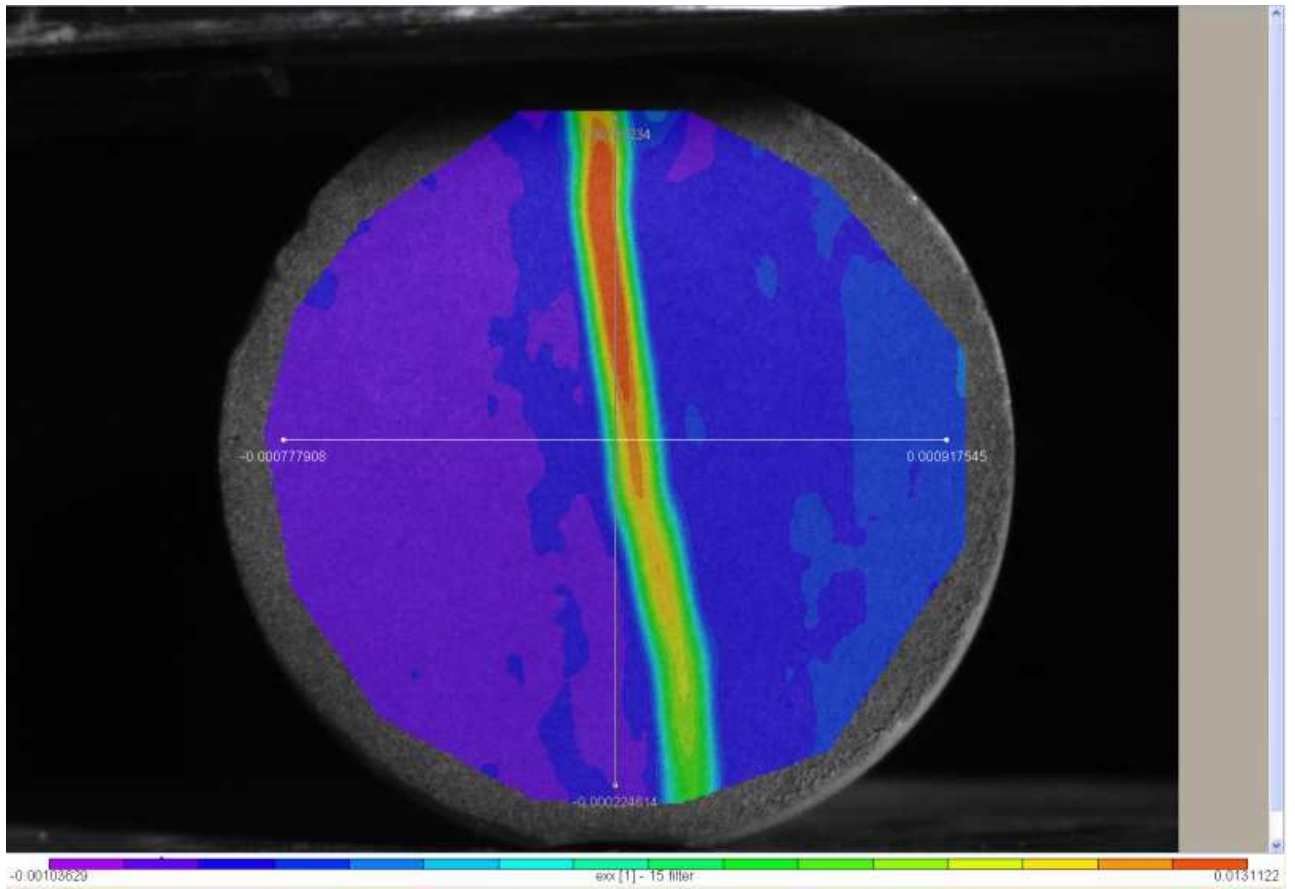


Εικόνα 5-89: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 9.

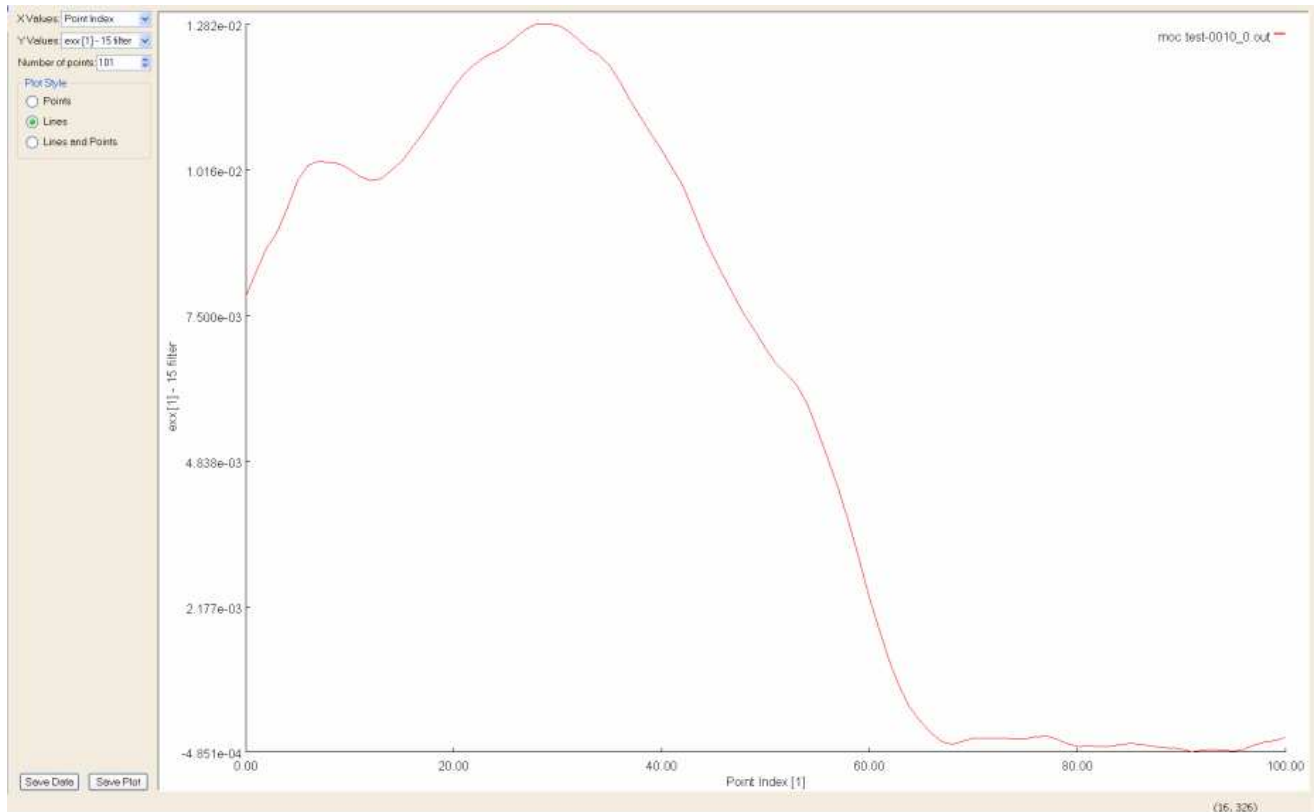


Διάγραμμα 5-9: Το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Παρατηρείται ότι στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 9, οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά x ξεκινούν από μία υψηλή τιμή και ελαττώνονται απότομα κατά μήκος της κάθετης γραμμής που εξετάζεται. Μετά από την απότομη πτώση, οι τιμές e_{xx} συνεχίζουν να κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα μέχρι το 100° σημείο.



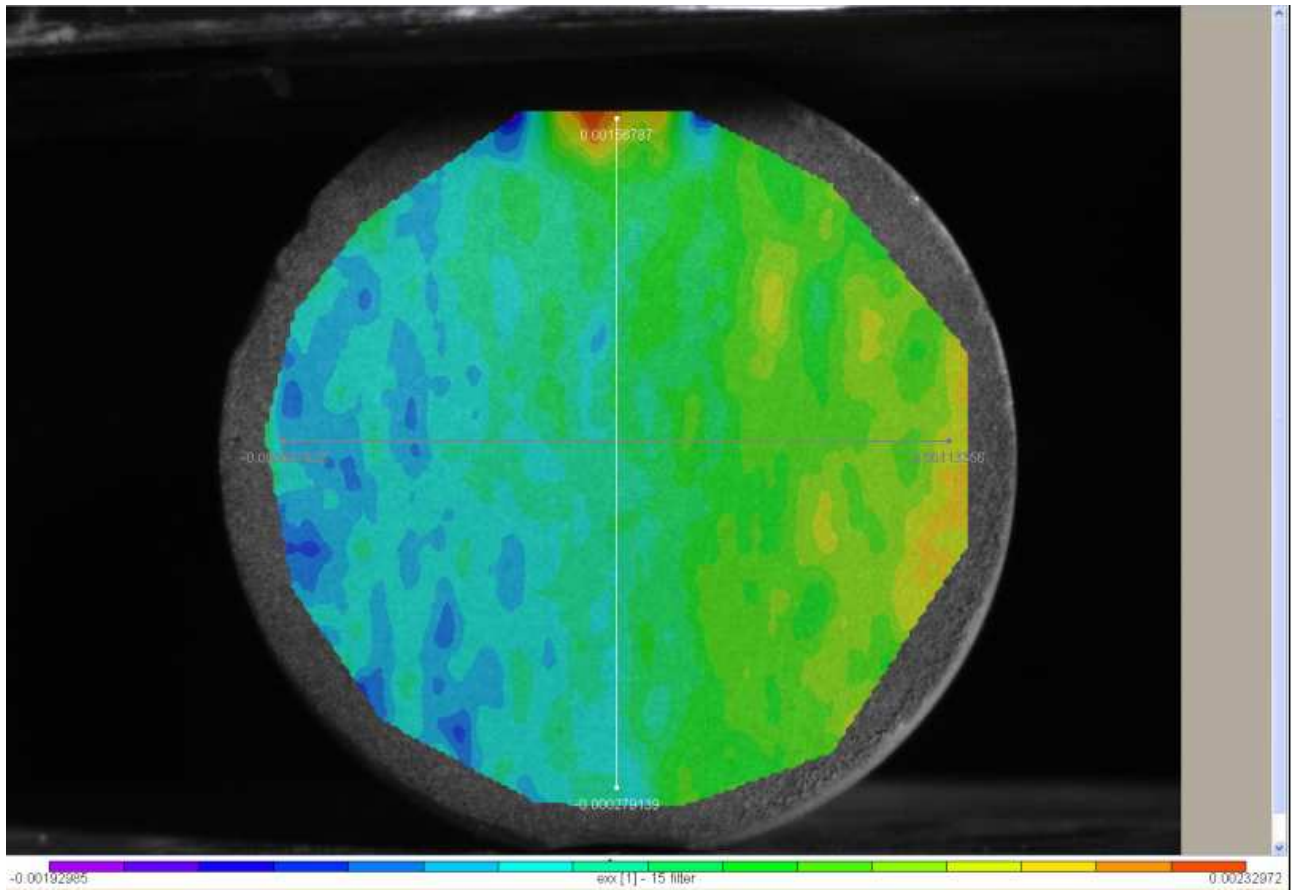
Εικόνα 5-90: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 10.



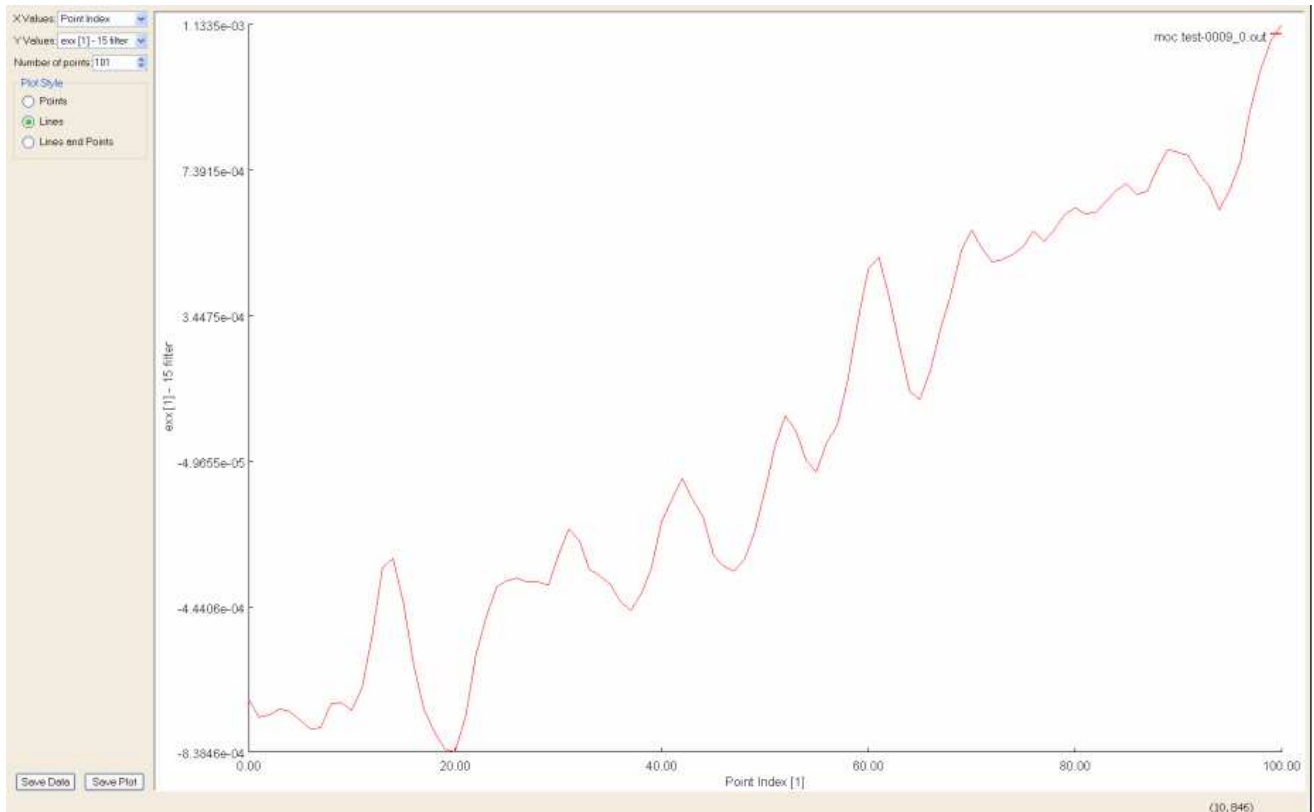
Διάγραμμα 5-10: Το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 10, παρατηρείται μία σταδιακή κορύφωση στις τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} και αμέσως μετά μία απότομη πτώση. Από το 68^ο περίπου σημείο μέχρι το 100^ο της κάθετης γραμμής που μελετάται, οι τιμές e_{xx} βρίσκονται στα πιο χαμηλά επίπεδα της κλίμακας.

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} που προκύπτουν από την οριζόντια γραμμή που εξετάζεται:

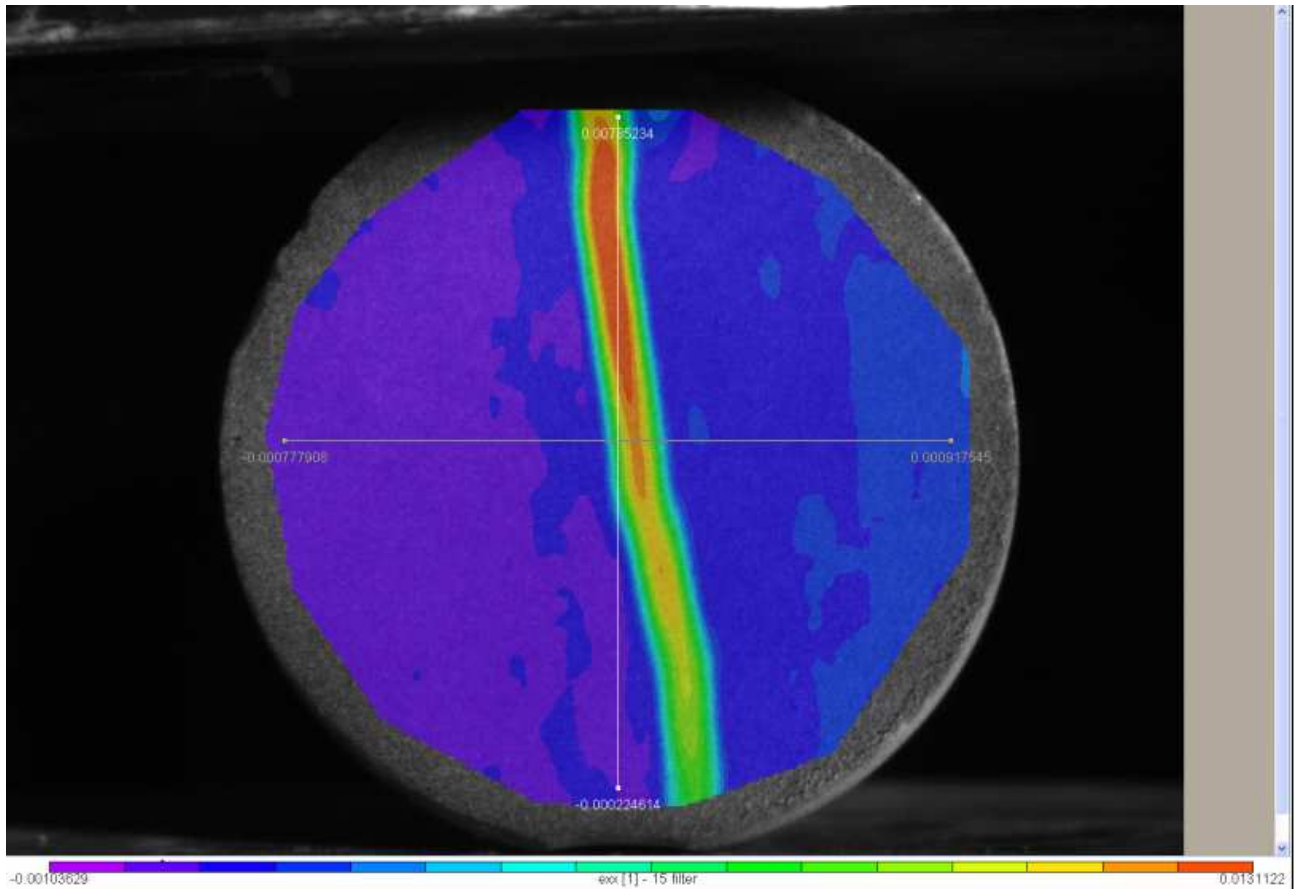


Εικόνα 5-91: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 9.

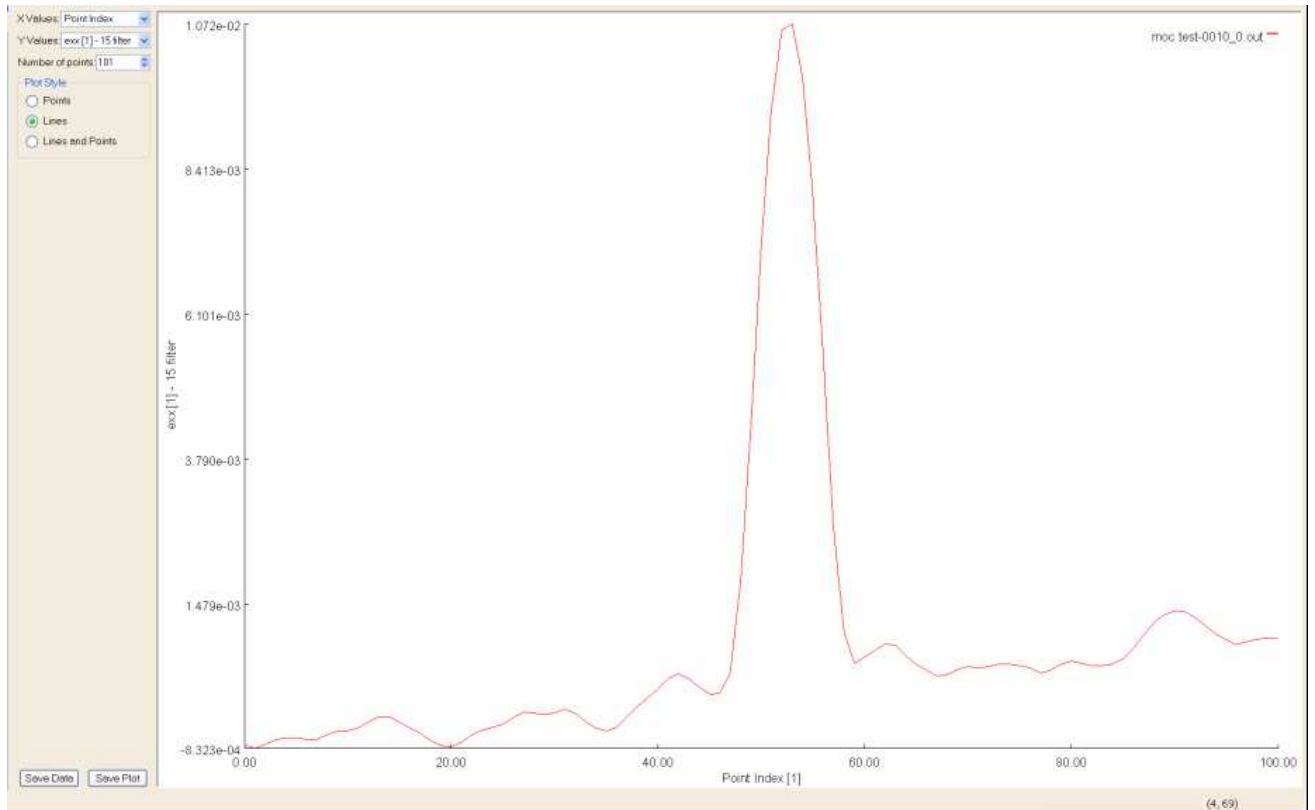


Διάγραμμα 5-11: Το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

Παρατηρείται ότι στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 9, οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά x ξεκινούν από μία από τις χαμηλότερες τιμές της κλίμακας και αυξάνονται, όχι όμως ομαλά, κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής που εξετάζεται. Αν εξαιρέσει κανείς τον θόρυβο που παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα, ο οποίος υποδηλώνει τις άπειρες μικρομετακινήσεις που πραγματοποιούν τα σημεία της επιφάνειας του δείγματος, η μορφή του διαγράμματος προσεγγίζει μία σχεδόν ευθεία γραμμή.



Εικόνα 5-92: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 10.

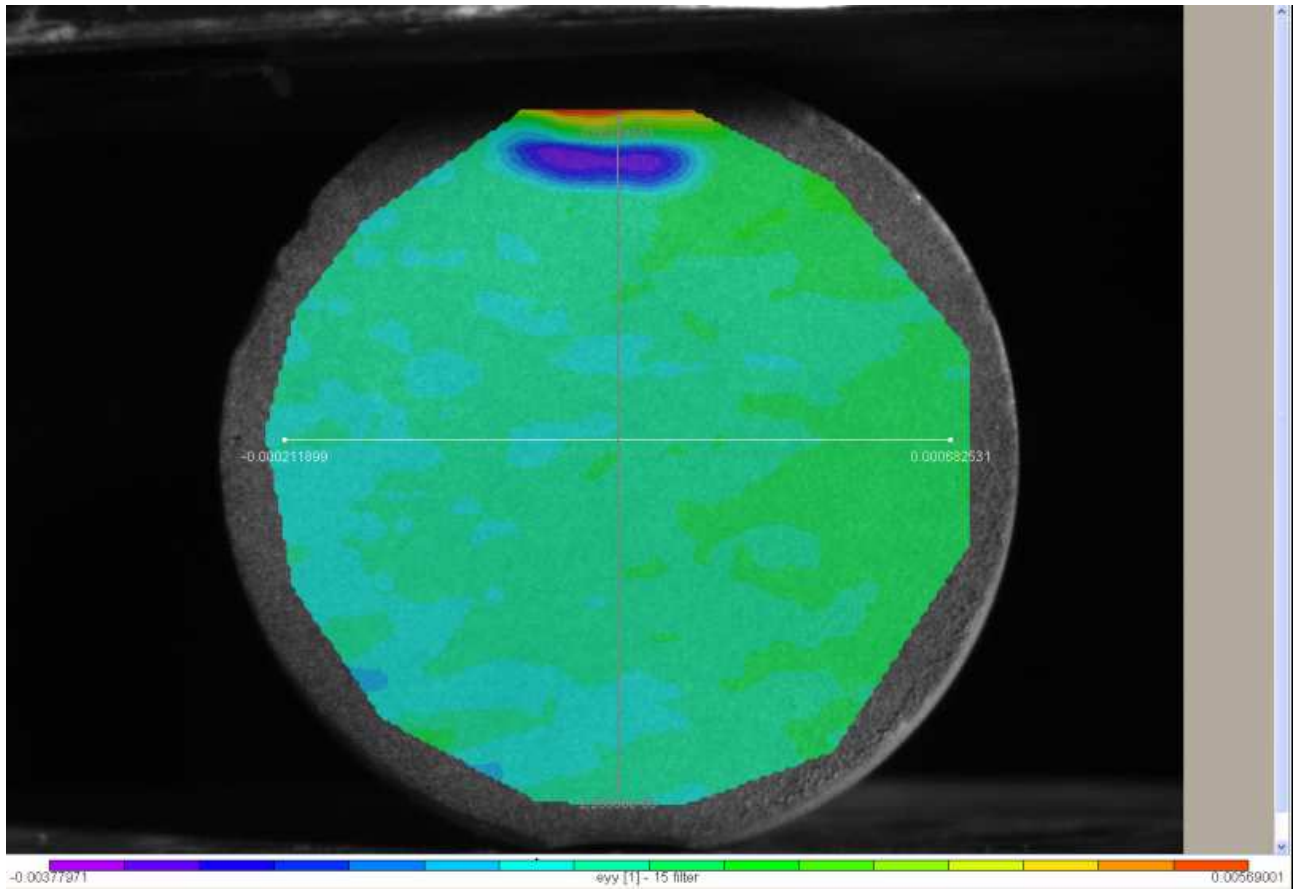


Διάγραμμα 5-12: Το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

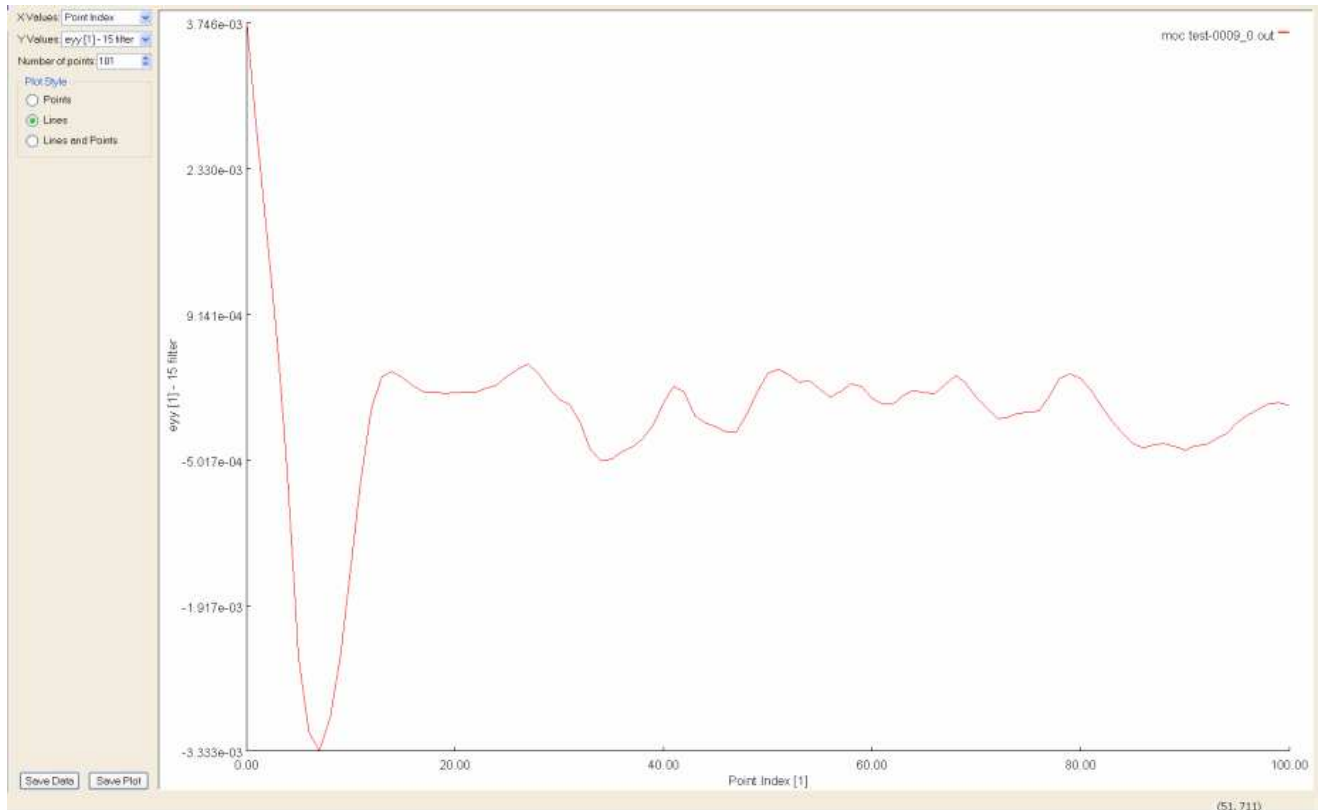
Στο κέντρο του διαγράμματος της παραμορφωμένης εικόνας 10, παρατηρείται μία απότομη κορύφωση των τιμών των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} . Αυτό συμβαίνει διότι η οριζόντια γραμμή που μελετάται διέρχεται από το κέντρο της επιφάνειας του δείγματος, στο οποίο και παρατηρείται η δημιουργία της ρωγμής. Σε αυτές τις περιοχές οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά x είναι μεγαλύτερες απ' ό,τι στο αριστερό και δεξί μέρος της επιφάνειας του δοκιμίου.

5.9.4. Τα Διαγράμματα των Ανηγμένων Παραμορφώσεων e_{yy}

Σε αυτήν την υποενότητα, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα διαγράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της επιφάνειας του δείγματος μαρμάρου που εξετάζεται, τα οποία προκύπτουν κατά μήκος μίας κάθετης και μίας οριζόντιας γραμμής που ορίζουμε. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} που προκύπτουν από την κάθετη γραμμή που εξετάζεται:

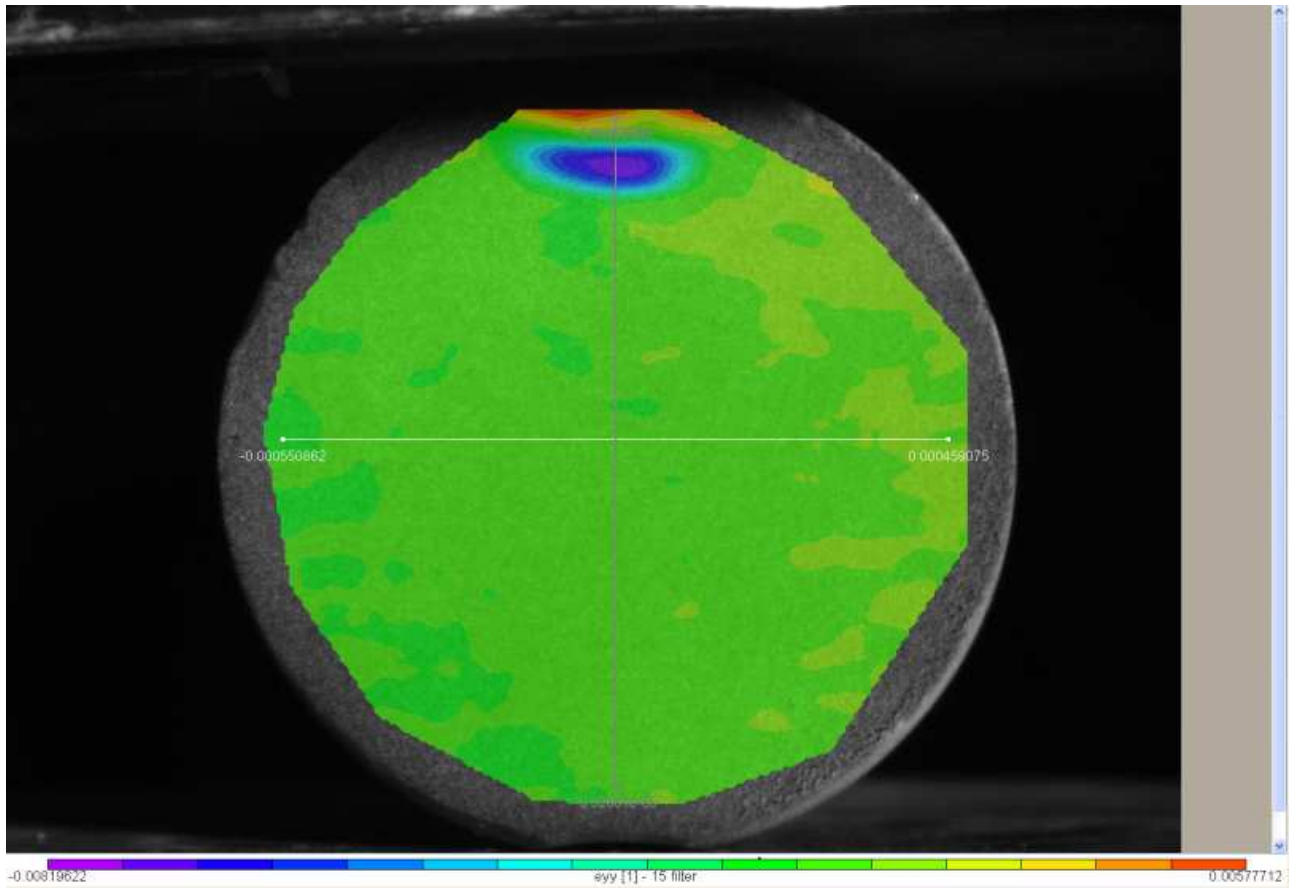


Εικόνα 5-93: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 9.

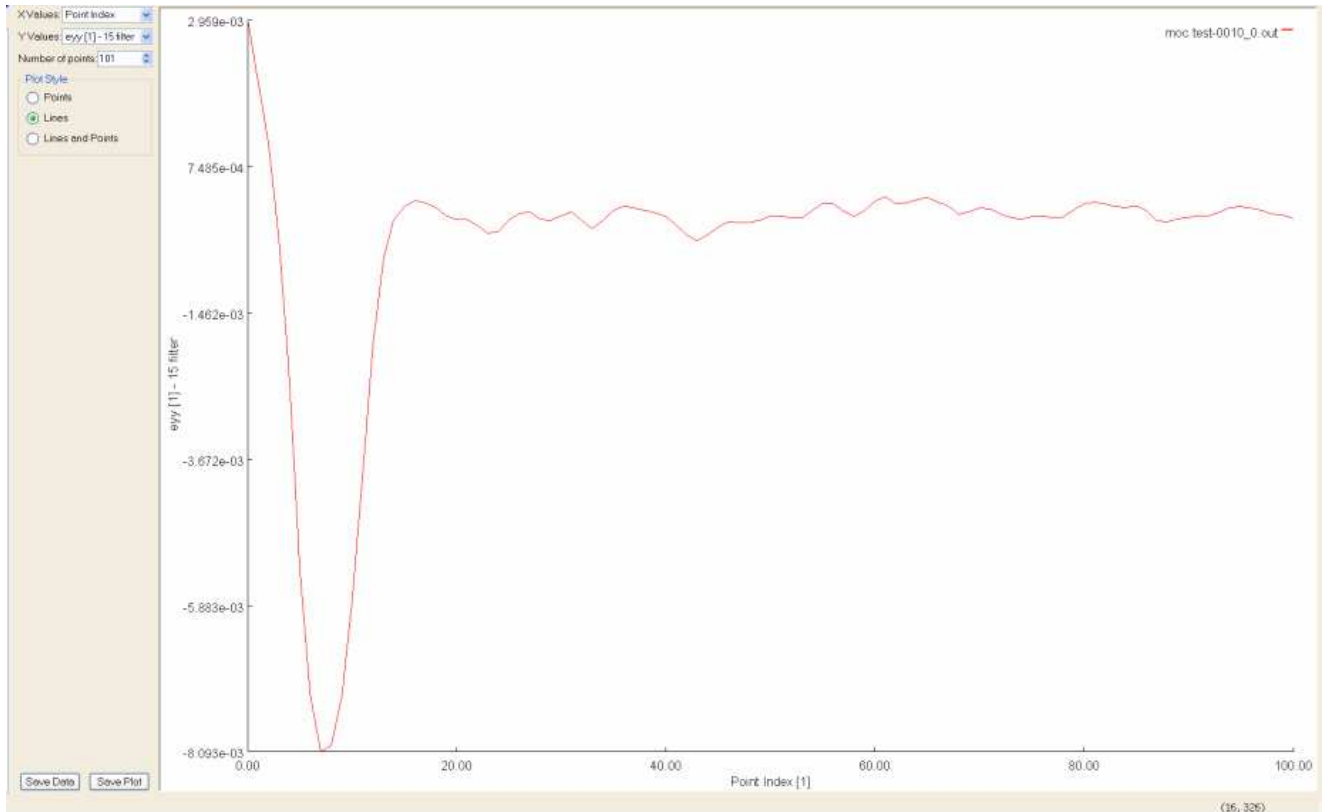


Διάγραμμα 5-13: Το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Παρατηρείται ότι στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 9, οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά y κατά μήκος της κάθετης γραμμής που εξετάζεται, ξεκινούν από μία πολύ υψηλή τιμή και αμέσως μετά ελαττώνονται απότομα αγγίζοντας την πιο χαμηλή. Στη συνέχεια, αυξάνονται και πάλι απότομα, δεν αγγίζουν όμως τόσο υψηλά επίπεδα και κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα. Αν εξαιρεθεί ο θόρυβος που παρατηρείται, μετά την απότομη αύξηση των τιμών, μπορεί να υποθεθεί ότι το διάγραμμα ακολουθεί τη μορφή μίας οριζόντιας ευθείας.



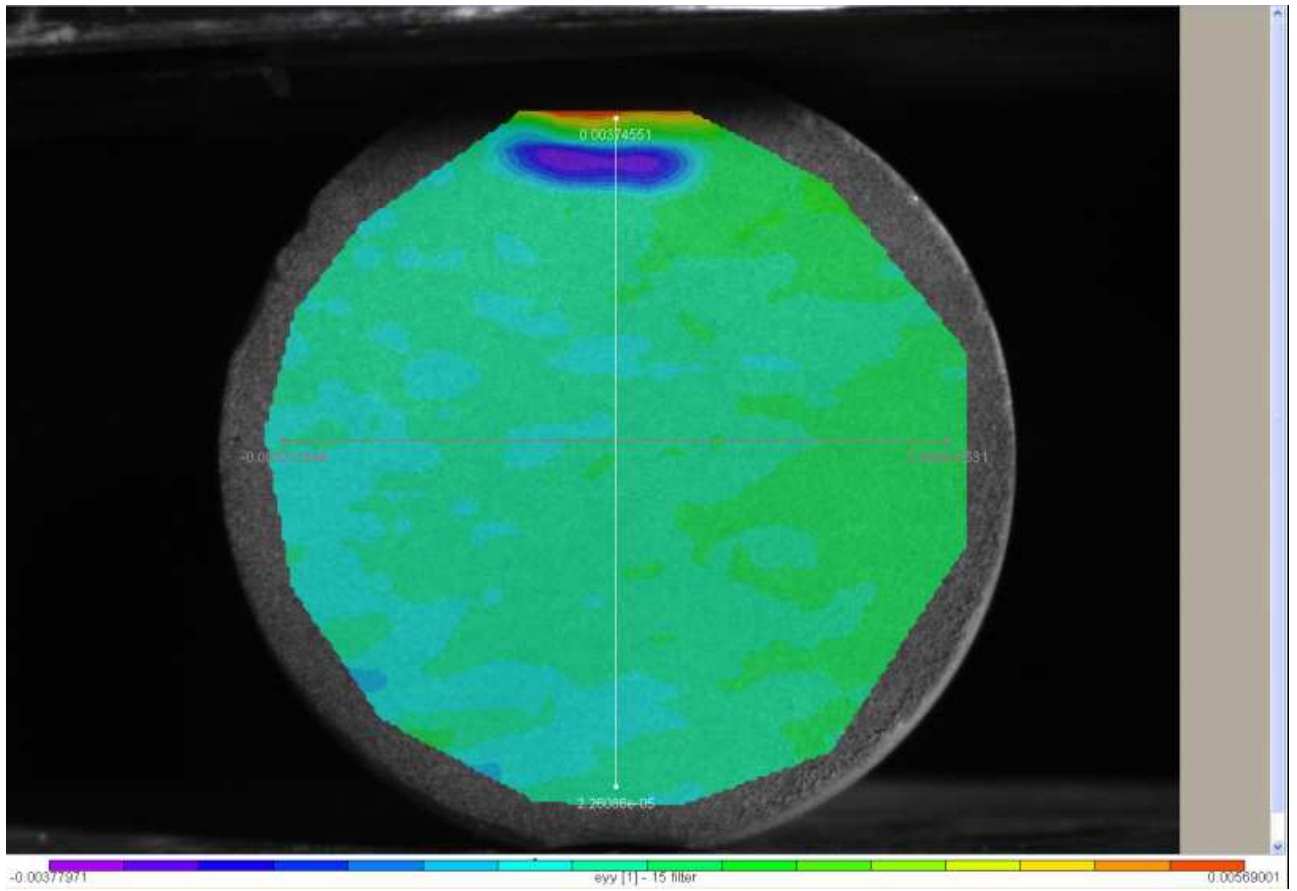
Εικόνα 5-94: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 10.



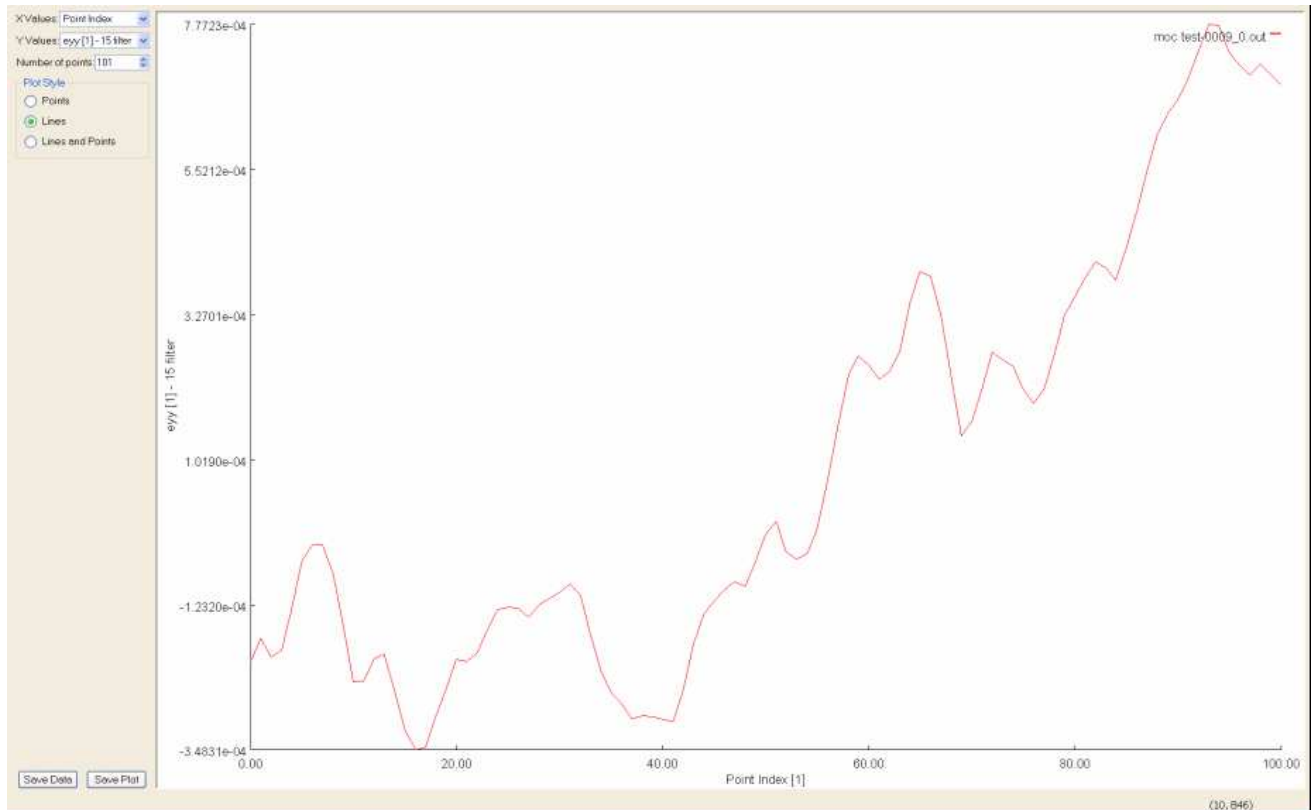
Διάγραμμα 5-14: Το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 10, οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{yy} κατά μήκος της κάθετης γραμμής που εξετάζεται, ξεκινούν από μία πολύ υψηλή τιμή και αμέσως μετά ελαττώνονται απότομα αγγίζοντας την πιο χαμηλή, όπως ακριβώς και στο διάγραμμα της προηγούμενης παραμορφωμένης εικόνας. Στη συνέχεια, αυξάνονται και πάλι απότομα, δεν αγγίζουν όμως τόσο υψηλά επίπεδα, αλλά υψηλότερα από των προηγούμενων εικόνων. Αν εξαιρεθεί ο πολύ μικρός θόρυβος που παρατηρείται, μετά την απότομη αύξηση των τιμών, μπορεί να υποθέσει κανείς ότι το διάγραμμα ακολουθεί τη μορφή μίας οριζόντιας ευθείας.

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{yy} που προκύπτουν από την οριζόντια γραμμή που εξετάζεται:

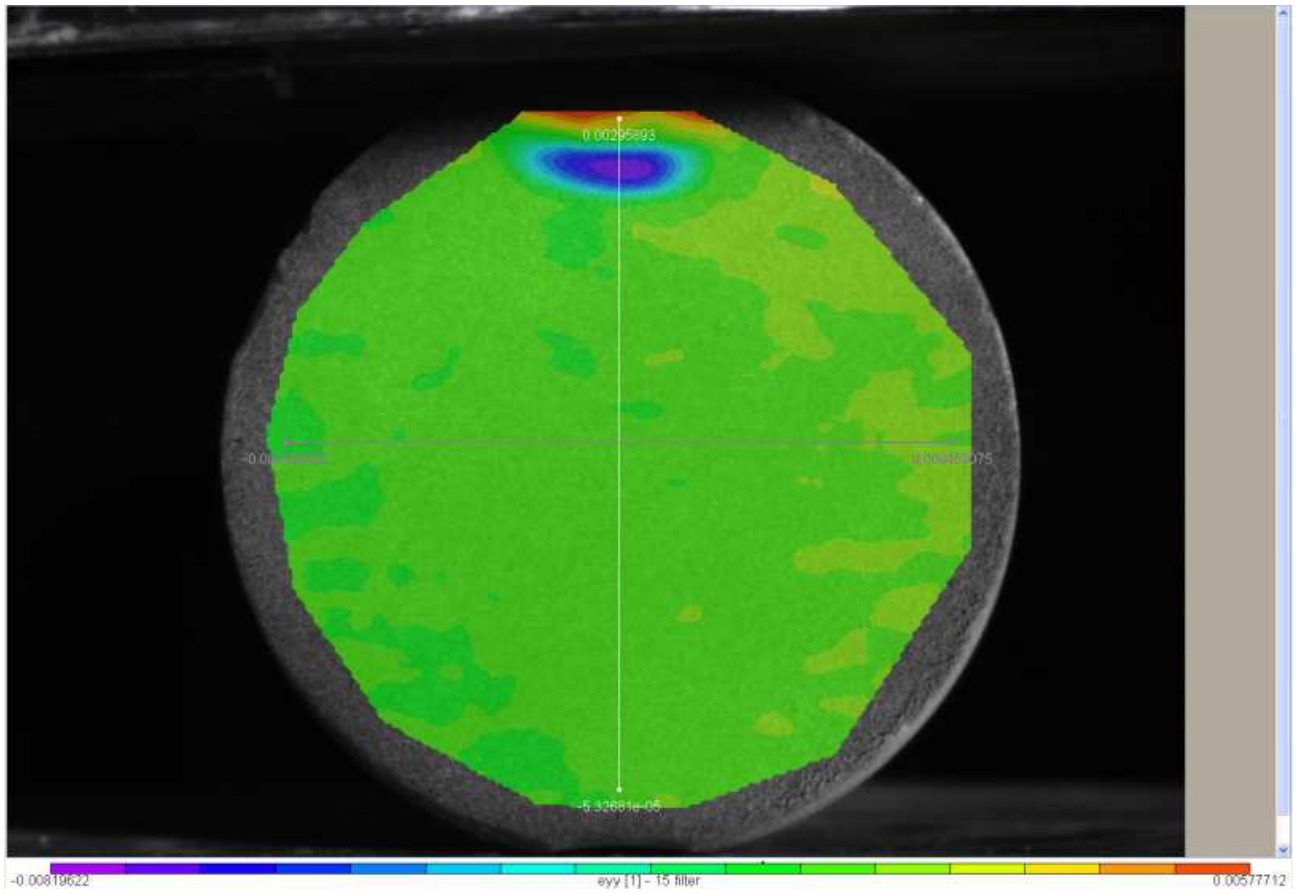


Εικόνα 5-95: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 9.

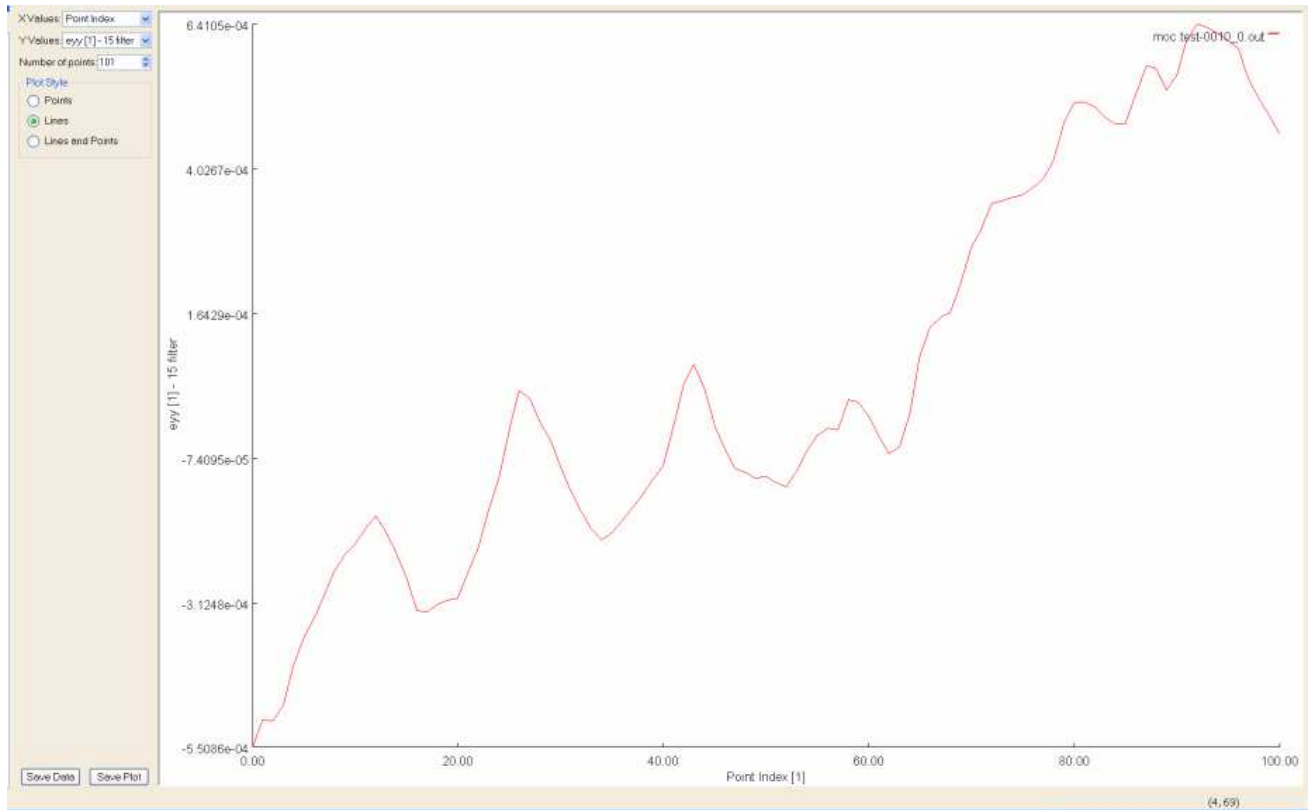


Διάγραμμα 5-15: Το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

Στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 9, οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{yy} κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής που έχει οριστεί, αυξάνονται ολοένα και περισσότερο.



Εικόνα 5-96: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 10.

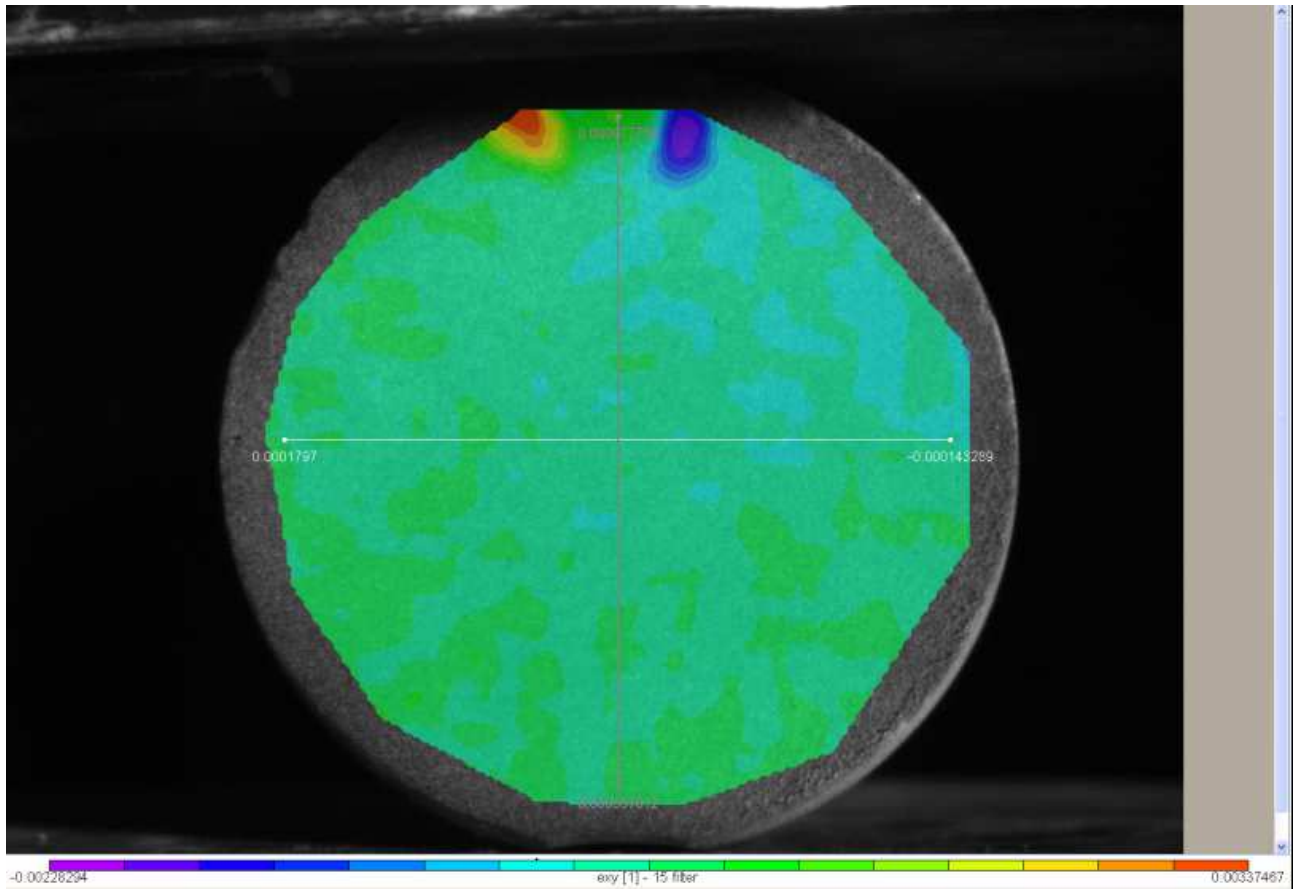


Διάγραμμα 5-16: Το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

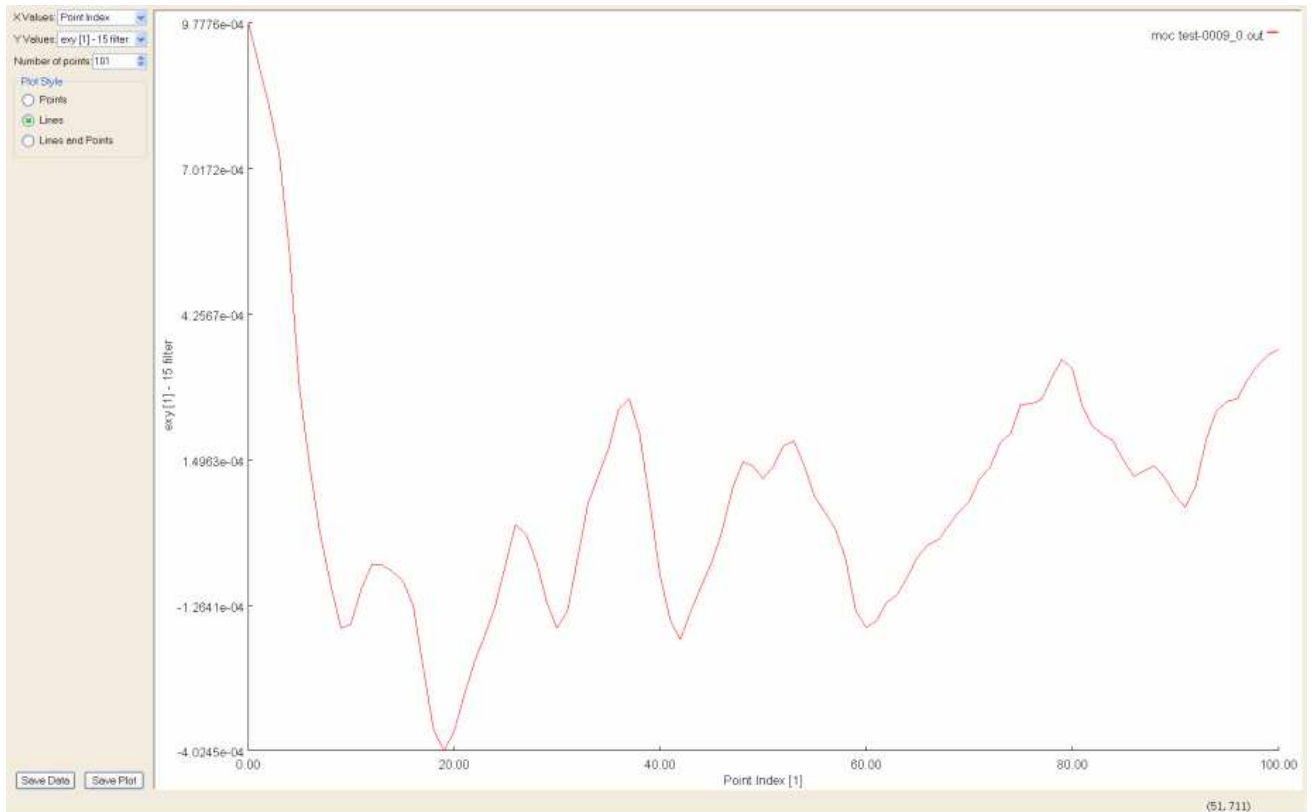
Στο διάγραμμα της παραμορφωμένης εικόνας 10, οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής που έχει οριστεί, έχουν ανοδική πορεία.

5.9.5. Τα Διαγράμματα των Διατμητικών Παραμορφώσεων e_{xy}

Σε αυτήν την υποενότητα θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα διαγράμματα των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της επιφάνειας του δείγματος μαρμάρου που εξετάζεται, τα οποία προκύπτουν κατά μήκος μίας κάθετης και μίας οριζόντιας γραμμής που ορίζουμε. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} που προκύπτουν από την κάθετη γραμμή που εξετάζεται:

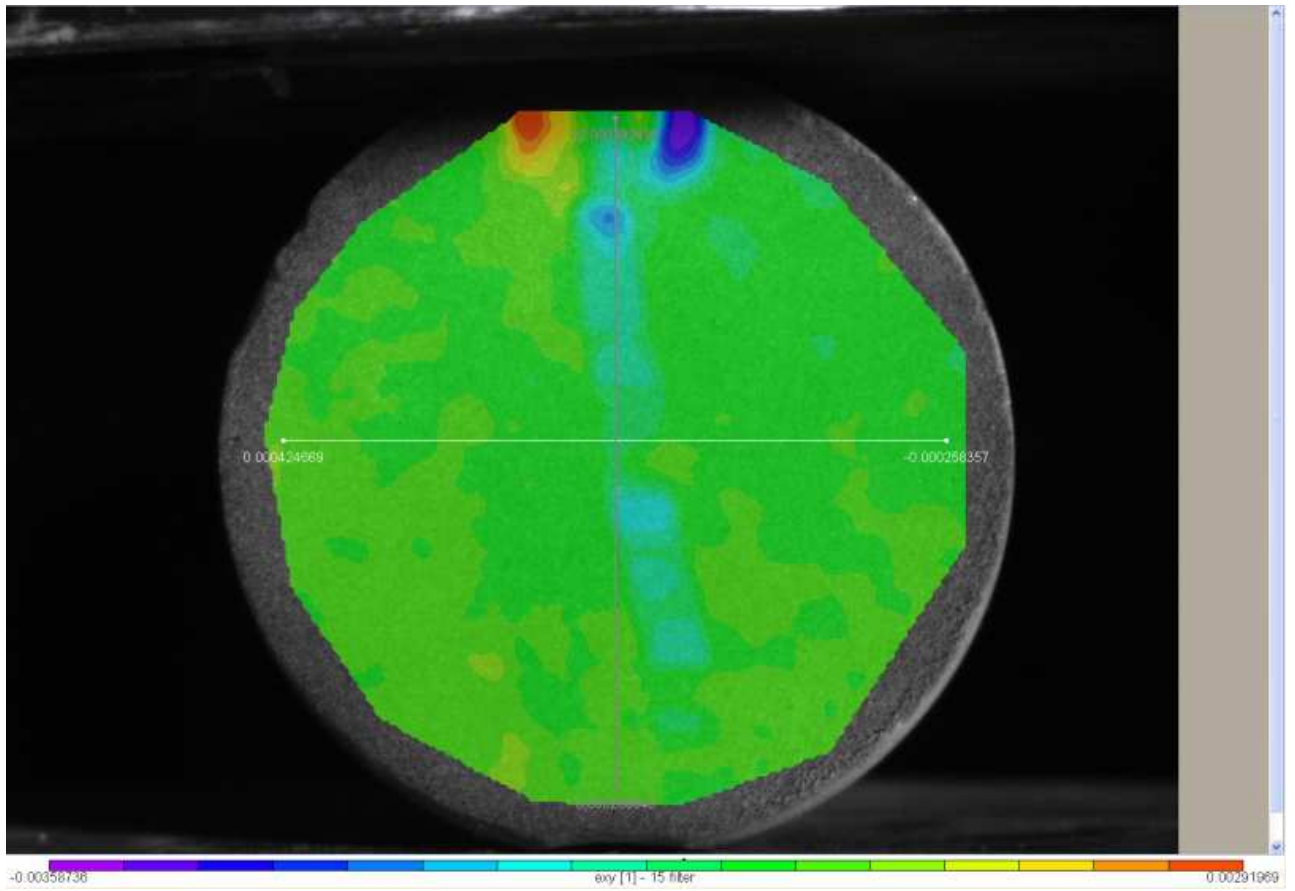


Εικόνα 5-97: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι διαμητικές παραμορφώσεις ϵ_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 9.

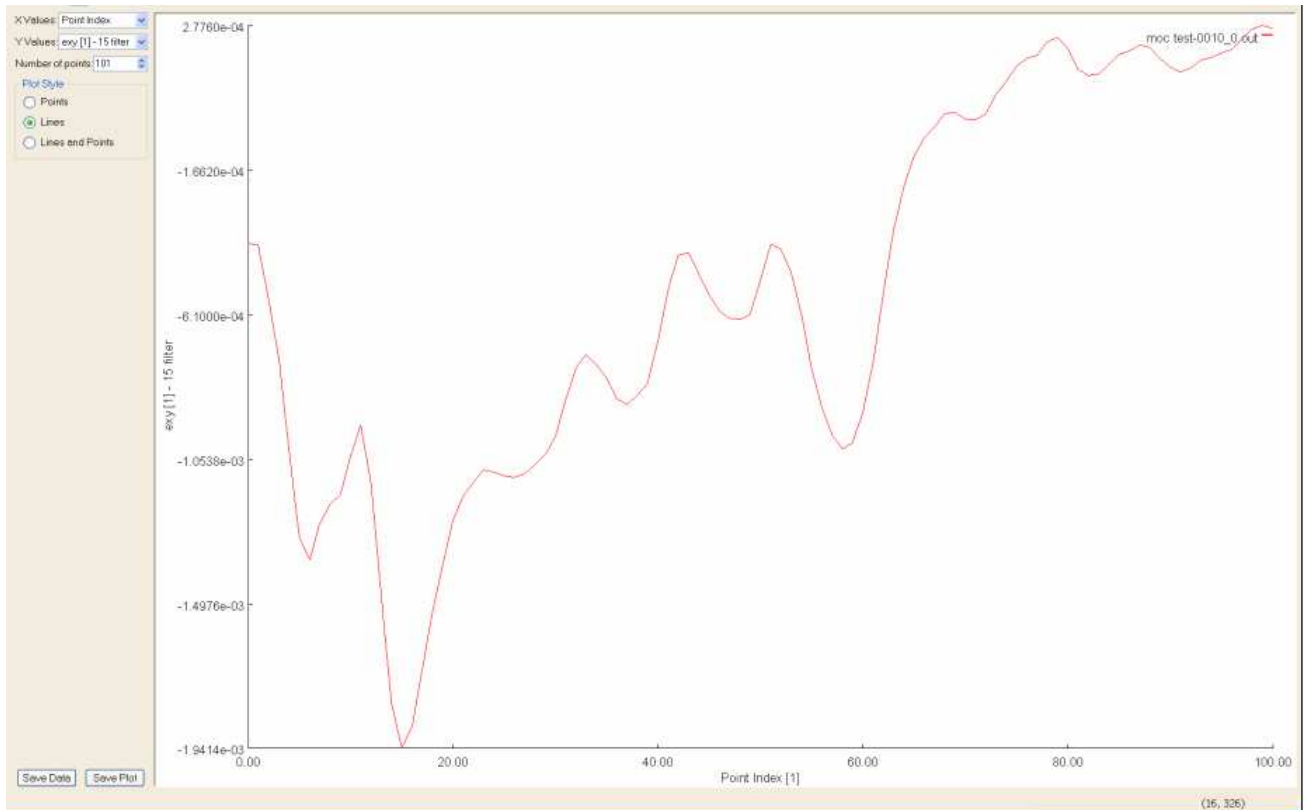


Διάγραμμα 5-17: Το διάγραμμα των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Το διάγραμμα των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 9 για την κάθετη γραμμή που έχει οριστεί, ξεκινά από μία υψηλή τιμή. Στη συνέχεια, οι τιμές μειώνονται απότομα και μετά ακολουθούν μία ακαθόριστη πορεία, αλλά κυμαίνονται περίπου σε παρόμοια επίπεδα (αν ληφθεί υπόψη και ο θόρυβος που παρατηρείται).



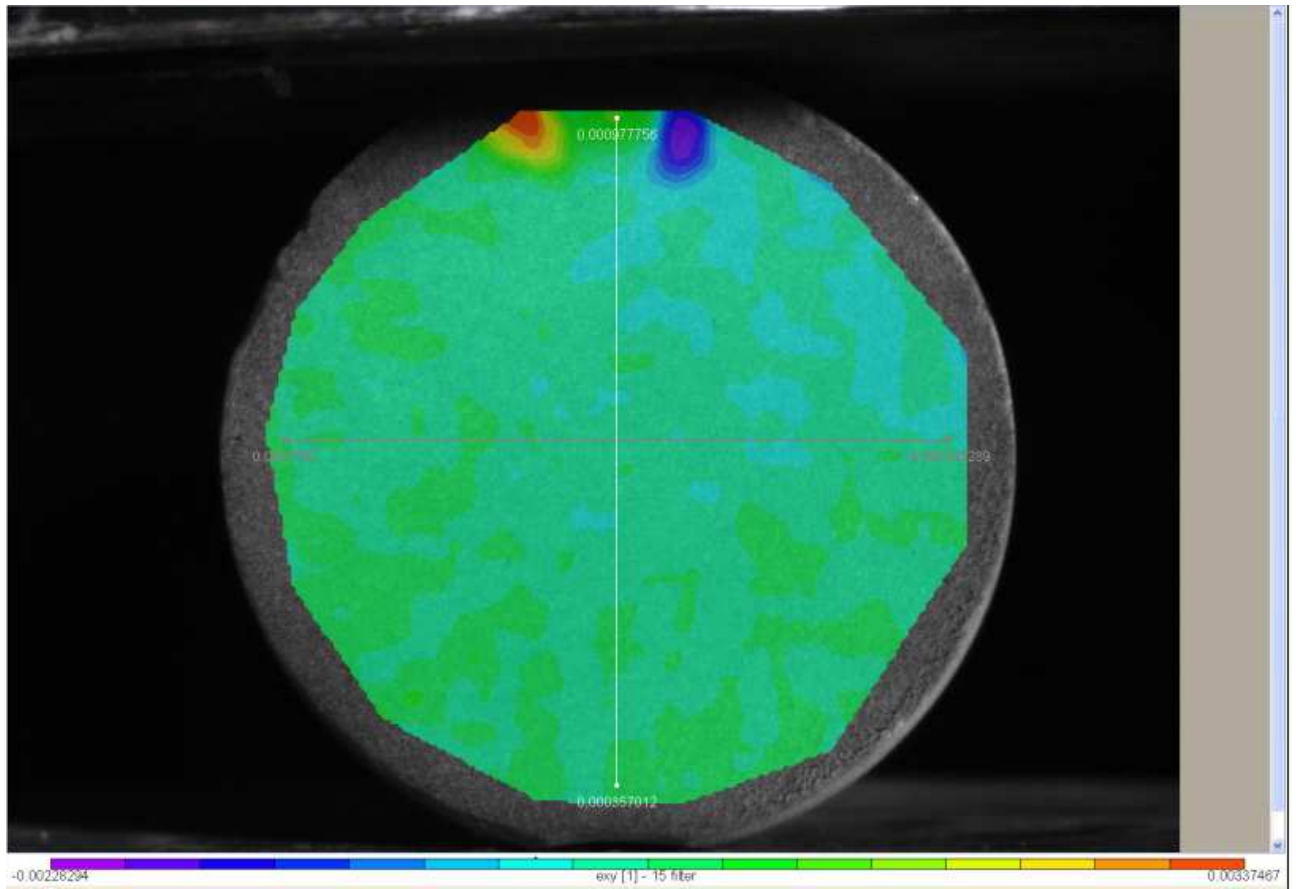
Εικόνα 5-98: Η κάθετη γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι διαμητικές παραμορφώσεις e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 10.



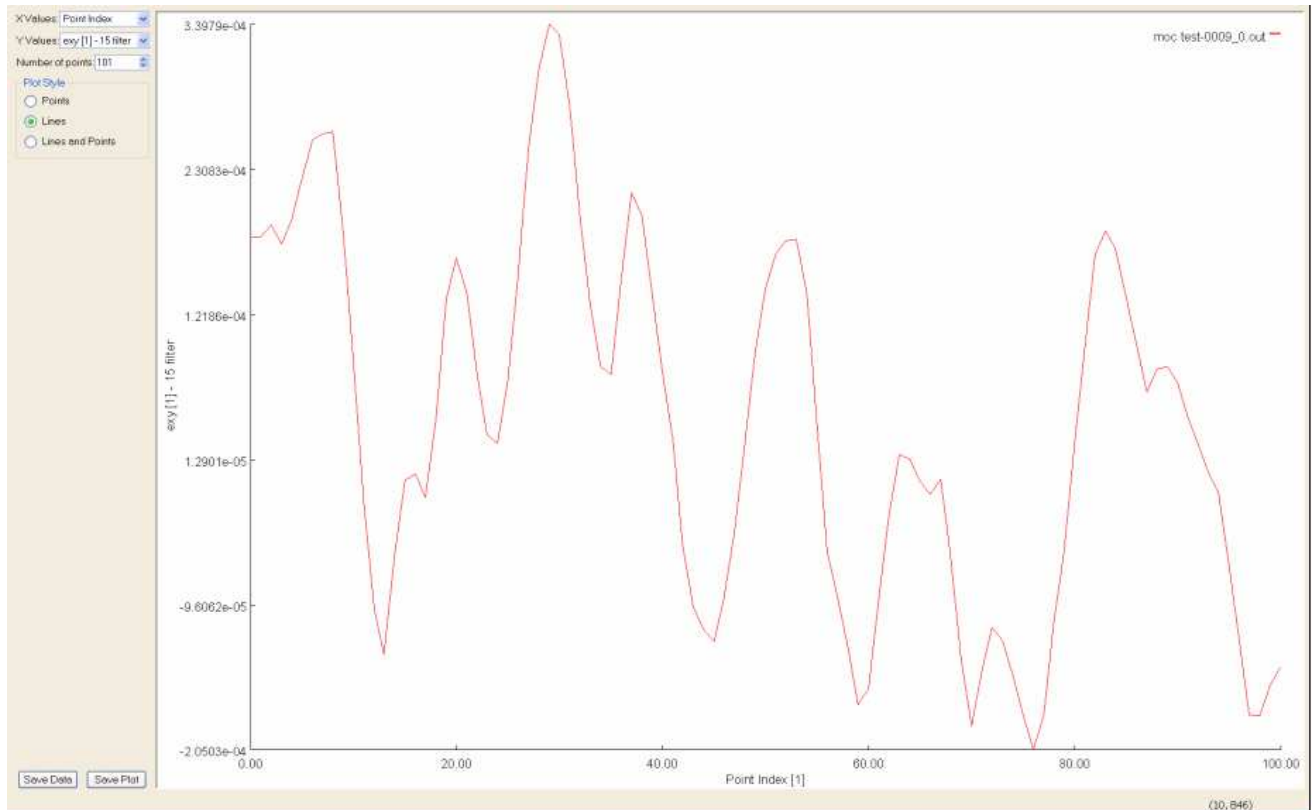
Διάγραμμα 5-18: Το διάγραμμα των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της κάθετης γραμμής.

Το διάγραμμα των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 10 για την κάθετη γραμμή που έχει οριστεί, ξεκινά από μία σχετικά υψηλή τιμή. Στη συνέχεια, οι τιμές μειώνονται απότομα και μετά ακολουθούν μία ακαθόριστη πορεία, αλλά ανοδική πορεία.

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} που προκύπτουν από την οριζόντια γραμμή που εξετάζεται:

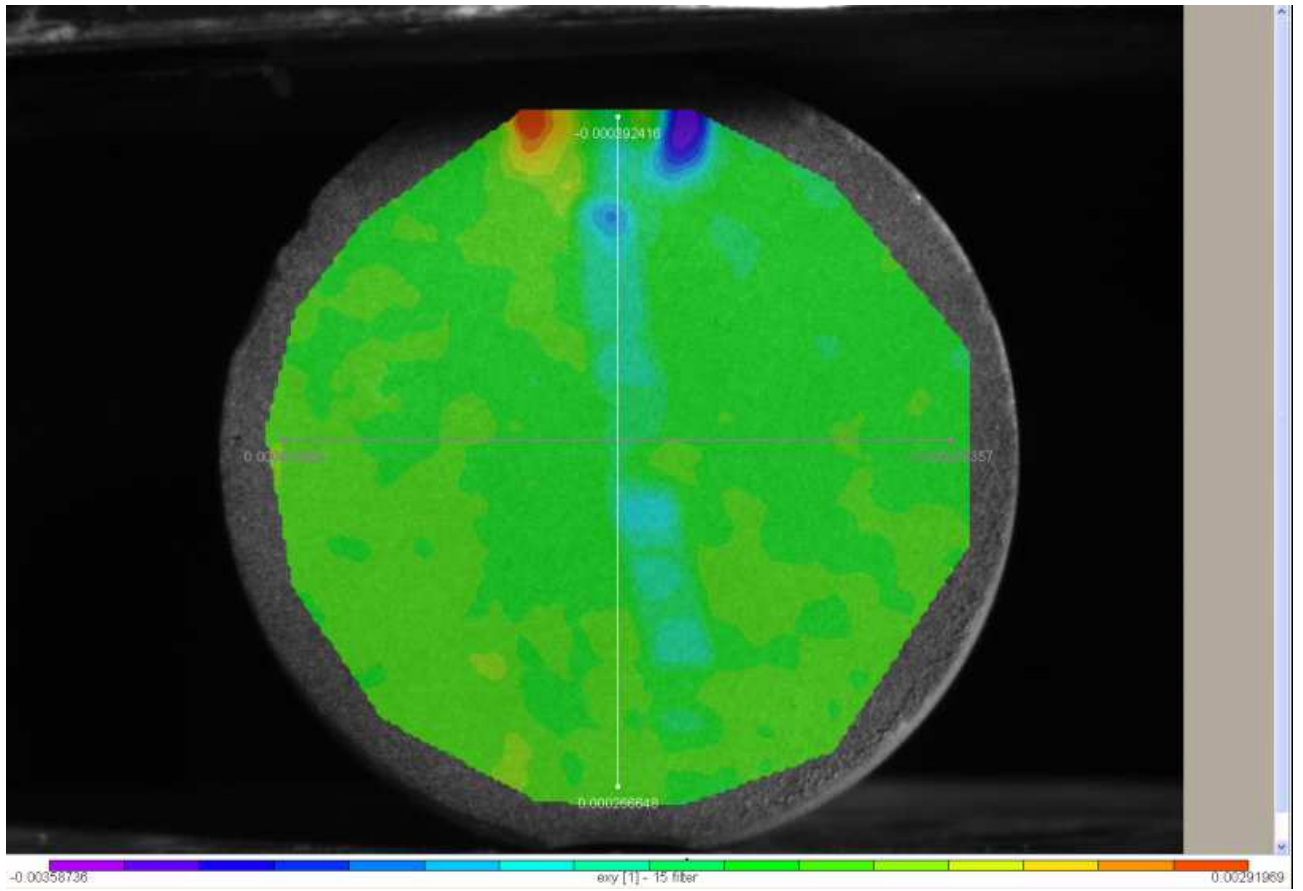


Εικόνα 5-99: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 9.

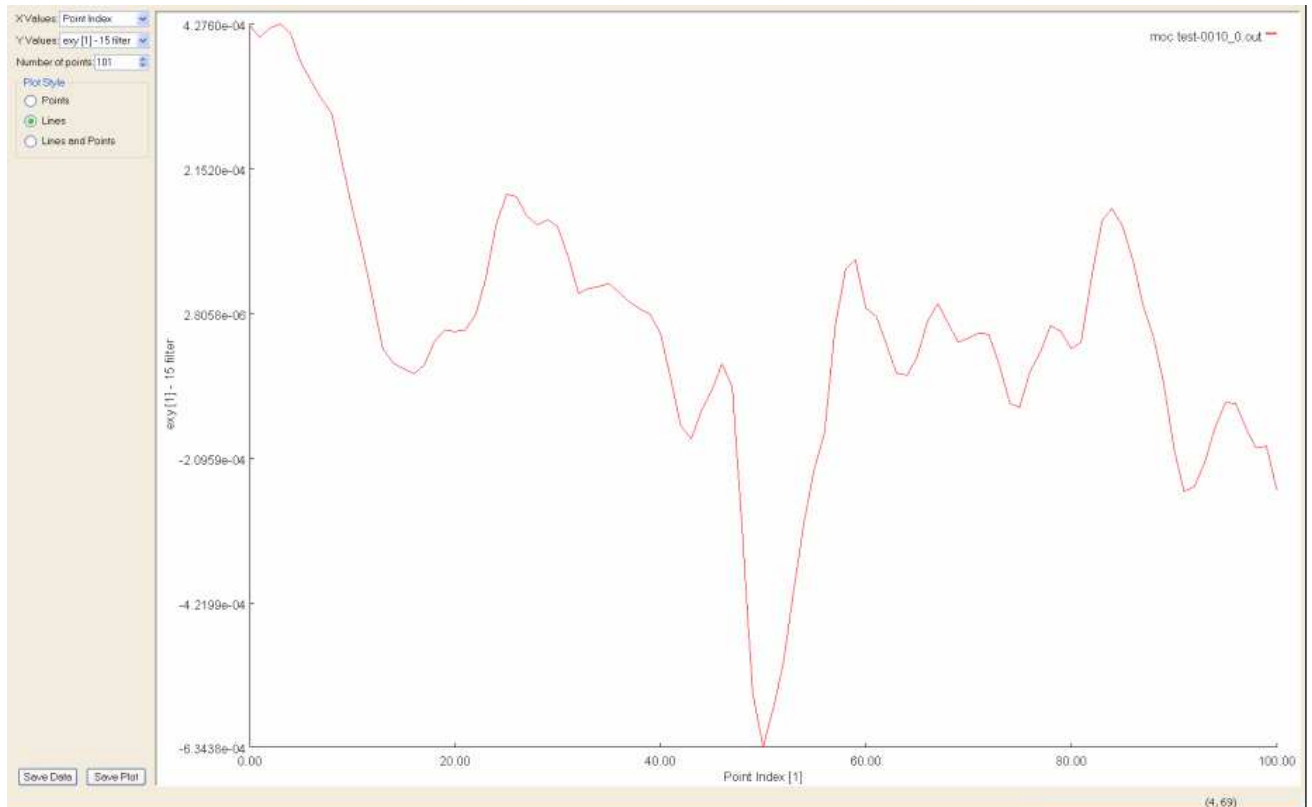


Διάγραμμα 5-19: Το διάγραμμα των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 9 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

Τα διαγράμματα των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 9 για την οριζόντια γραμμή που έχει οριστεί, ξεκινά από μία σχετικά υψηλή τιμή και στη συνέχεια, ο θόρυβος είναι τόσο μεγάλος που η μορφή του διαγράμματος αποκτά μία εντελώς ακαθόριστη μορφή.



Εικόνα 5-100: Η οριζόντια γραμμή κατά μήκος της οποίας εξετάζονται οι διαμητικές παραμορφώσεις e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 10.

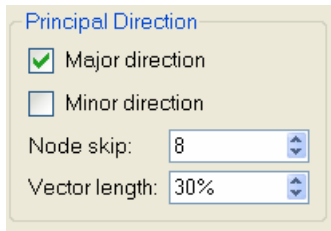


Διάγραμμα 5-20: Το διάγραμμα των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 10 κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής.

Το διάγραμμα των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} της παραμορφωμένης εικόνας 10 για την οριζόντια γραμμή που έχει οριστεί, ξεκινά από την υψηλότερη τιμή της κλίμακας. Ύστερα, παρατηρείται μία καθοδική πορεία παράλληλα με αρκετό θόρυβο, μία πολύ απότομη μείωση των τιμών στο 50^ο σημείο περίπου και αμέσως μετά μία πολύ απότομη αύξηση.

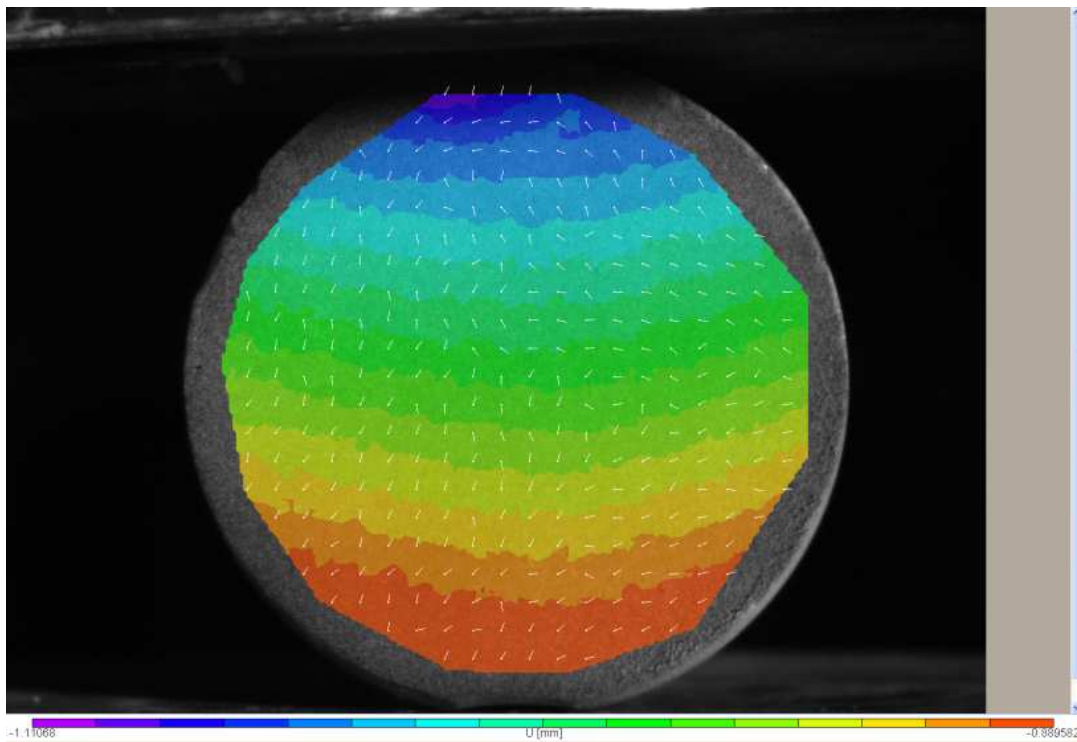
5.10. Τα Βέλη των Τάσεων

Το πρόγραμμα *Vic-2D* παρέχει τη δυνατότητα να εμφανίζονται πάνω στα σχέδια των ισοχρωματικών καμπύλων, τα βέλη των ανηγμένων παραμορφώσεων, οι οποίες θεωρείται ότι συμπίπτουν με τις κύριες τάσεις, μέγιστες και ελάχιστες. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή *principal direction* που υπάρχει στο μενού του προγράμματος. Με αυτήν την επιλογή, μπορούν να εμφανιστούν οι διευθύνσεις των μέγιστων τάσεων (*major direction*), οι διευθύνσεις των ελάχιστων τάσεων (*minor direction*) ή και όλα μαζί (*major* και *minor direction*). Η εντολή *node skip* επιτρέπει την πύκνωση ή την αραιώση των βελών σε όλη την επιφάνεια της εικόνας, ενώ η εντολή *vector length* ρυθμίζει το μήκος των βελών. Στην πιο κάτω εικόνα εμφανίζονται οι παραπάνω εντολές:

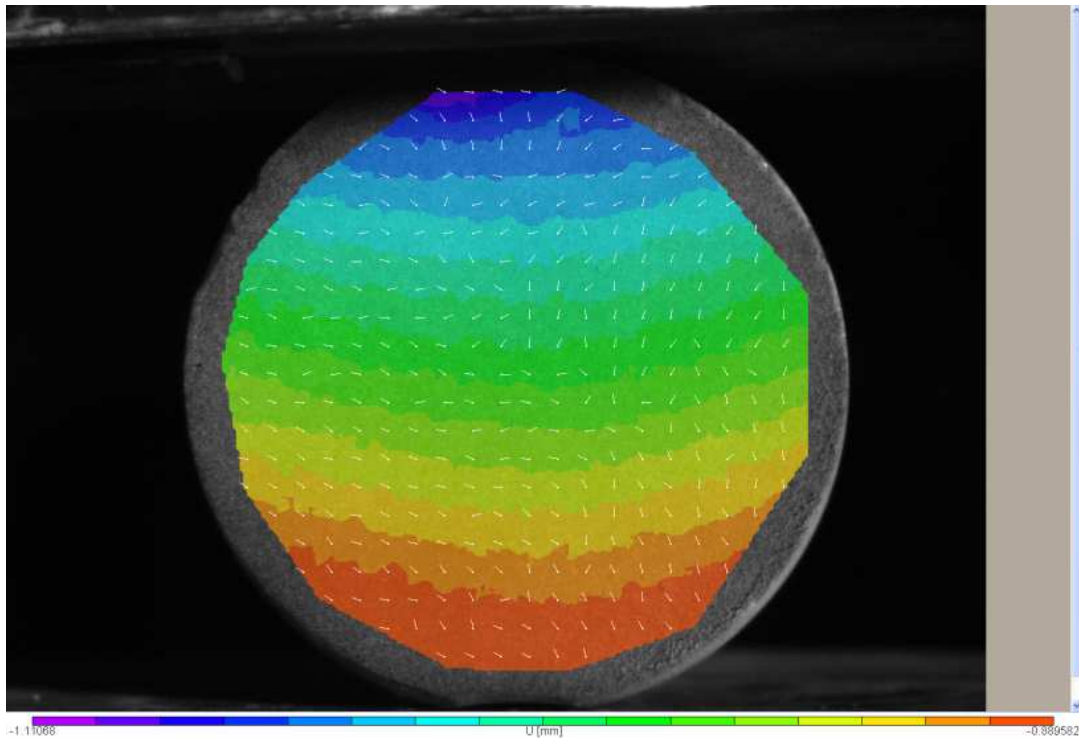


Εικόνα 5-101: Οι εντολές που επιτρέπουν την εμφάνιση των βελών των τάσεων.

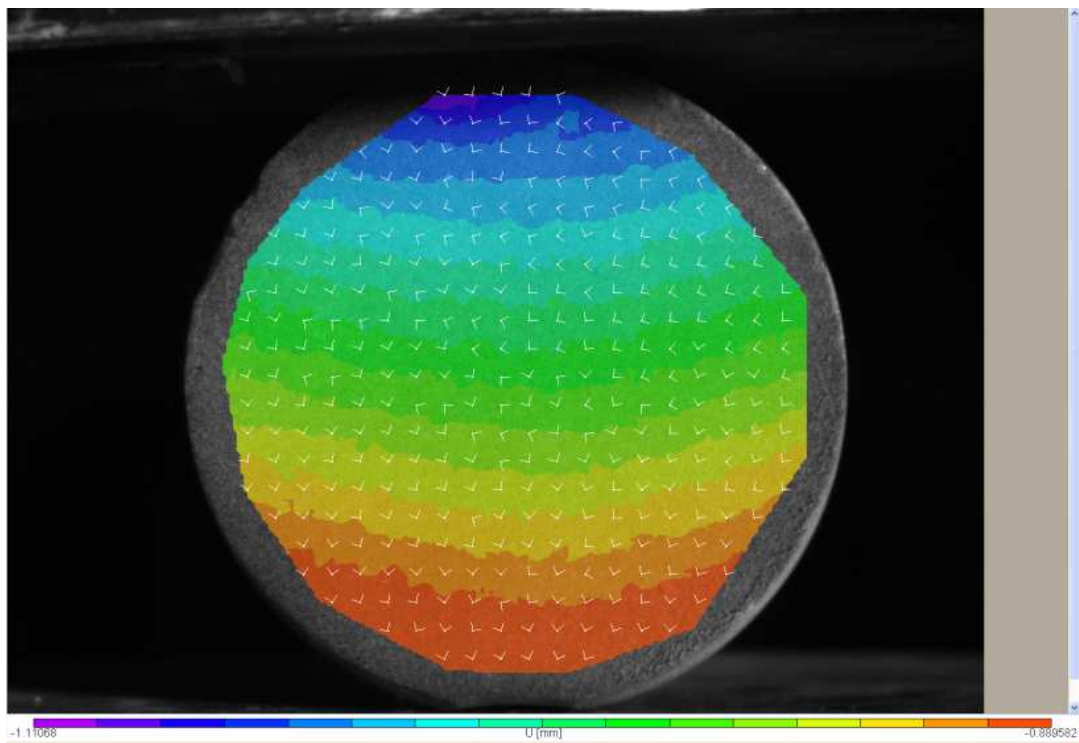
Στην προκειμένη περίπτωση, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις των τάσεων στις παραμορφωμένες εικόνες 9 και 10, δηλαδή στις εικόνες λίγο πριν και κατά τη στιγμή της θραύσης. Παρακάτω εμφανίζονται οι αντίστοιχες εικόνες:



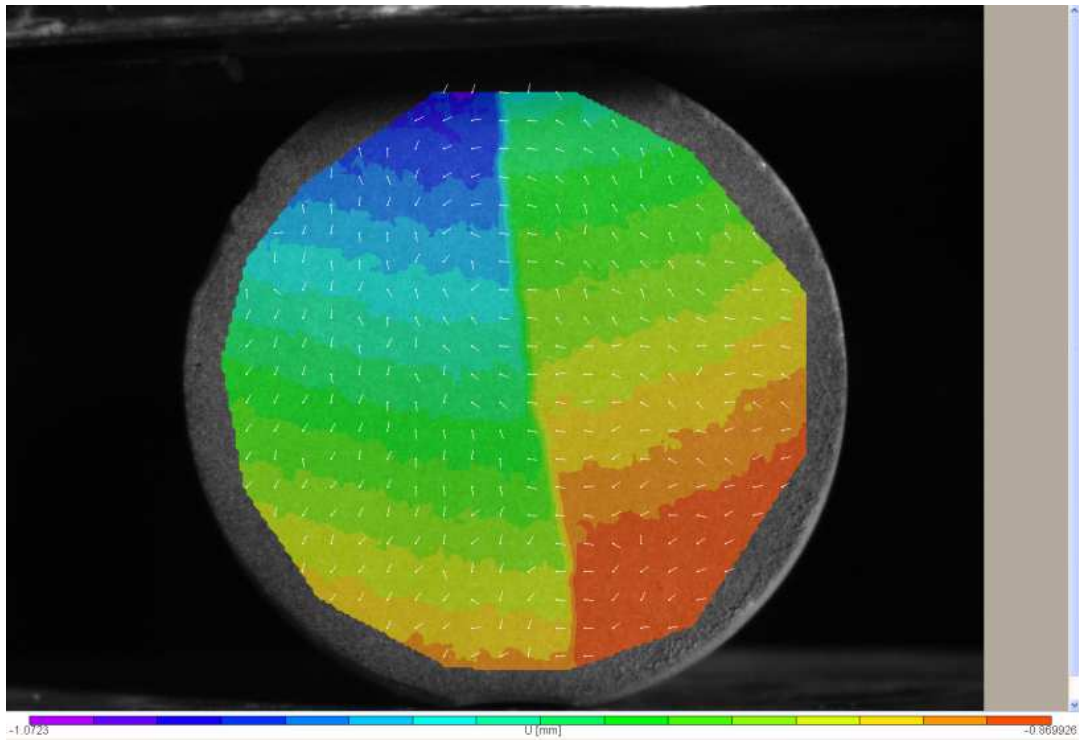
Εικόνα 5-102: Τα βέλη των μέγιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 9.



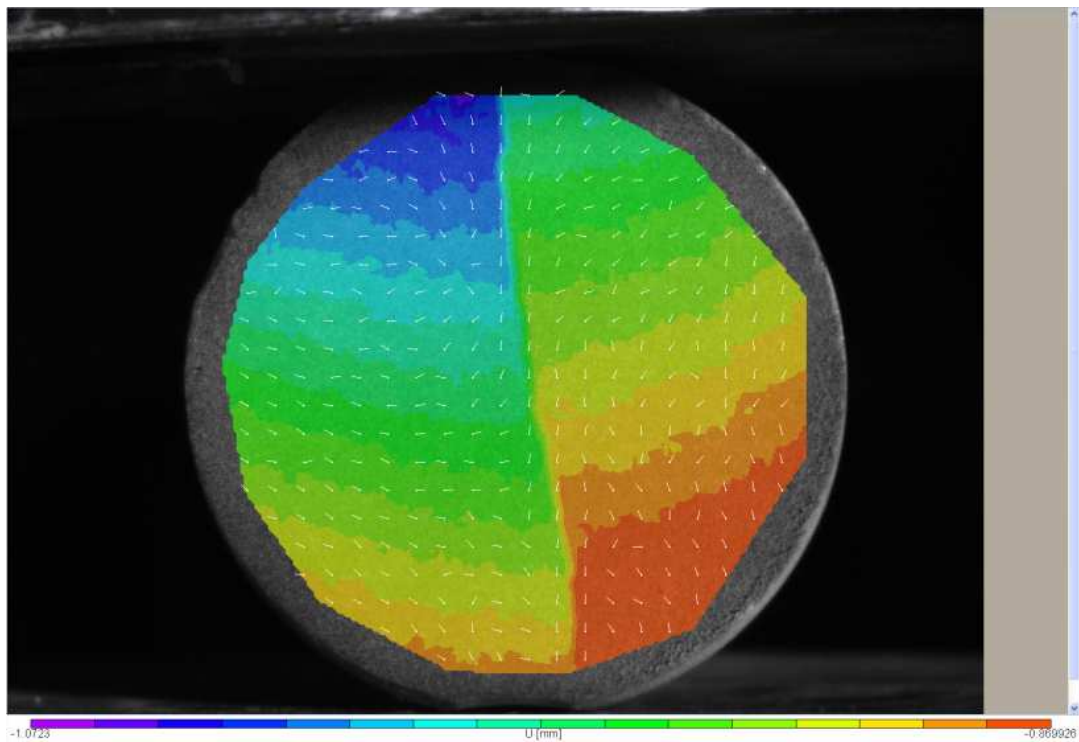
Εικόνα 5-103: Τα βέλη των ελάχιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 9.



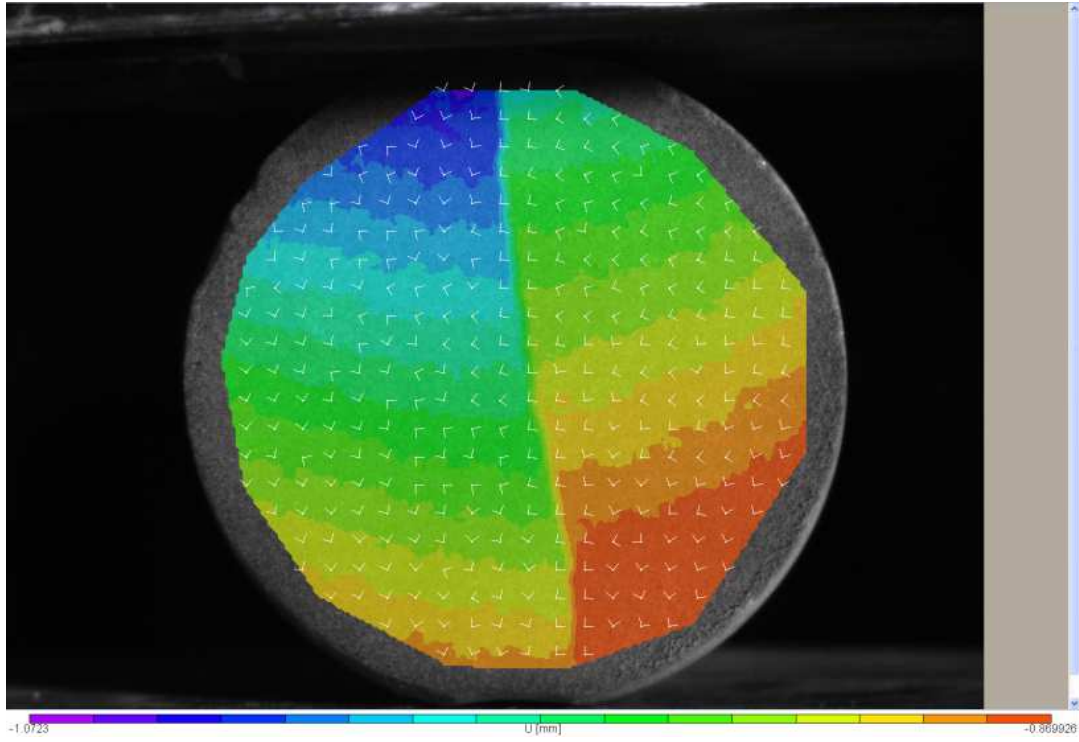
Εικόνα 5-104: Τα βέλη των μέγιστων και των ελάχιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 9.



Εικόνα 5-105: Τα βέλη των μέγιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 10.



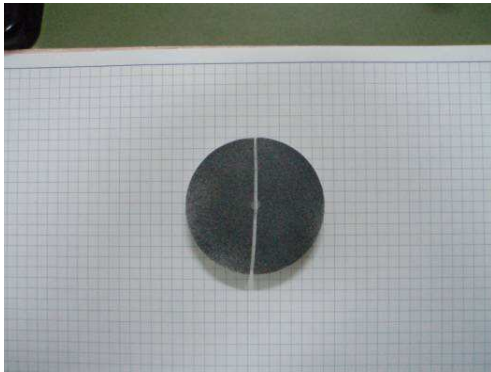
Εικόνα 5-106: Τα βέλη των ελάχιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 10.



Εικόνα 5-107: Τα βέλη μέγιστων και ελάχιστων τάσεων της παραμορφωμένης εικόνας 10.

6. Πείραμα Θλίψης Κυκλικού Δίσκου με Κεντρική Οπή από *plexiglass*

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πείραμα θλίψης κυκλικού δίσκου με κεντρική οπή, κατασκευασμένου από *plexiglass*. Το δείγμα, με το οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα, είναι κυκλικής επιφάνειας διαμέτρου 60 mm και πάχους 10 mm. Στόχος αυτού του πειράματος είναι να εξεταστεί αν το σύστημα *Vic-2D* μπορεί να ανταποκριθεί και να εξάγει σωστά αποτελέσματα με μία πιο σύνθετη γεωμετρία δοκιμίου. Για αυτό το λόγο, στο κέντρο του δείγματος ανοίχτηκε τρύπα διαμέτρου 3 mm, έτσι ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του κατά την παραμόρφωση. Αφού ετοιμάστηκε το σχέδιο στιγμάτων, το δείγμα τοποθετήθηκε στη μικρή μηχανή θλίψης του εργαστηρίου, και με διαδοχική προσθήκη φορτίου πραγματοποιήθηκε το πείραμα μελέτης των παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι στο πείραμα αυτό η εστιακή απόσταση είναι μεταξύ 60-70 mm, ενώ η απόσταση μεταξύ κάμερας-δοκιμίου είναι 70 cm. Παρακάτω ακολουθεί η εικόνα του δείγματος *plexiglass*, με το οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα:



Εικόνα 6-1: Το δείγμα *plexiglass*, με το οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα.

6.1. Θεωρία του Πειράματος Κυκλικού Δίσκου με Κεντρική Οπή

Στη βραζιλιανή δοκιμή παρατηρείται το μειονέκτημα ότι στο δίσκο, όχι μόνο αναπτύσσονται εφελκυστικές, αλλά δημιουργούνται και διατμητικές πιέσεις κοντά στις φορτισμένες πλάκες. Η αστοχία μπορεί να συμβεί όχι μόνο με την ανάπτυξη εφελκυστικής ρωγμής στο κέντρο, αλλά και με το σχηματισμό μικρών κώνων στις επιφάνειες επαφής.

Για να περιοριστούν οι διατμητικές πιέσεις που αναπτύσσονται στον διαμετρικά συμπιεσμένο

δίσκο στη βραζιλιανή δοκιμή, αναπτύχθηκε η μέθοδος του πειράματος «δακτύλιος», όπου ένας δίσκος με μία τρύπα στο κέντρο του υποβάλλεται σε διαμετρική συμπίεση.

Μία κατά προσέγγιση λύση για την κατανομή της πίεσης γύρω από την κυκλική τρύπα σε έναν δίσκο που φορτίζεται διαμετρικά μπορεί να δοθεί, συνδυάζοντας τη λύση για την κατανομή της πίεσης γύρω από μία κυκλική τρύπα του KIRSCH με τη γνωστή λύση ενός στερεού δίσκου με γραμμική φόρτιση. Μία πιο ακριβής λύση, που δόθηκε από τον HOBBS (1964), για την πίεση σ_θ στη διατομή της φορτισμένης διαμέτρου με την τρύπα είναι η εξής:

$$\sigma_\theta = -\frac{F(6 + 38\rho^2)}{\pi\rho_0 t} \quad (\text{σχέση 6.1.})$$

Όπου:

- σ_θ = η συνιστώσα της πίεσης κάθετη στη φορτισμένη διάμετρο στη διατομή της διαμέτρου με την τρύπα
- F = η εφαρμοσμένη δύναμη
- ρ = η αναλογία μεταξύ της εσωτερικής ακτίνας (τρύπα) r_i και της εξωτερικής ακτίνας (δίσκος) r_0 , $\frac{r_i}{r_0}$
- t = το πάχος του δίσκου
- r_0 = η εξωτερική ακτίνα

Επομένως, προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή σ_θ σε ένα δίσκο με μία κεντρική τρύπα είναι τουλάχιστον 6 φορές τόσο μεγάλος όσο και η μέγιστη τιμή σ_θ σε έναν στερεό δίσκο που έχει υποβληθεί στην ίδια διαμετρική φόρτιση. Έτσι, η αναλογία της μέγιστης διατμητικής (στο σημείο της επαφής) και της μέγιστης εφελκυστικής πίεσης σε ένα δίσκο με μία μικρή κεντρική τρύπα είναι περίπου το 1/6 της παρόμοιας αναλογίας στον στερεό δίσκο.

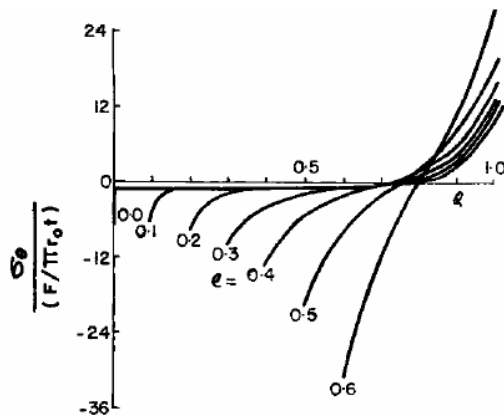
Μία νέα λύση, η οποία χρησιμοποιεί σύνθετες μεταβλητές μεθόδους, δόθηκε από τον JAEGER και τον HOSKINS (1966) για την περίπτωση που το εξωτερικό φορτίο κατανέμεται πάνω από μία πεπερασμένη περιοχή των 15° . Στο σχήμα, δίνονται τα αποτελέσματά τους στην κατανομή της επαπτόμενης πίεσης κατά μήκος της φορτισμένης διαμέτρου για μία ποικιλία τιμών του ρ . Η

κρίσιμη εφελκυστική πίεση στη διάμετρο της φορτισμένης διαμέτρου με την τρύπα, μπορεί να γραφτεί ως ακολούθως:

$$\sigma_{\theta} = K \frac{F}{\pi r_o t} \quad (\text{σχέση 6.2.})$$

Όπου:

- F = η εφαρμοσμένη δύναμη
- K = ένας παράγοντας συγκέντρωσης πίεσης (μία συνάρτηση του ρ)
- r_o = η εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου και
- t = το πάχος του δακτυλίου



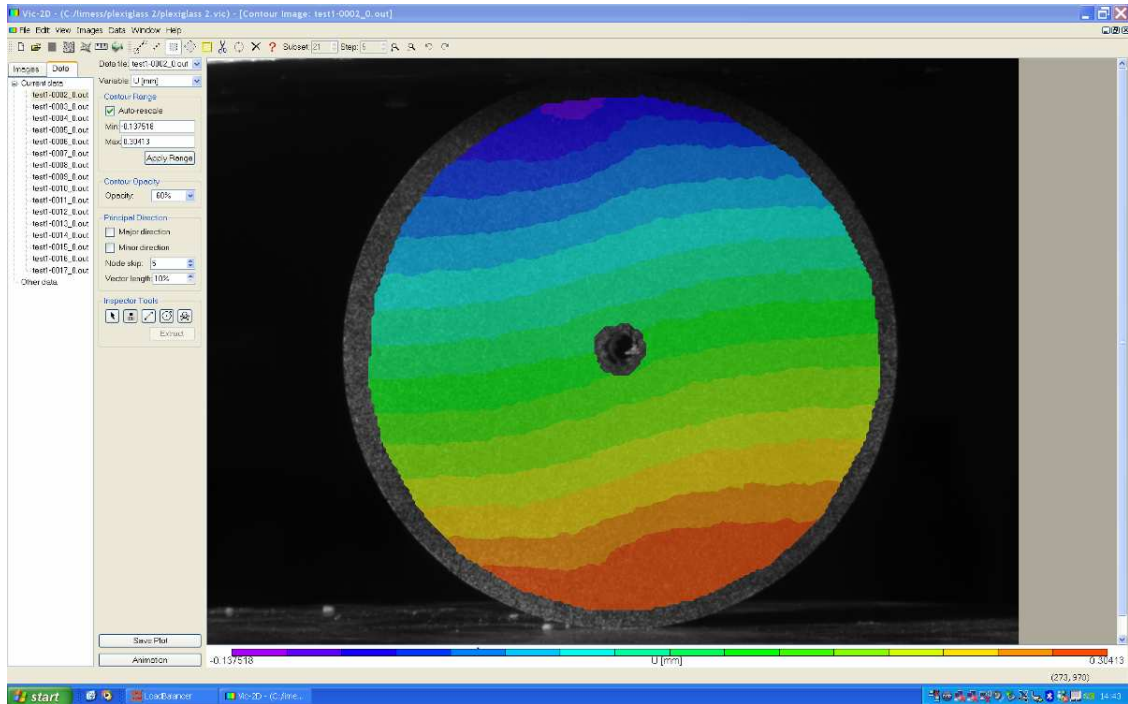
Σχήμα 6-1: Κατανομή της σ_{θ} κατά μήκος της φορτισμένης διαμέτρου για δακτυλίσους για θετική θλίψη (μετά τους JAEGER και HOSKINS, 1966).

6.2. Σχολιασμός Ποιοτικών Αποτελεσμάτων

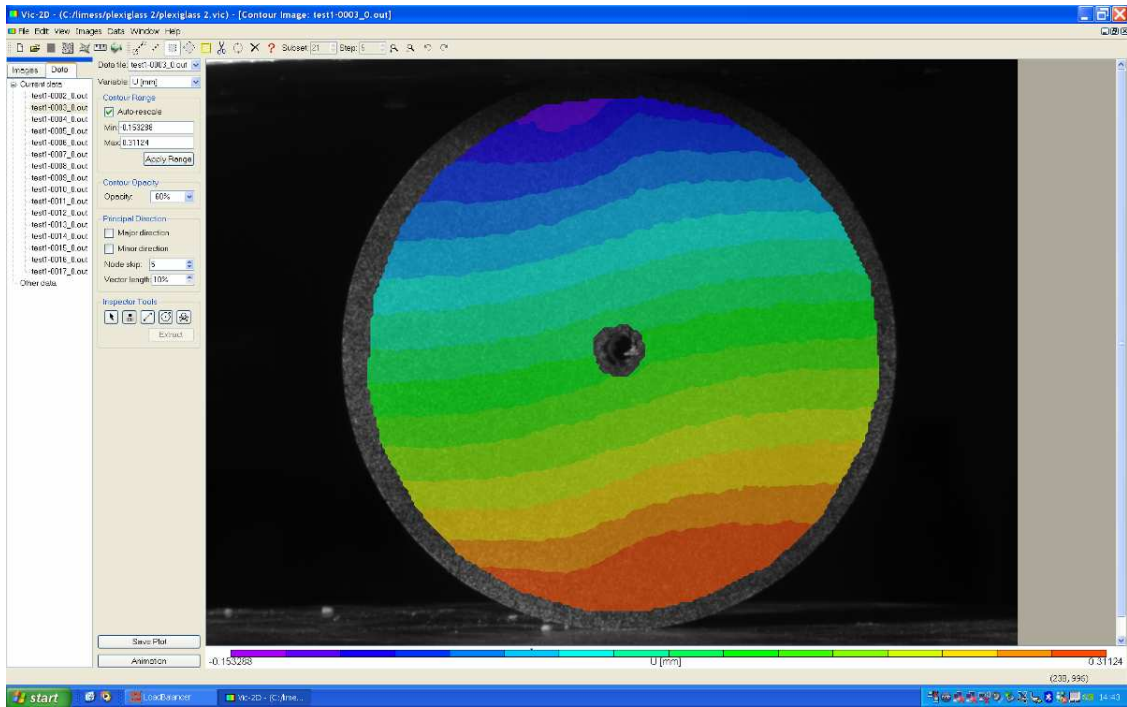
Σε αυτήν την ενότητα, παρατίθενται οι *contour* εικόνες που προέκυψαν από την πραγματοποίηση του παραπάνω πειράματος. Κατά τη διάρκεια του πειράματος αυτού λήφθηκαν συνολικά 16 παραμορφωμένες φωτογραφίες. Αξίζει να μελετηθούν οι 14 από αυτές (δηλαδή από τη 2^η μέχρι και τη 15^η παραμορφωμένη εικόνα), δηλαδή οι φάσεις από την αρχή της παραμόρφωσης μέχρι και πριν τη στιγμή της θραύσης. Σκοπός είναι να μελετηθούν οι μέγιστες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις από την αρχή της παραμόρφωσης μέχρι και λίγο πριν τη στιγμή της θραύσης, έτσι ώστε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα για την αντοχή του δείγματος αυτού.

6.2.1. Το Πεδίο των Οριζόντιων Μετατοπίσεων U

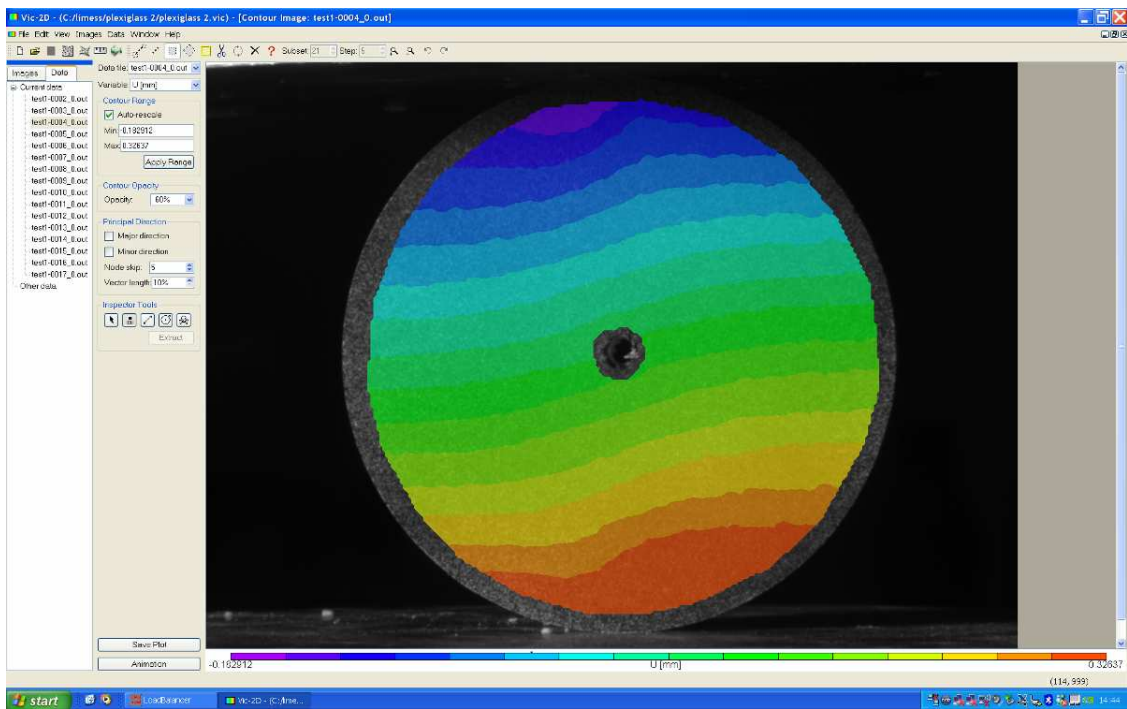
Στη συγκεκριμένη υποενότητα αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις οριζόντιες μετατοπίσεις. Παρακάτω παρατίθενται οι εικόνες που απεικονίζουν το πεδίο των U μετατοπίσεων:



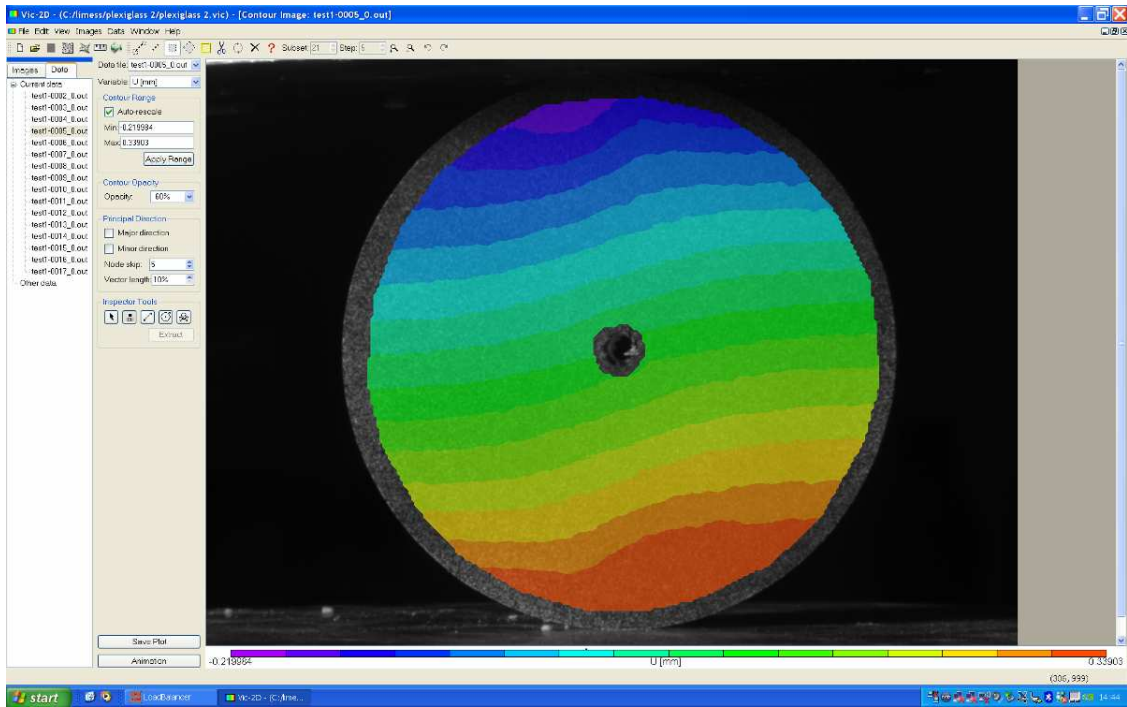
Εικόνα 6-2: Οι μετατοπίσεις U της 2^{75} παραμορφωμένης εικόνας.



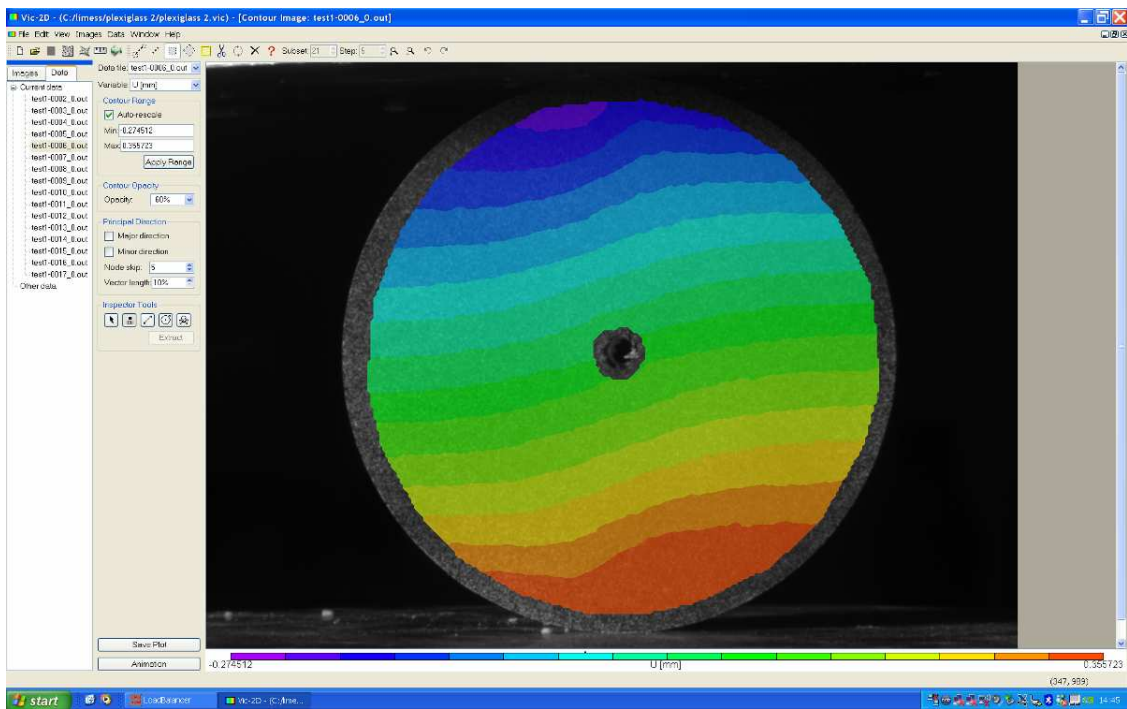
Εικόνα 6-3: Οι μετατοπίσεις U της 3^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



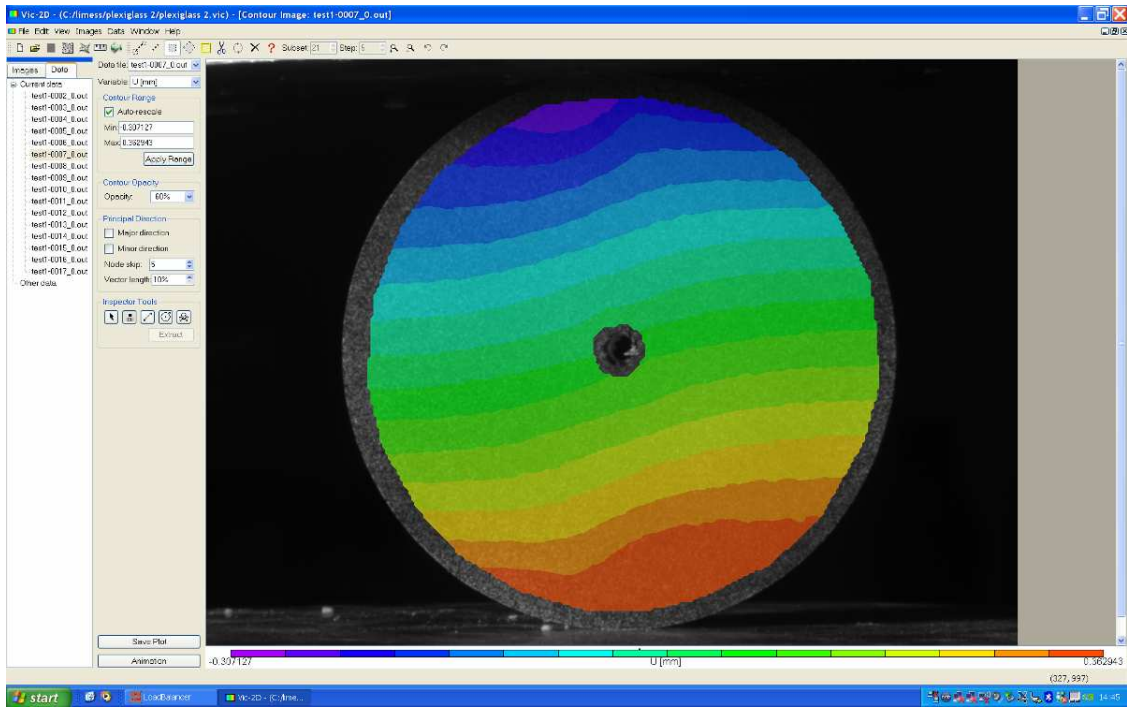
Εικόνα 6-4: Οι μετατοπίσεις της 4^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



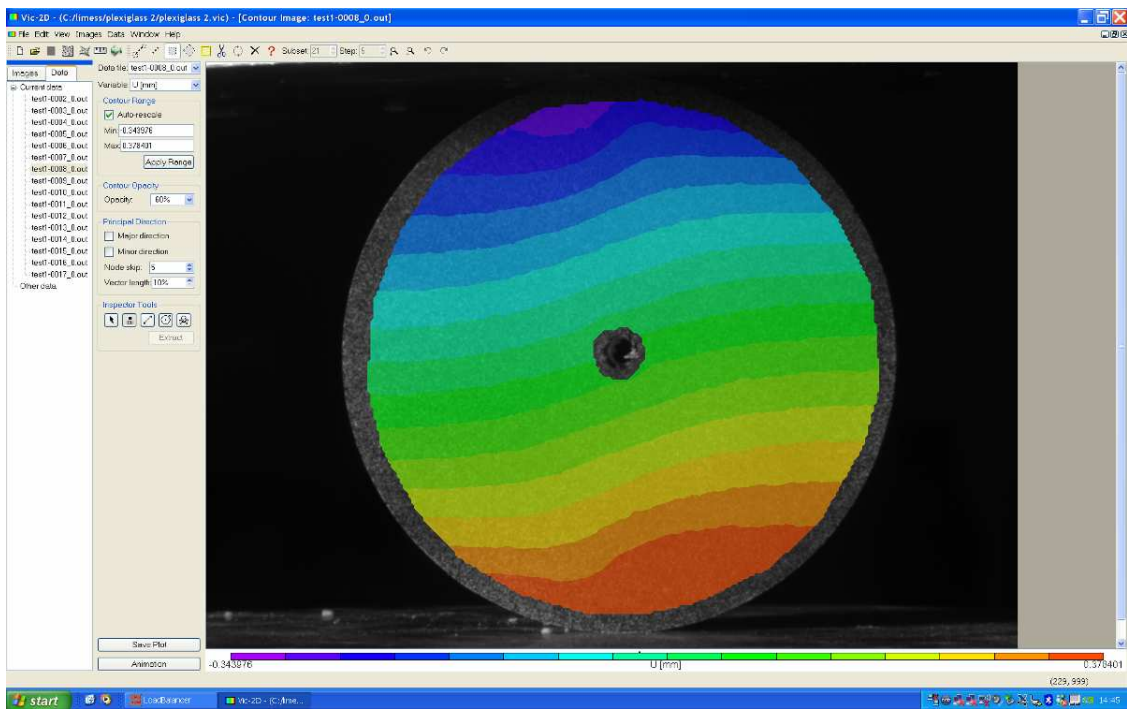
Εικόνα 6-5: Οι μετατοπίσεις της 5^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



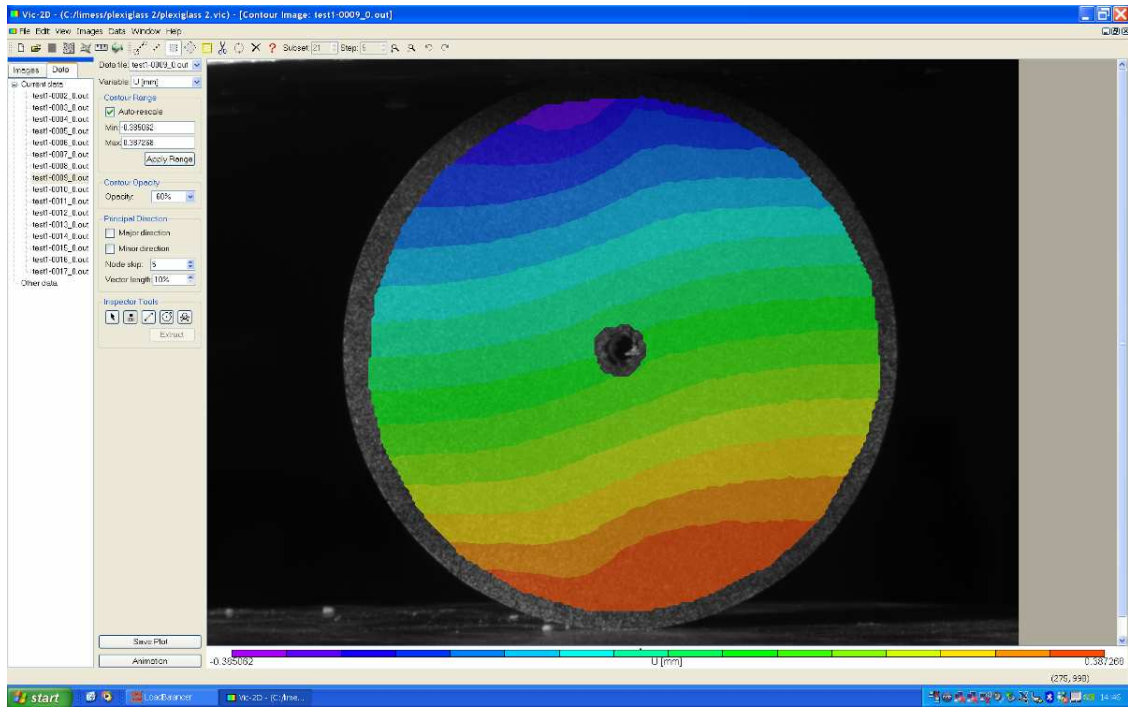
Εικόνα 6-6: Οι μετατοπίσεις U της 6^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



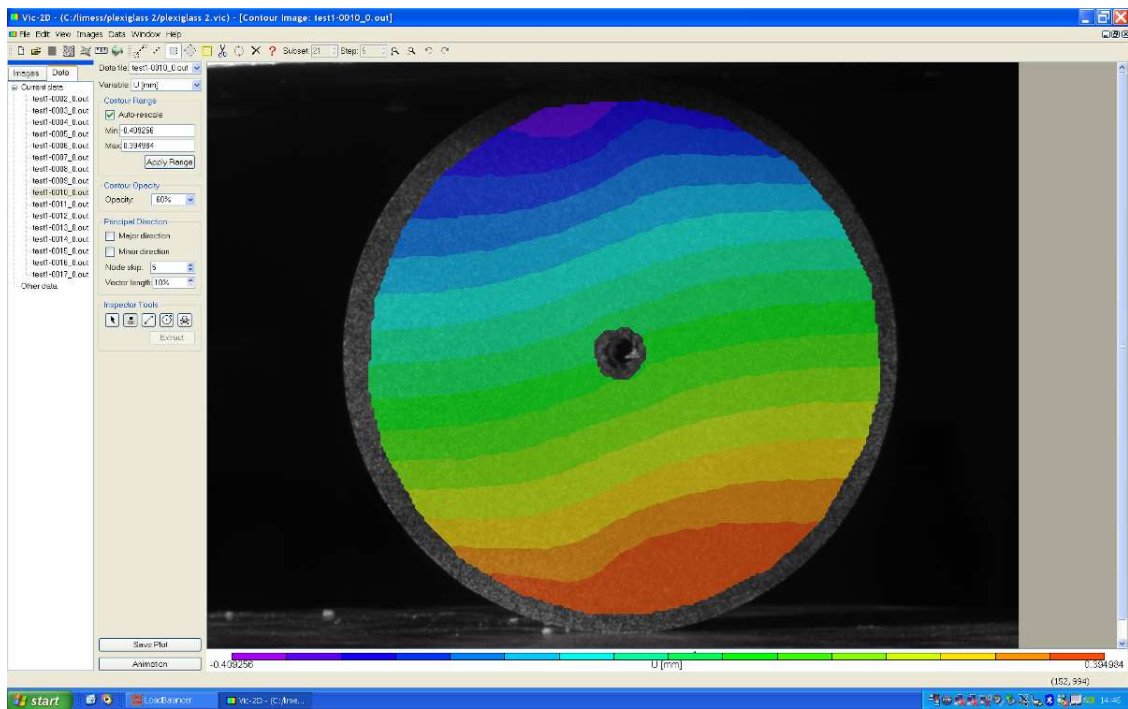
Εικόνα 6-7: Οι μετατοπίσεις U της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



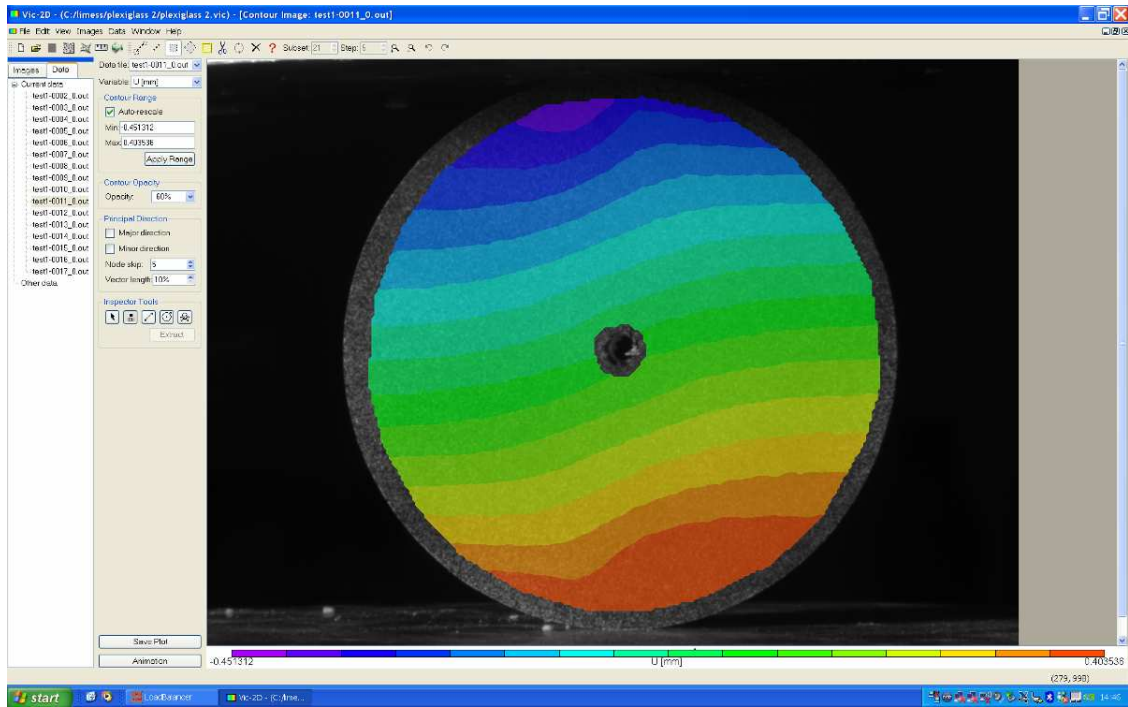
Εικόνα 6-8: Οι μετατοπίσεις U της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



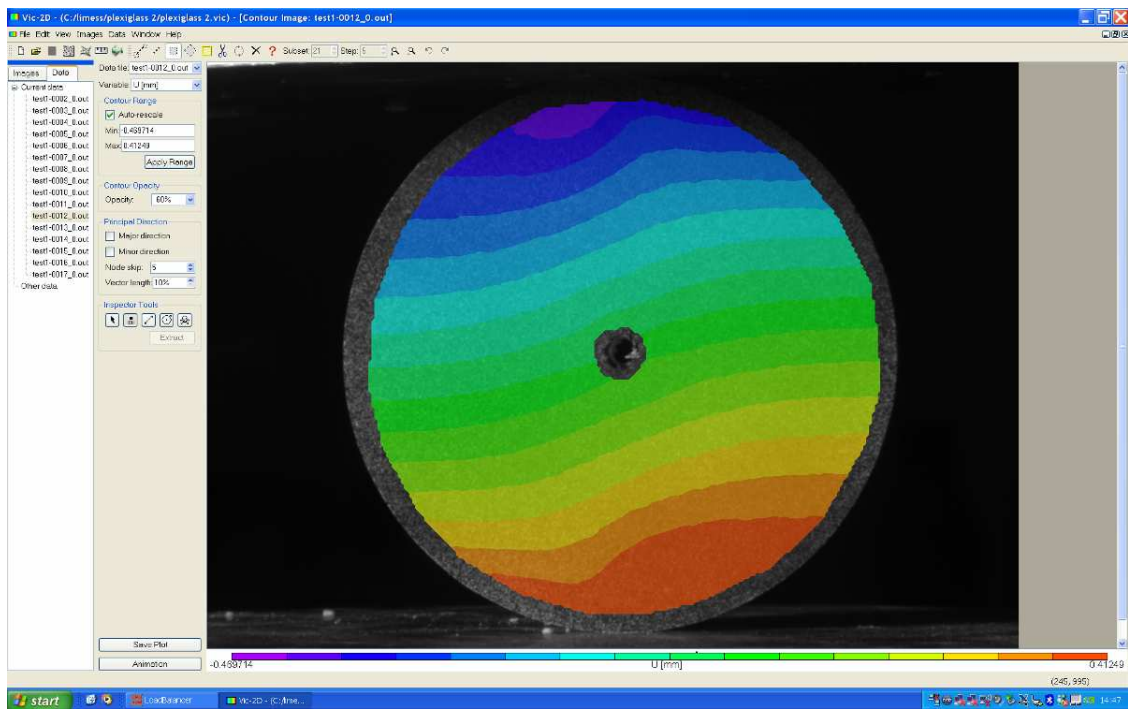
Εικόνα 6-9: Οι μετατοπίσεις U της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



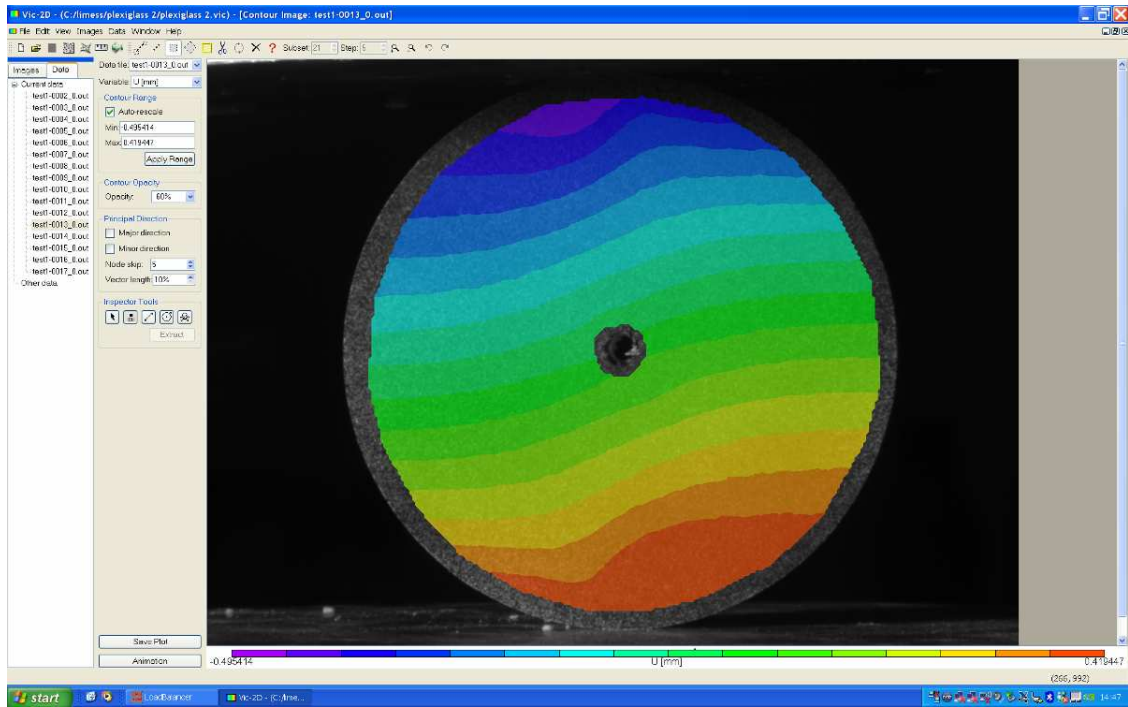
Εικόνα 6-10: Οι μετατοπίσεις U της 10^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



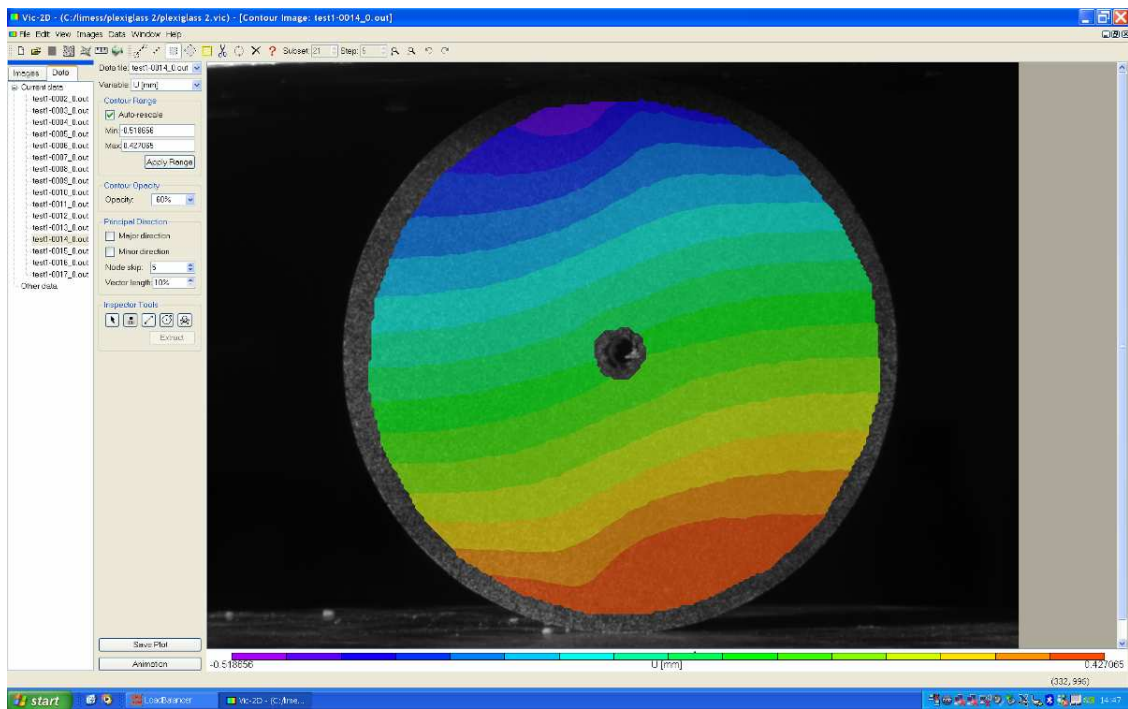
Εικόνα 6-11: Οι μετατοπίσεις U της 11^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



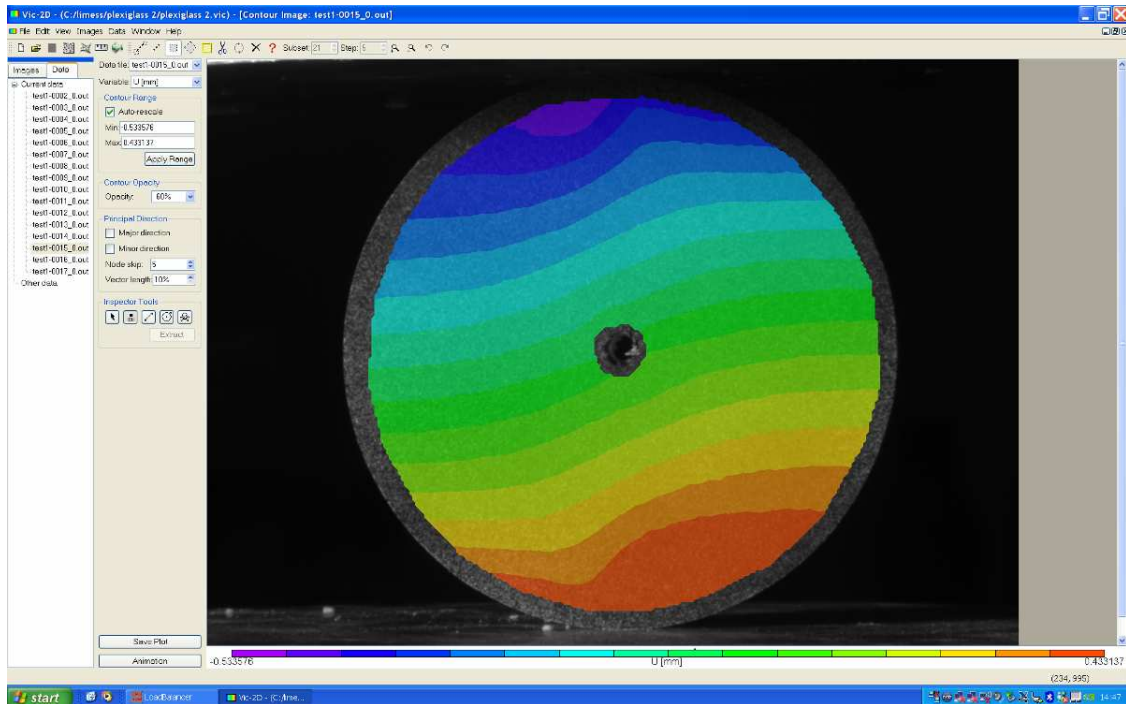
Εικόνα 6-12: Οι μετατοπίσεις U της 12^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-13: Οι μετατοπίσεις U της 13^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-14: Οι μετατοπίσεις U της 14^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

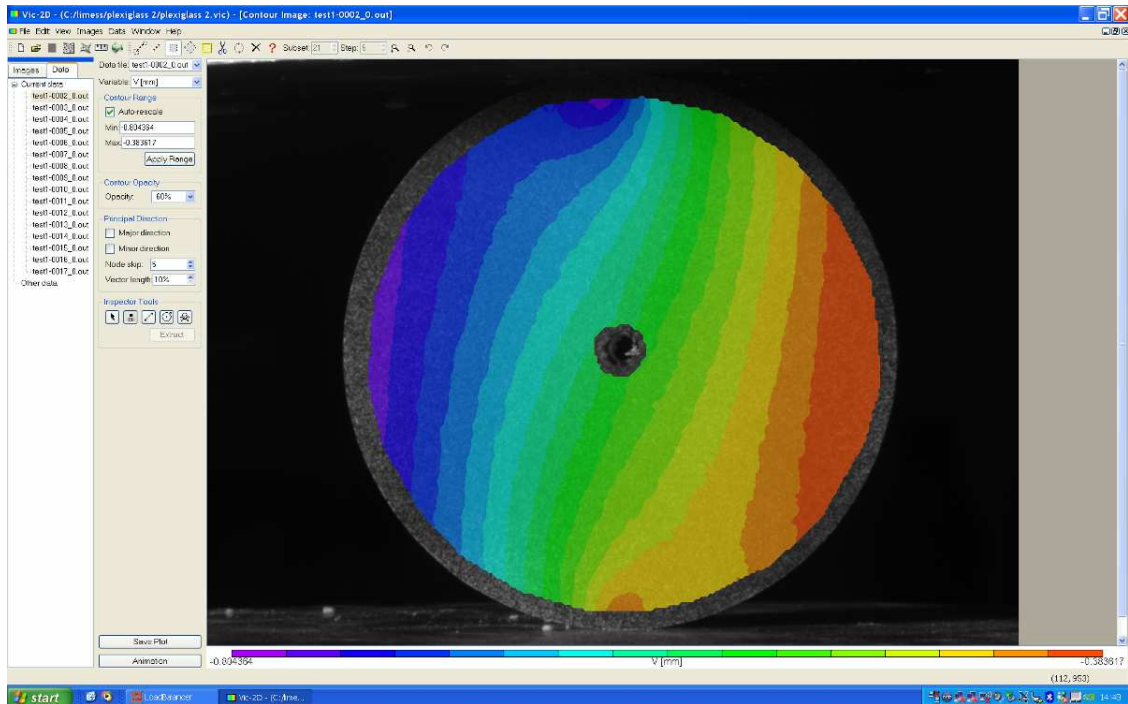


Εικόνα 6-15: Οι μετατοπίσεις U της 15^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

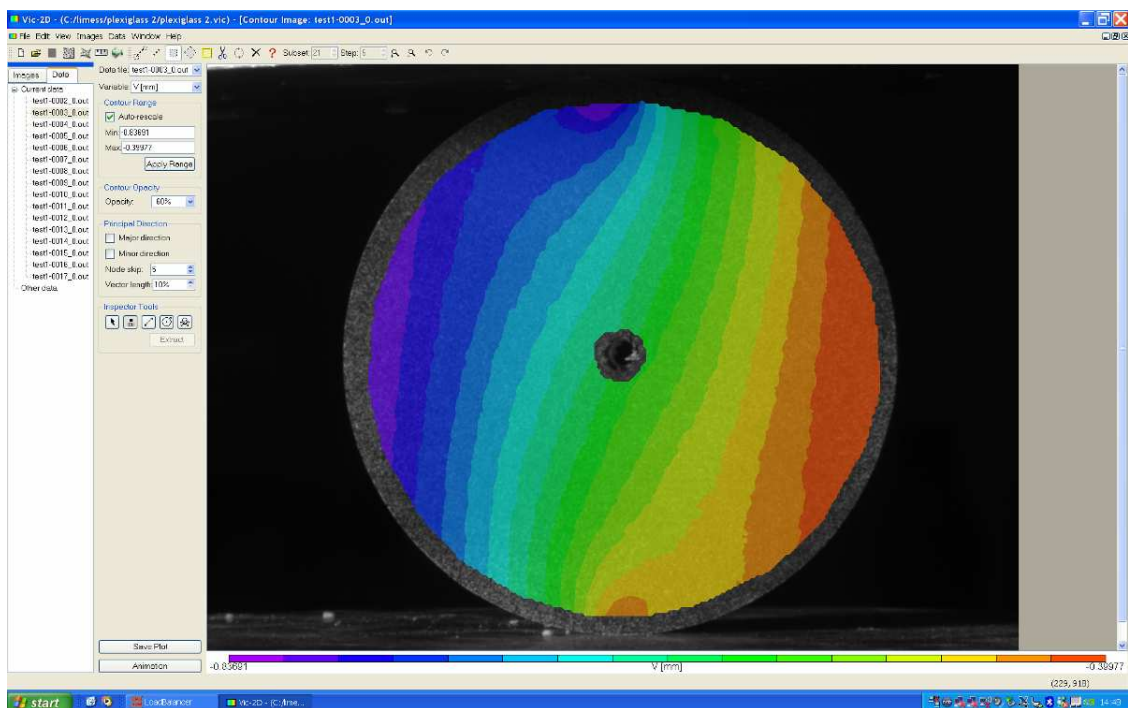
Μελετώντας διεξοδικά τα παραπάνω σχήματα των οριζόντιων μετατοπίσεων U , εξάγεται το συμπέρασμα ότι η διάταξη των ισარიθμικών καμπύλων δεν είναι απολύτως παράλληλη, αλλά εμφανίζει μία απειροελάχιστη στροφή. Αυτό συμβαίνει διότι το κυκλικής επιφάνειας δείγμα, όταν τοποθετηθεί στη μηχανή θλίψης και αρχίσει η προσθήκη φορτίου, δεν «πατάει» σταθερά πάνω στη μηχανή, με αποτέλεσμα να εμφανίζει στροφή. Όπως παρατηρείται στα σχήματα, η στροφή αυτή είναι πιο μικρή στις πρώτες παραμορφωμένες εικόνες και γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη στις επόμενες, καθώς πλησιάζει η στιγμή της θραύσης. Επιπλέον, εύκολα προκύπτει ότι στις κόκκινες και στις μωβ περιοχές της επιφάνειας του δείγματος, εμφανίζονται οι μεγαλύτερες θετικές και αρνητικές τιμές μετατοπίσεων, αντίστοιχα. Τέλος, αξίζει να παρατηρηθεί ότι η μωβ περιοχή, στο πάνω μέρος του δείγματος, παρουσιάζει τις μεγαλύτερες απόλυτες τιμές των μετατοπίσεων U , που σημαίνει ότι το δείγμα καθώς παραμορφώνεται δέχεται τη μεγαλύτερη δύναμη από το πάνω μέρος. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο, διότι η μηχανή θλίψης με την οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα ασκεί δύναμη από το πάνω μέρος.

6.2.2. Το Πεδίο των Κάθετων Μετατοπίσεων V

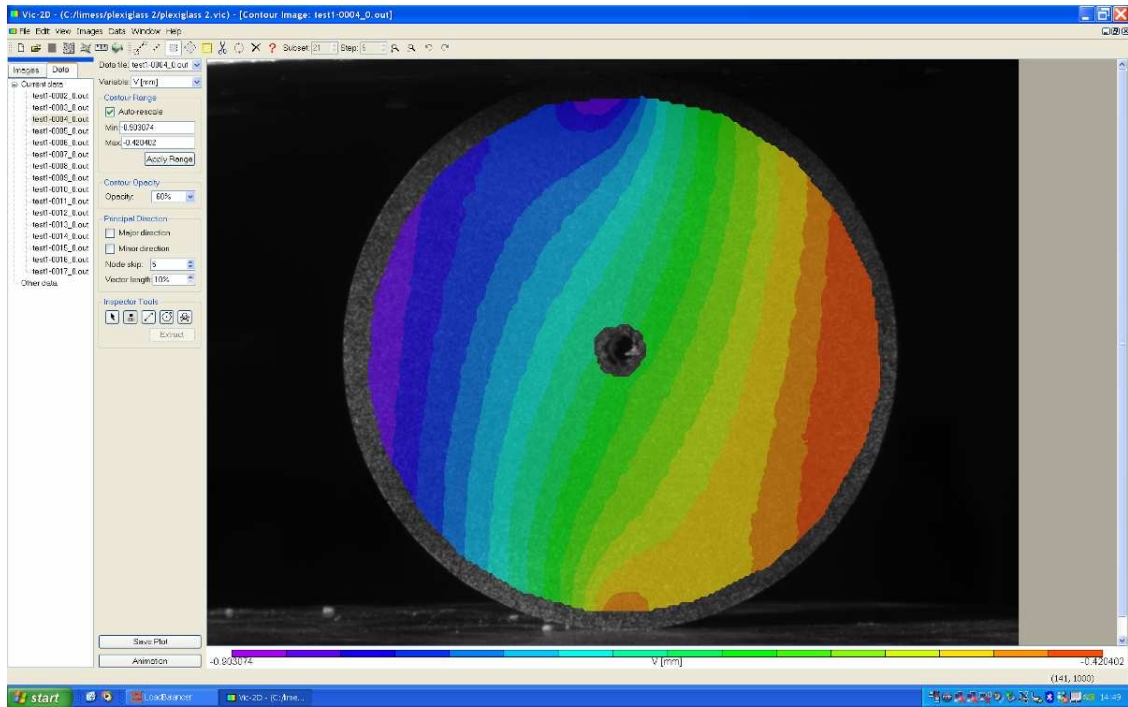
Στη συγκεκριμένη υποενοότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις κάθετες μετατοπίσεις. Παρακάτω παρατίθενται τα σχήματα που απεικονίζουν το πεδίο των V μετατοπίσεων:



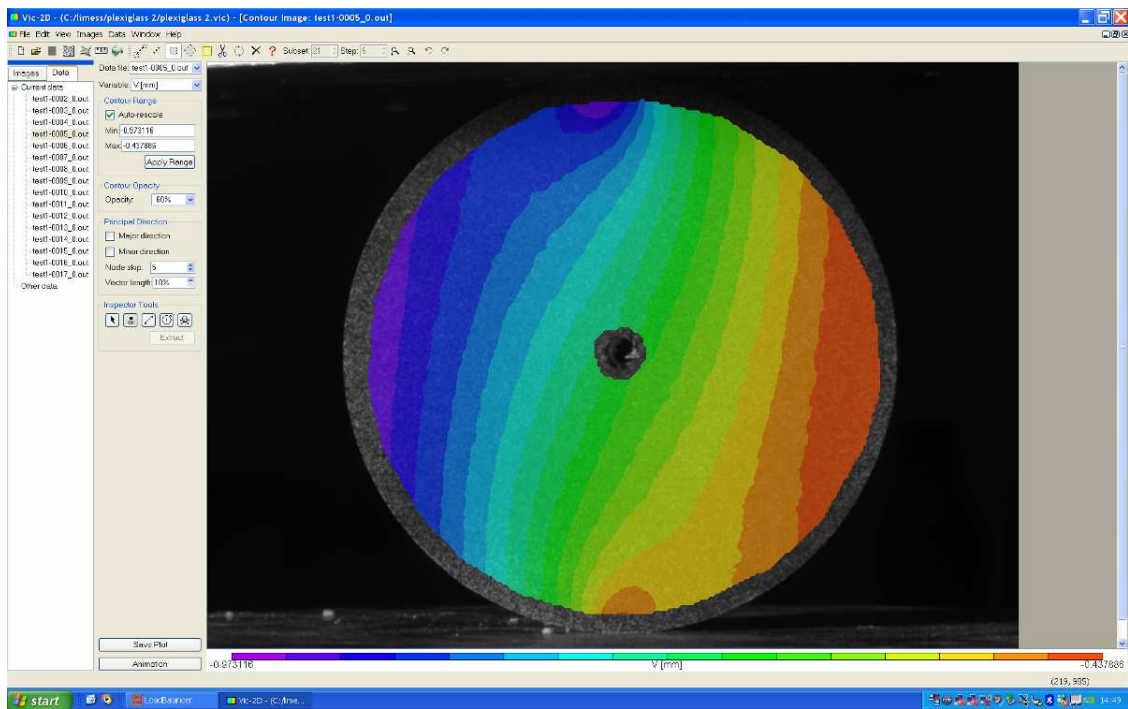
Εικόνα 6-16: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 2^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



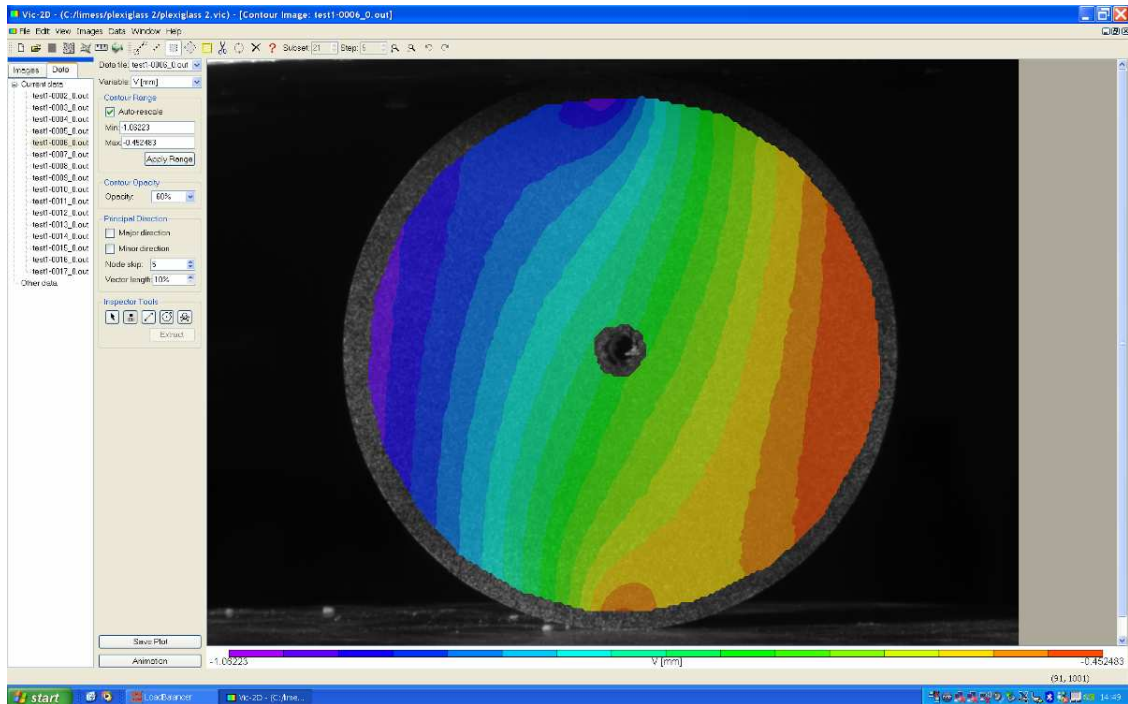
Εικόνα 6-17: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 3^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



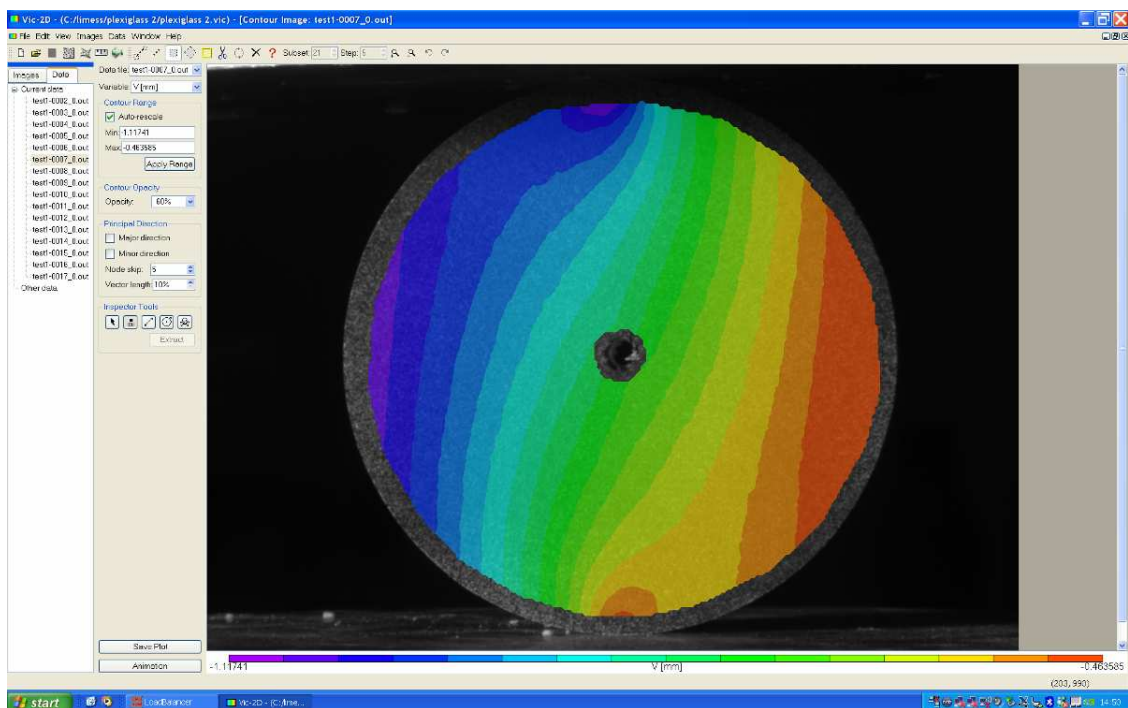
Εικόνα 6-18: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 4^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



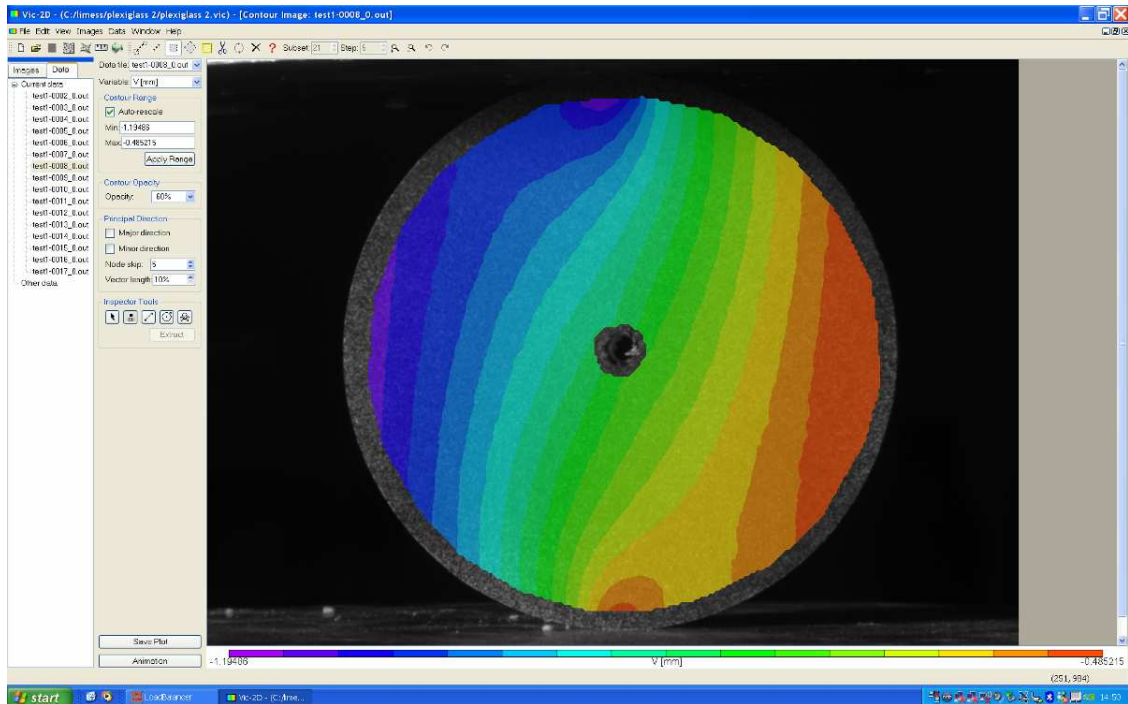
Εικόνα 6-19: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 5^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



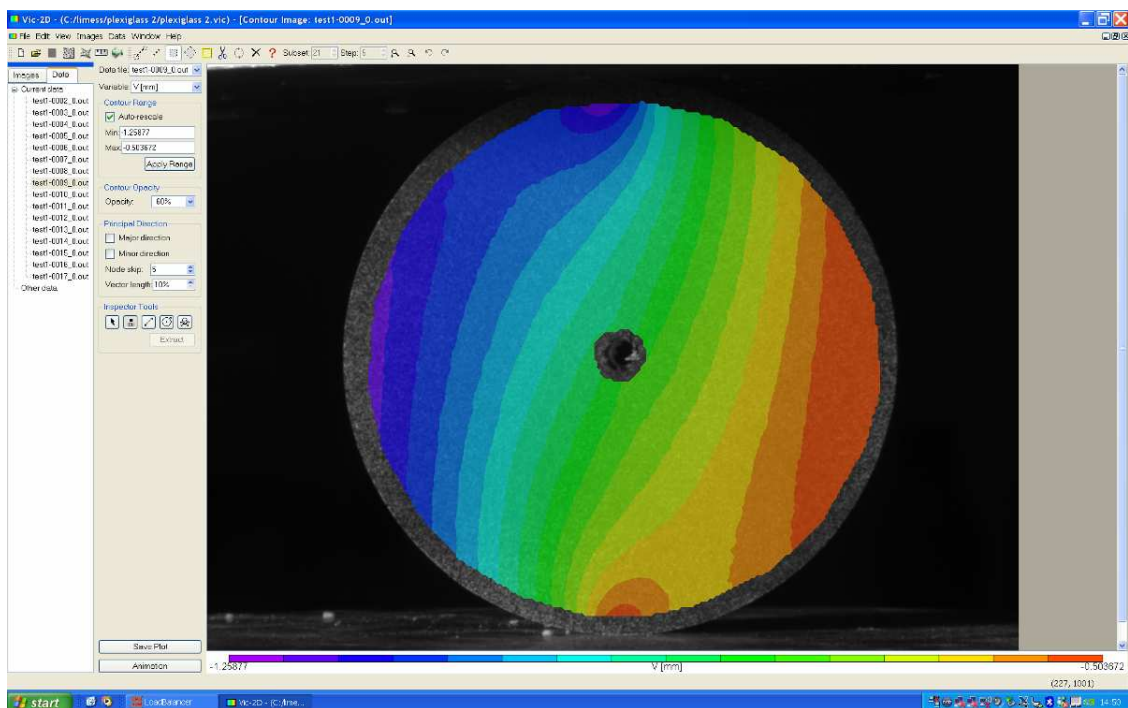
Εικόνα 6-20: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 6^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



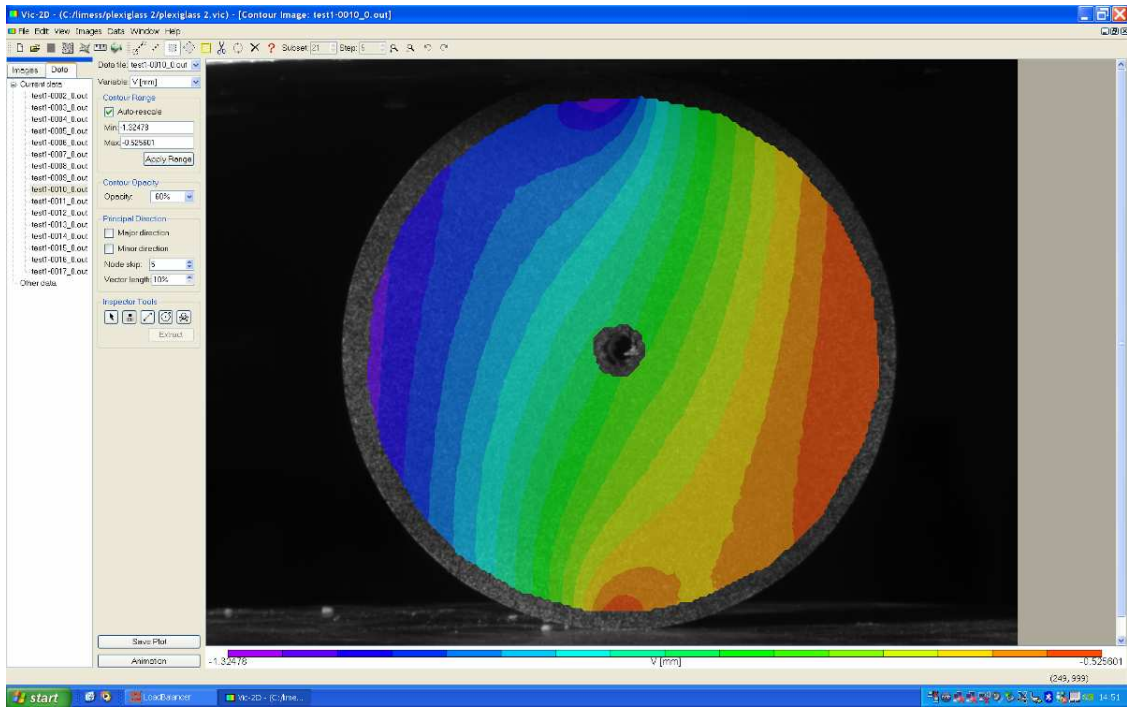
Εικόνα 6-21: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



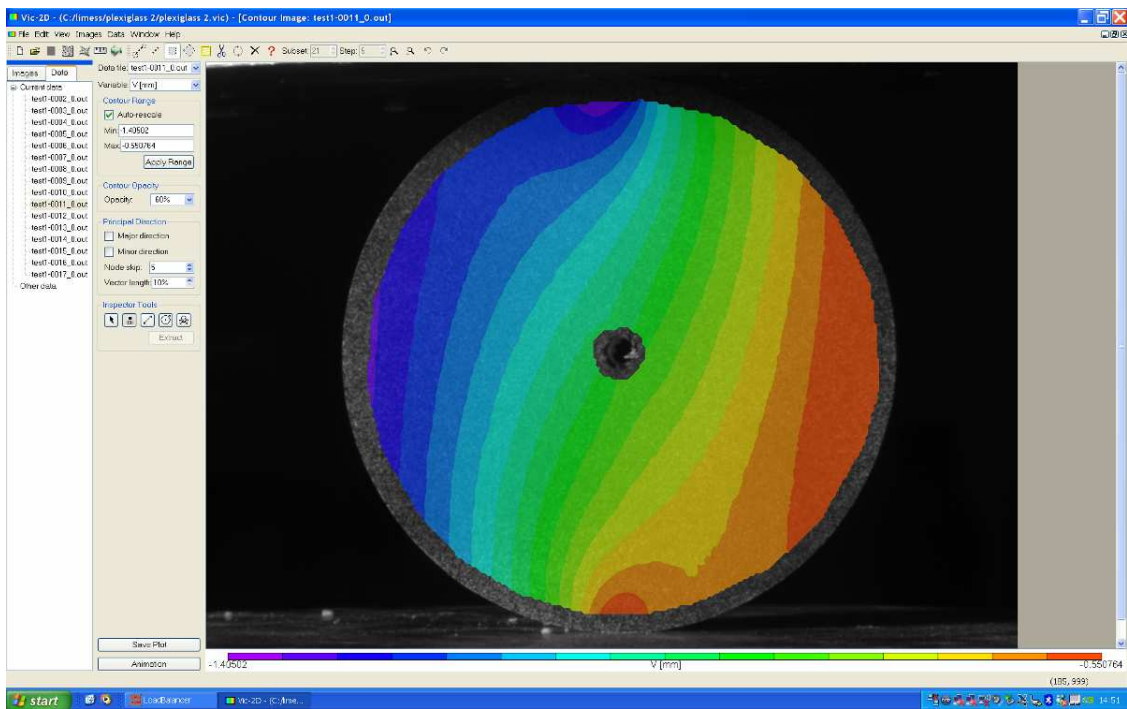
Εικόνα 6-22: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



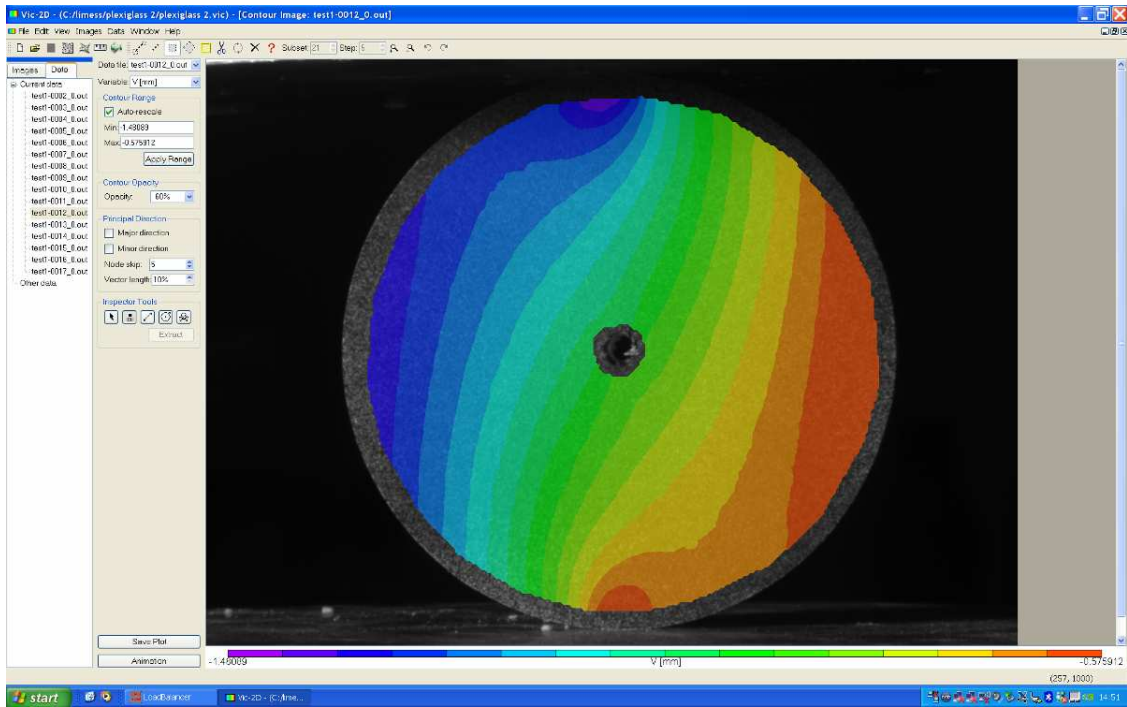
Εικόνα 6-23: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



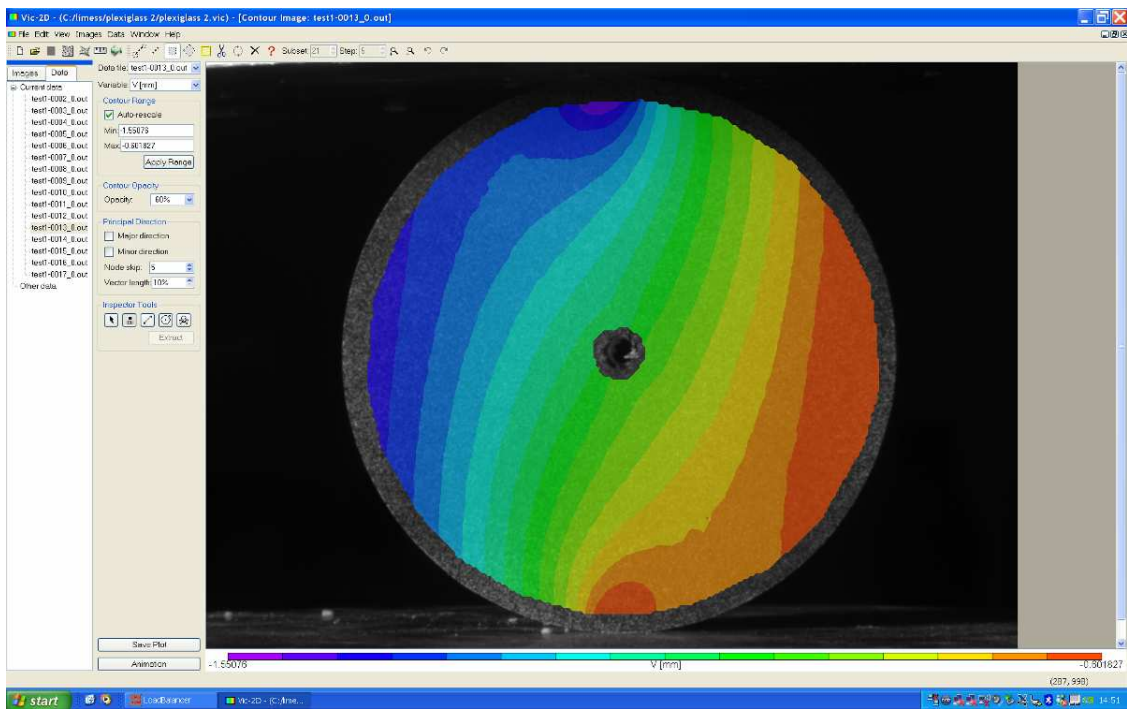
Εικόνα 6-24: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας.



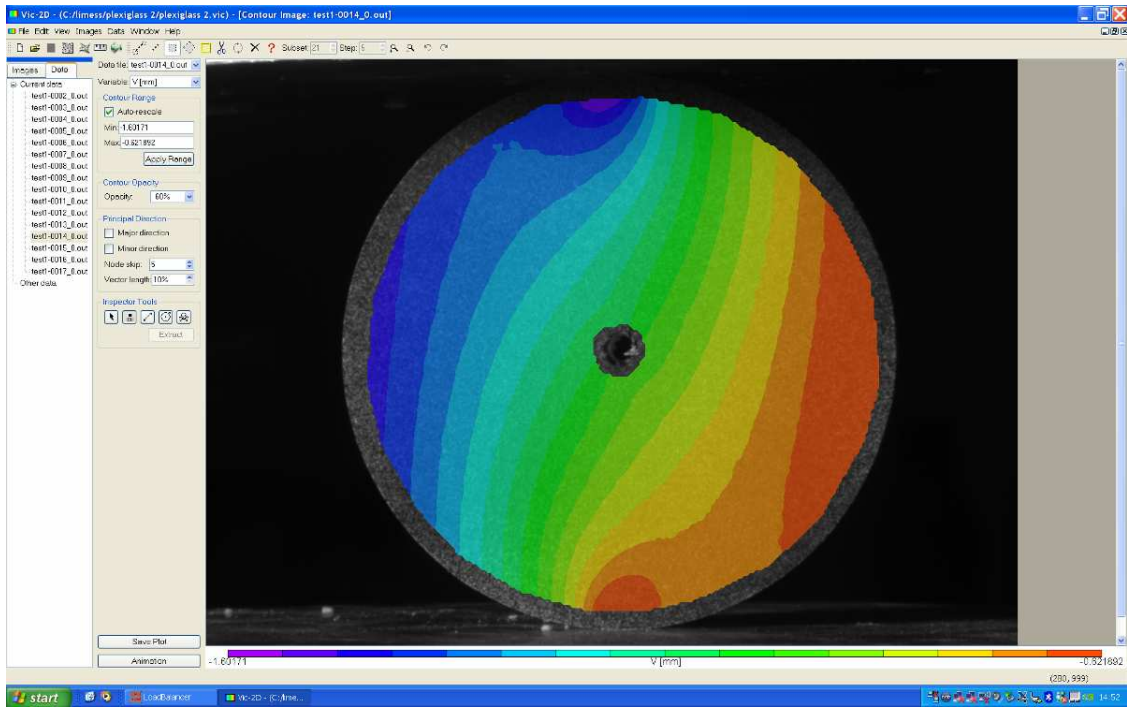
Εικόνα 6-25: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 11^{15} παραμορφωμένης εικόνας.



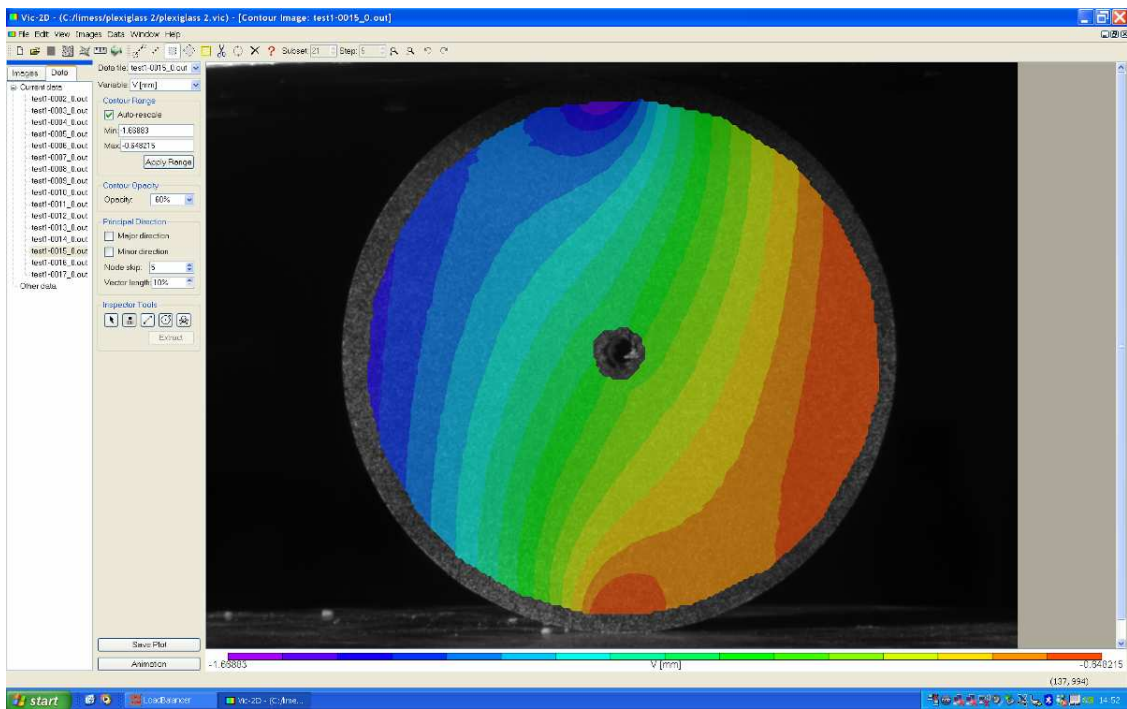
Εικόνα 6-26: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 12^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-27: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 13^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-28: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 14^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

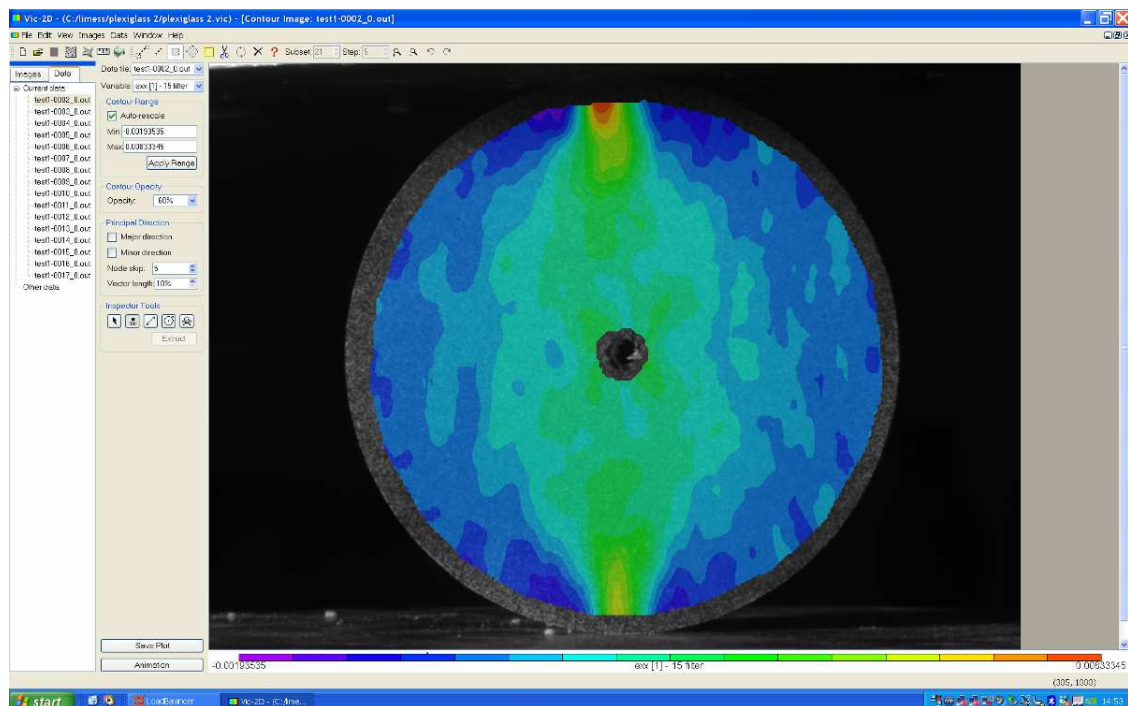


Εικόνα 6-29: Το πεδίο των μετατοπίσεων V της 15^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

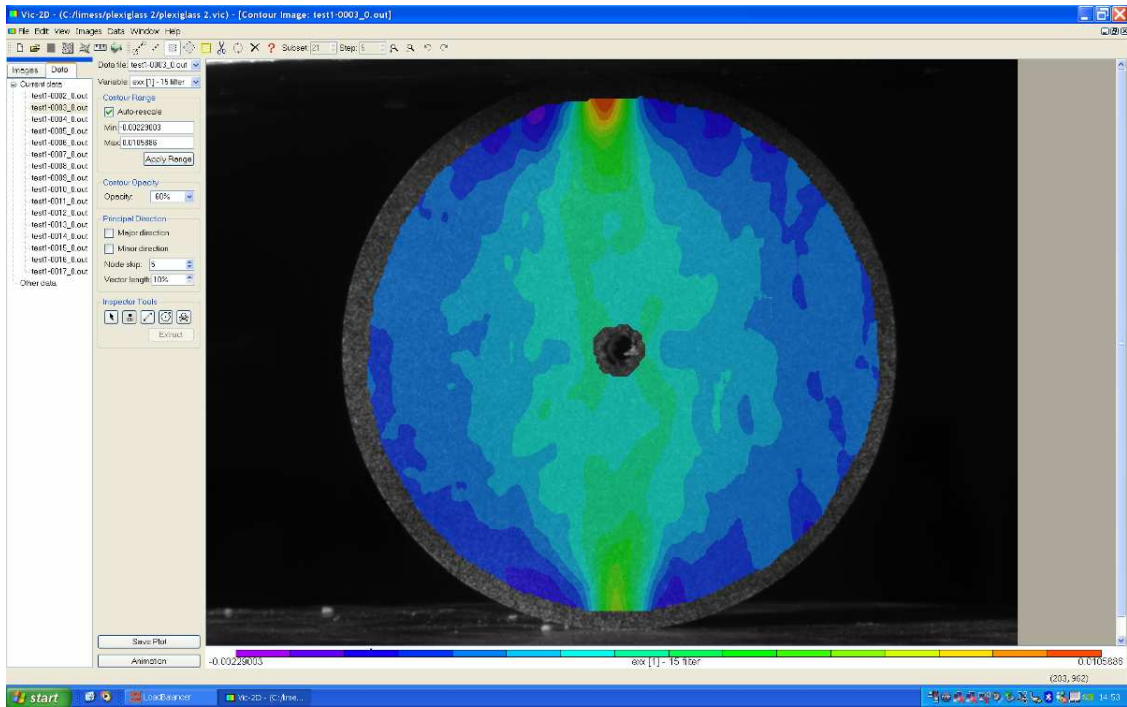
Από τη μελέτη των παραπάνω σχημάτων των κάθετων μετατοπίσεων V , προκύπτει ότι καθώς το δείγμα δέχεται τη δύναμη της παραμόρφωσης, από το πάνω μέρος της μηχανής θλίψης, τόσο μεγαλύτερες μετατοπίσεις κατά την Y διεύθυνση προκύπτουν. Στις μωβ περιοχές της επιφάνειας παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αρνητικές τιμές μετατοπίσεων V , ενώ στις κόκκινες περιοχές παρατηρούνται οι μικρότερες αρνητικές τιμές των μετατοπίσεων V . Είναι εμφανές ότι καθώς προστίθεται ολόένα και μεγαλύτερο φορτίο, το σημείο επαφής του δείγματος με τη μηχανή, το οποίο φαίνονται με μωβ χρώμα στο πάνω μέρος του δείγματος, εμφανίζει όλο και πιο μεγάλες μετατοπίσεις κατά Y .

6.2.3. Το Πεδίο των Ανηγμένων Παραμορφώσεων ϵ_{xx}

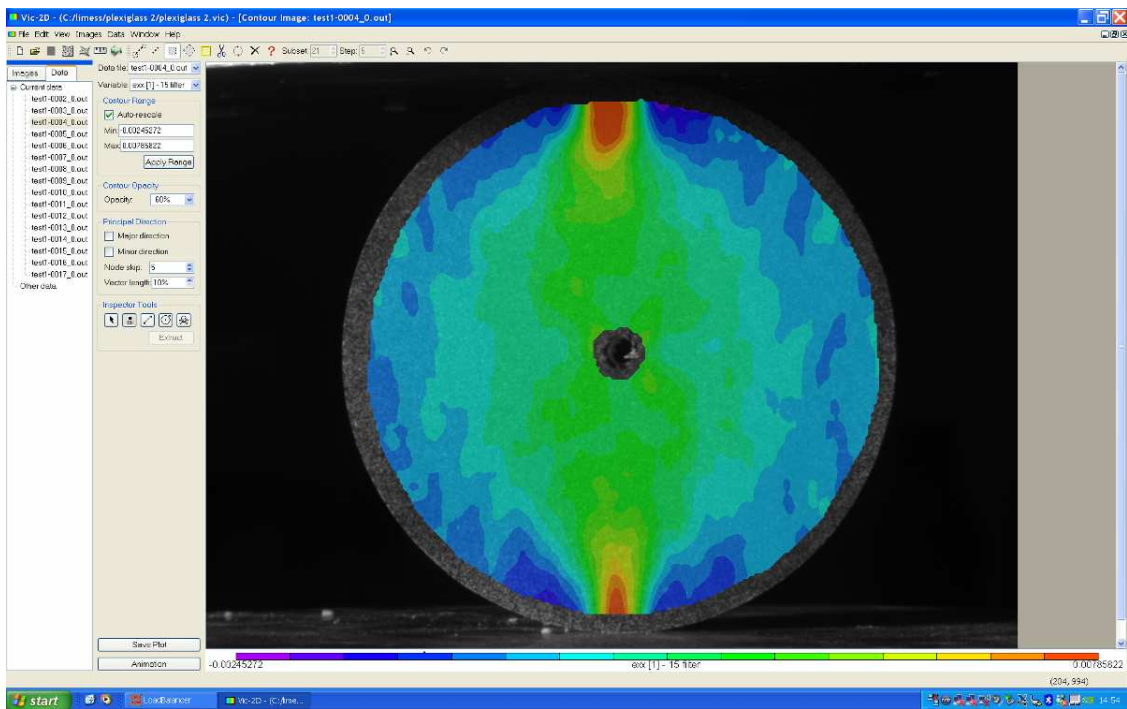
Στη συγκεκριμένη υποενότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά x . Παρακάτω παρατίθενται τα σχήματα που απεικονίζουν το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{xx} :



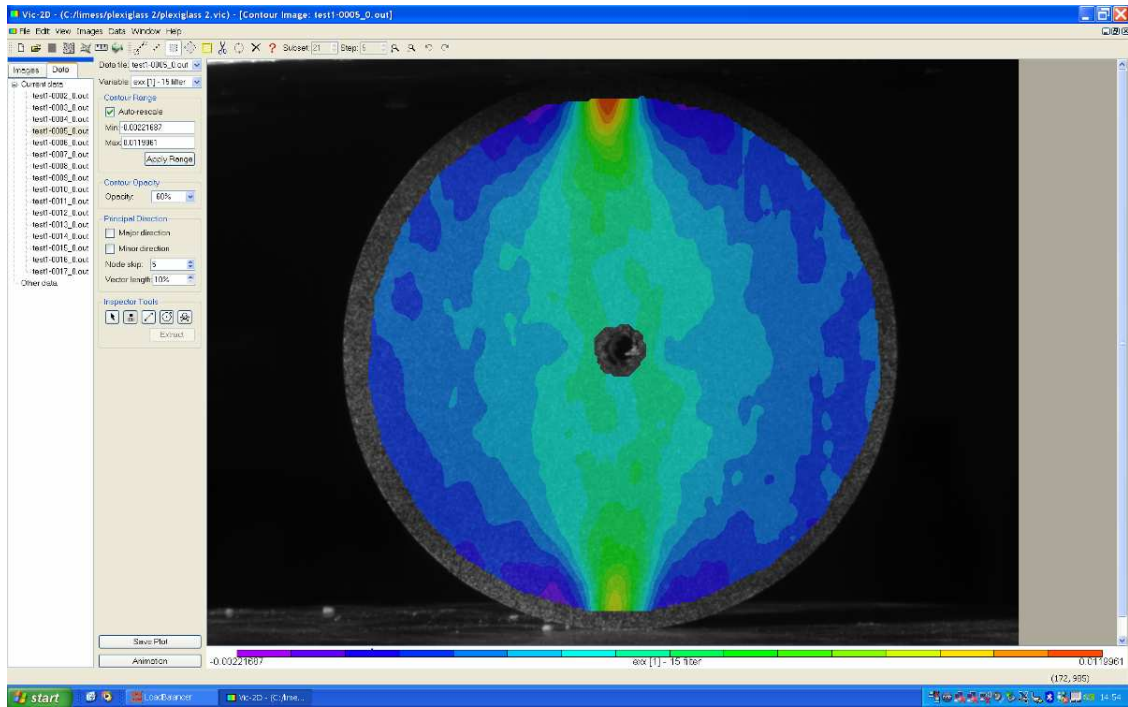
Εικόνα 6-30: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_{xx} της 2^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



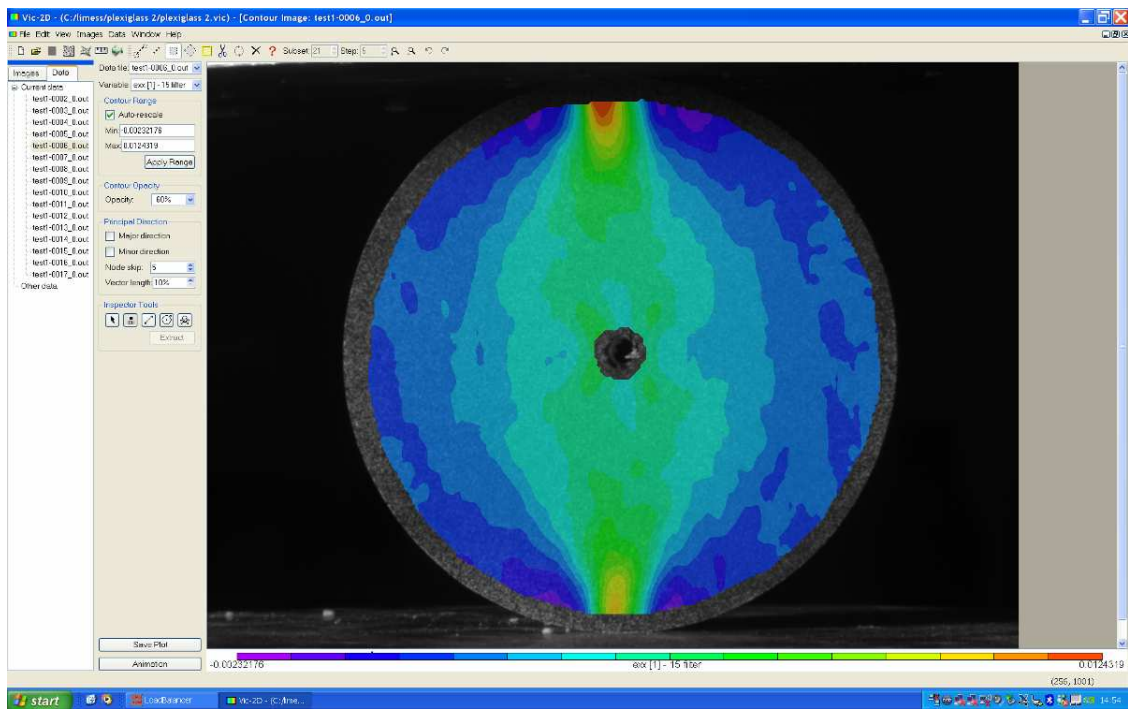
Εικόνα 6-31: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 3^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



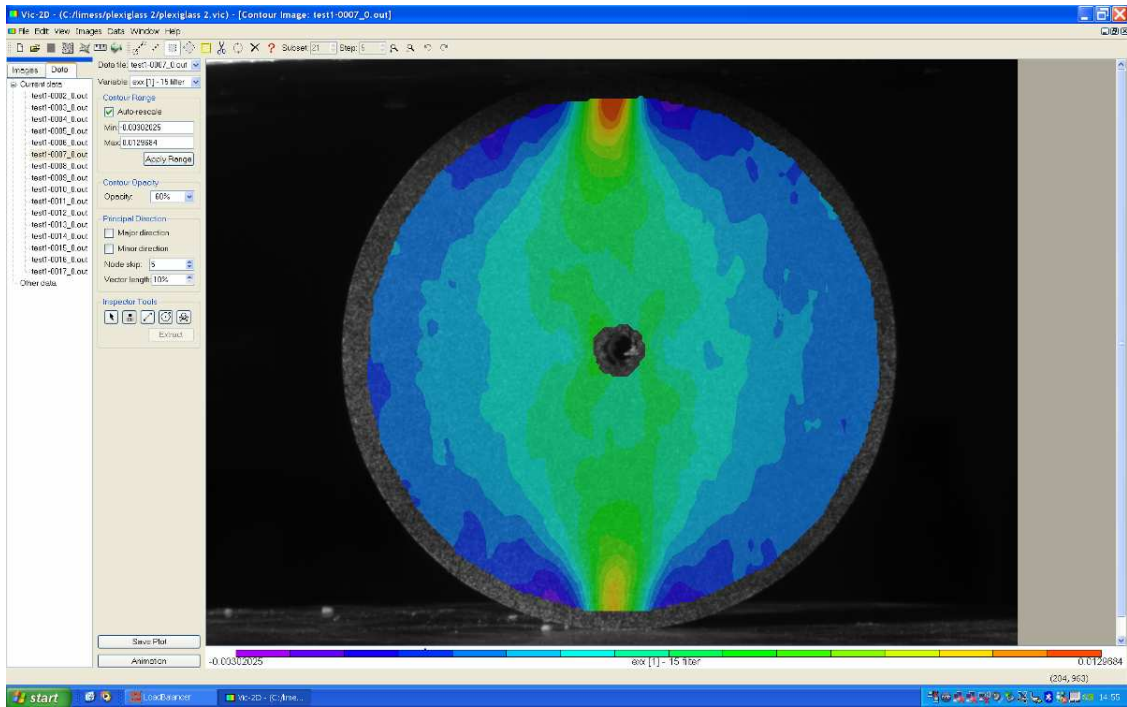
Εικόνα 6-32: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 4^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



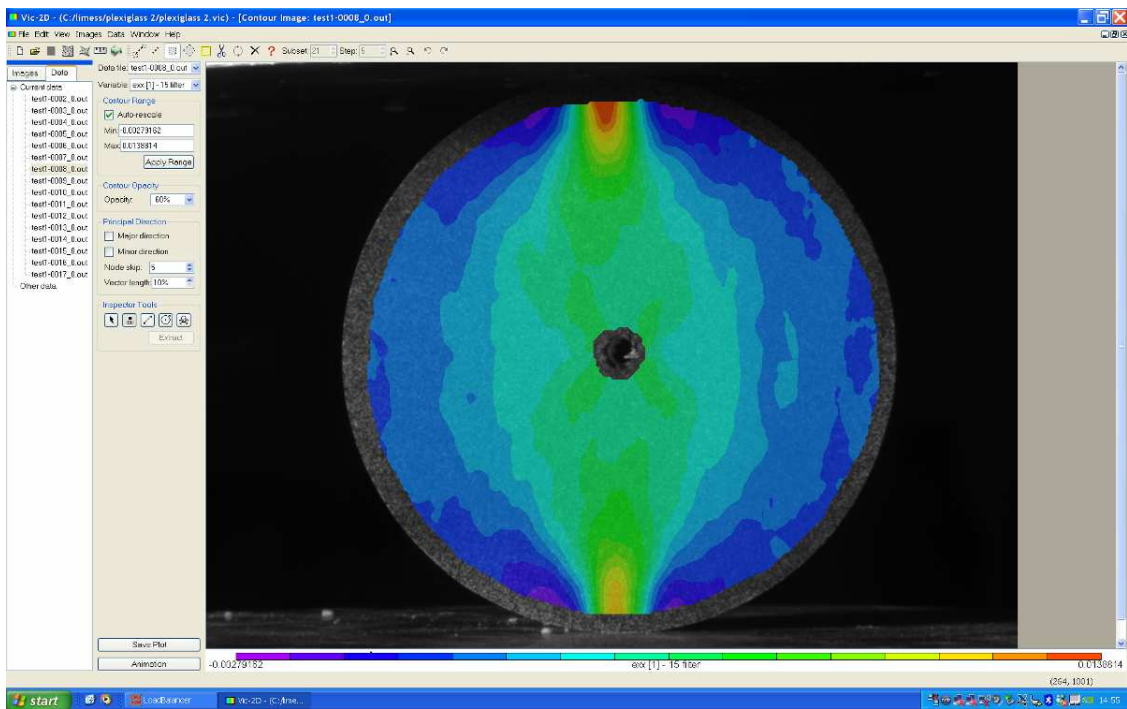
Εικόνα 6-33: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 5^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



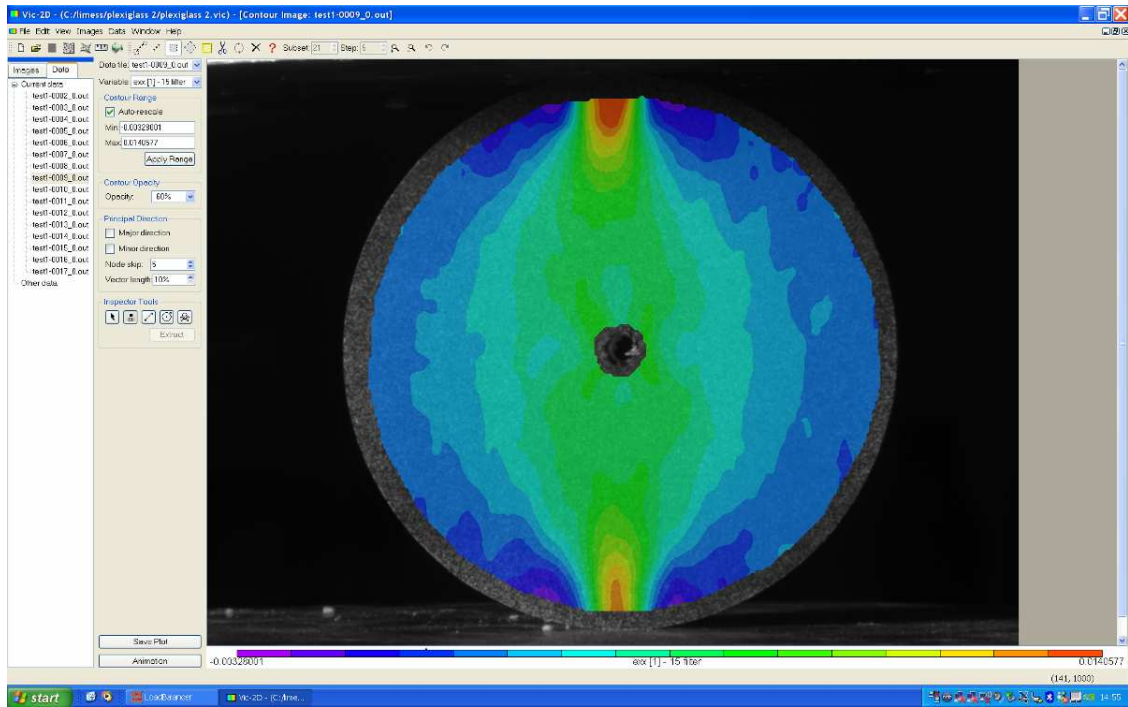
Εικόνα 6-34: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 6^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



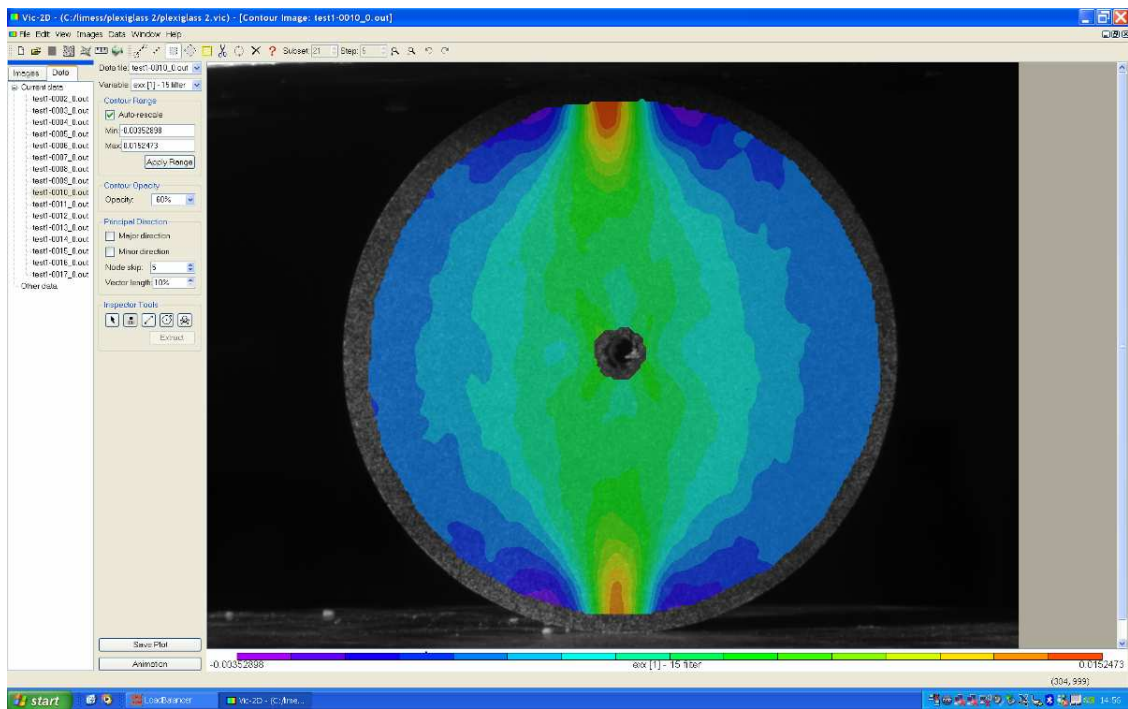
Εικόνα 6-35: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



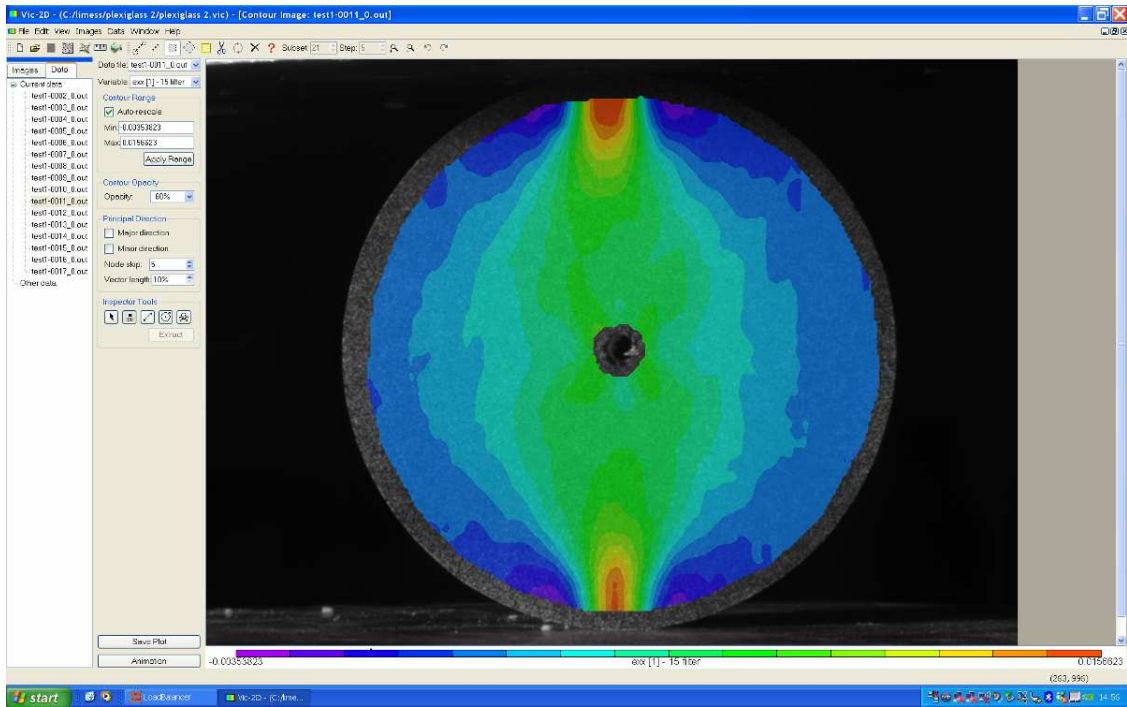
Εικόνα 6-36: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



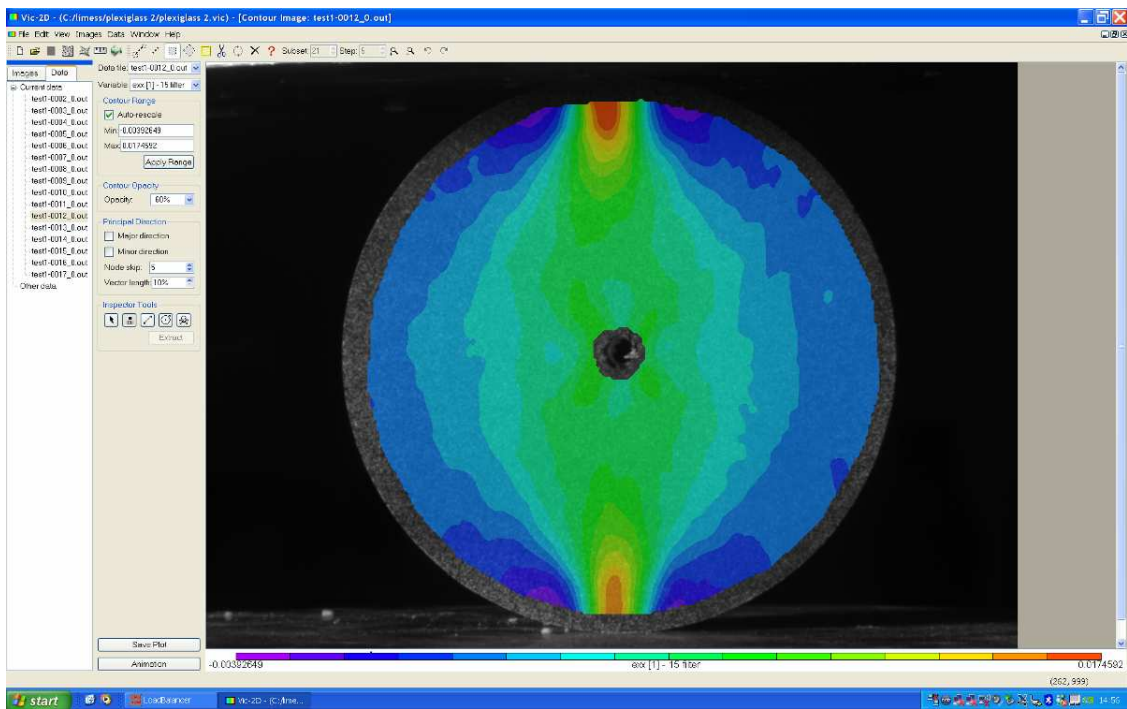
Εικόνα 6-37: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



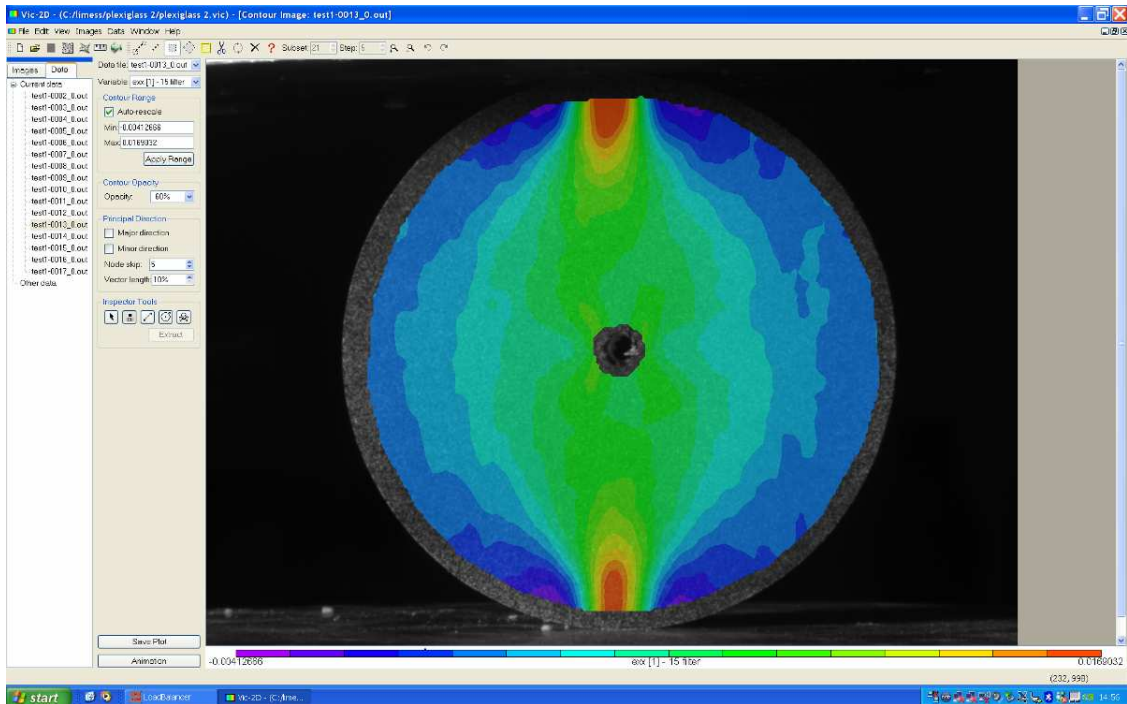
Εικόνα 6-38: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 10^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



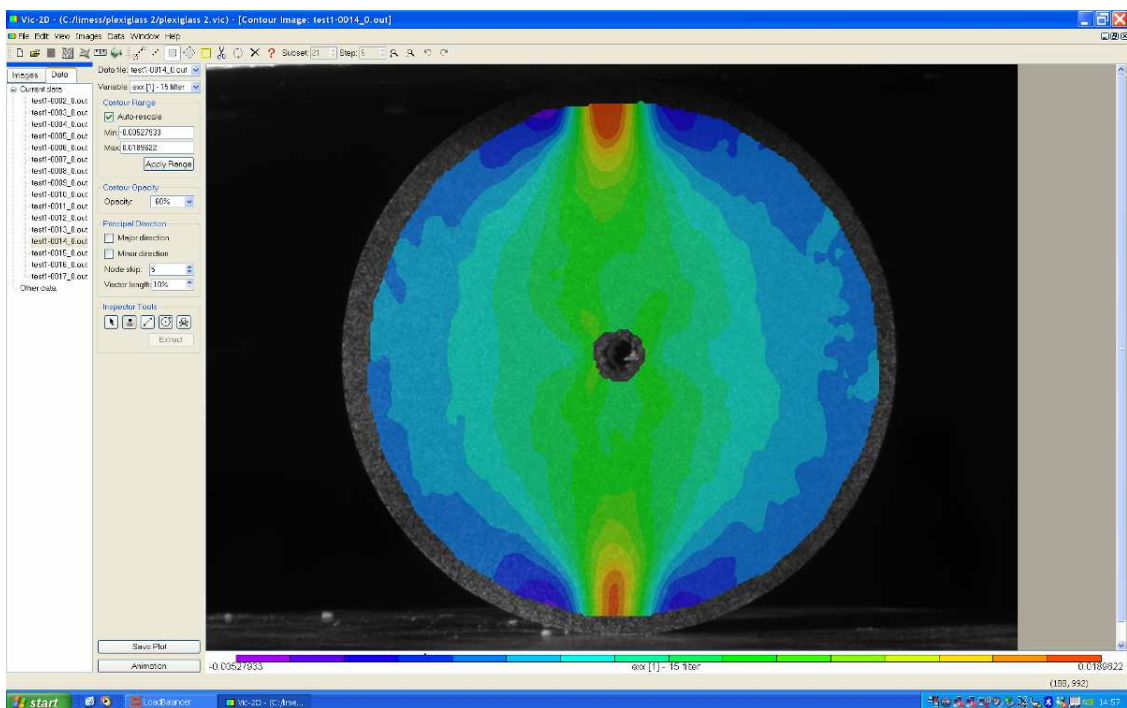
Εικόνα 6-39: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 11^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



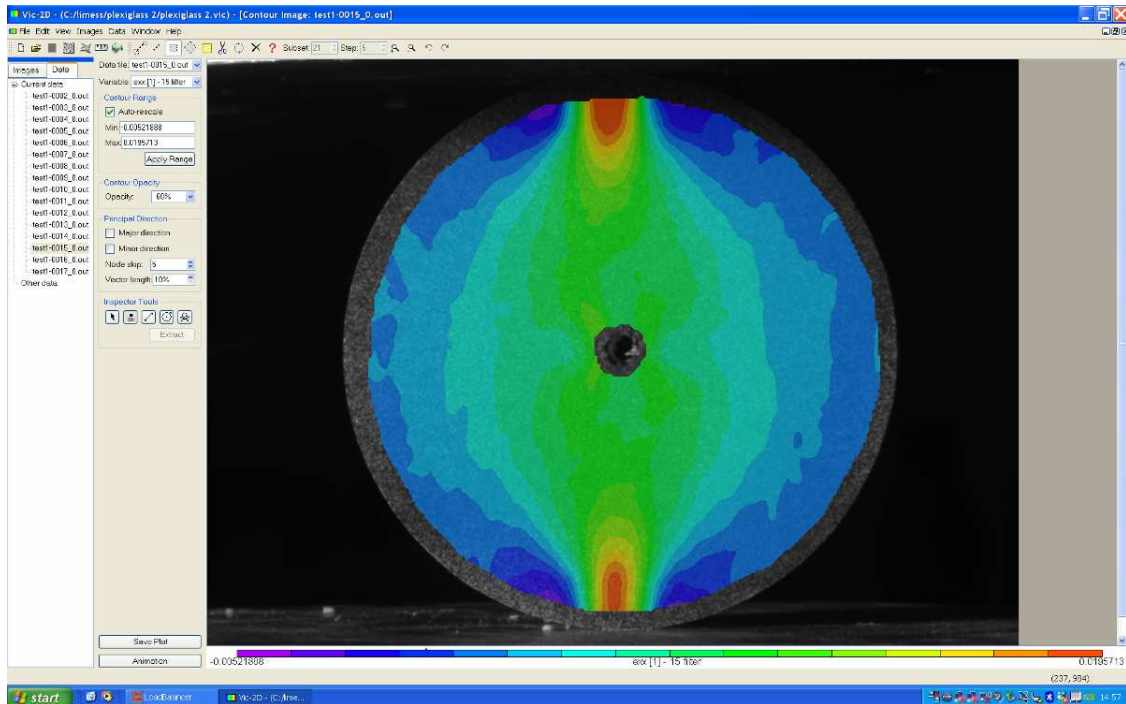
Εικόνα 6-40: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 12^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-41: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 13^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-42: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 14^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

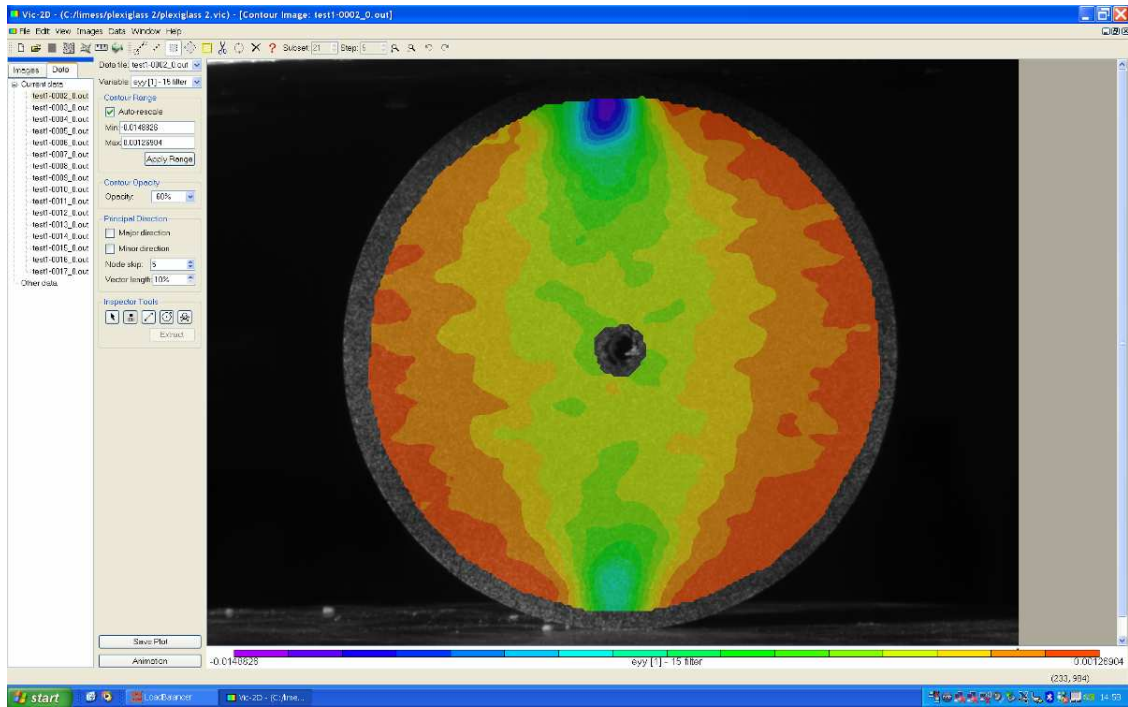


Εικόνα 6-43: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{xx} της 15^{th} παραμορφωμένης εικόνας.

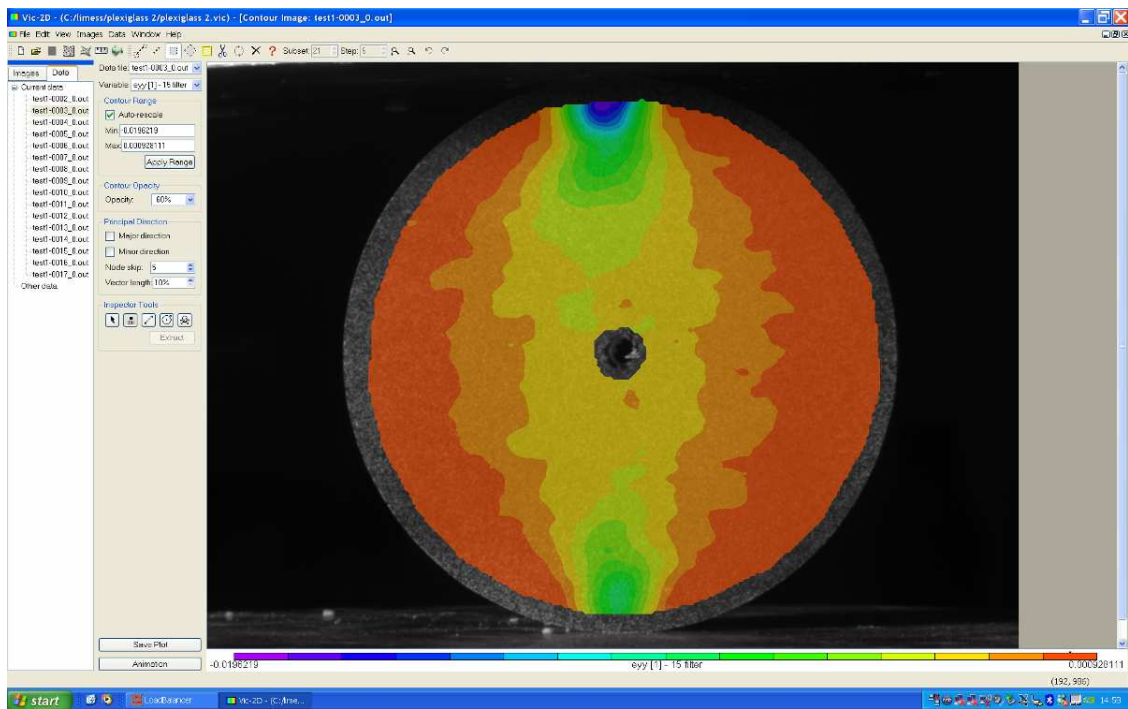
Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{xx} , προκύπτει ότι οι περιοχές που εμφανίζονται με μπλε και μωβ χρώμα (ψυχρές περιοχές) λαμβάνουν αρνητικές τιμές, ενώ οι περιοχές με κόκκινο και πορτοκαλί χρώμα (θερμές περιοχές) λαμβάνουν θετικές τιμές παραμόρφωσης. Επιπρόσθετα, οι κατ' απόλυτο μεγαλύτερες τιμές αντιστοιχούν στις θερμές περιοχές, που σημαίνει ότι οι συγκεκριμένες περιοχές παραμορφώνονται περισσότερο κατά τη x διεύθυνση. Τα σημεία επαφής του δοκιμίου με τις πλάκες της μηχανής ανήκουν στις θερμές περιοχές, πράγμα απόλυτα λογικό, καθώς τα σημεία αυτά δέχονται τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Επίσης, προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο προχωράει η διαδικασία της θλίψης, η ανηγμένη παραμόρφωση κατά x στα σημεία επαφής, τα οποία εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα, γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη. Τέλος, στο κέντρο της επιφάνειας του δοκιμίου, εμφανίζεται σταδιακά, κατά την κάθετη διεύθυνση, ένα πράσινο χρώμα. Αυτό, και το γεγονός ότι οι ισარიθμικές καμπύλες γύρω από τα σημεία επαφής εμφανίζουν μία απόλυτα συμμετρική διάταξη, υποδεικνύει ότι το δείγμα θα δεχθεί εντελώς κατακόρυφη θραύση.

6.2.4. Το Πεδίο των Ανηγμένων Παραμορφώσεων e_{yy}

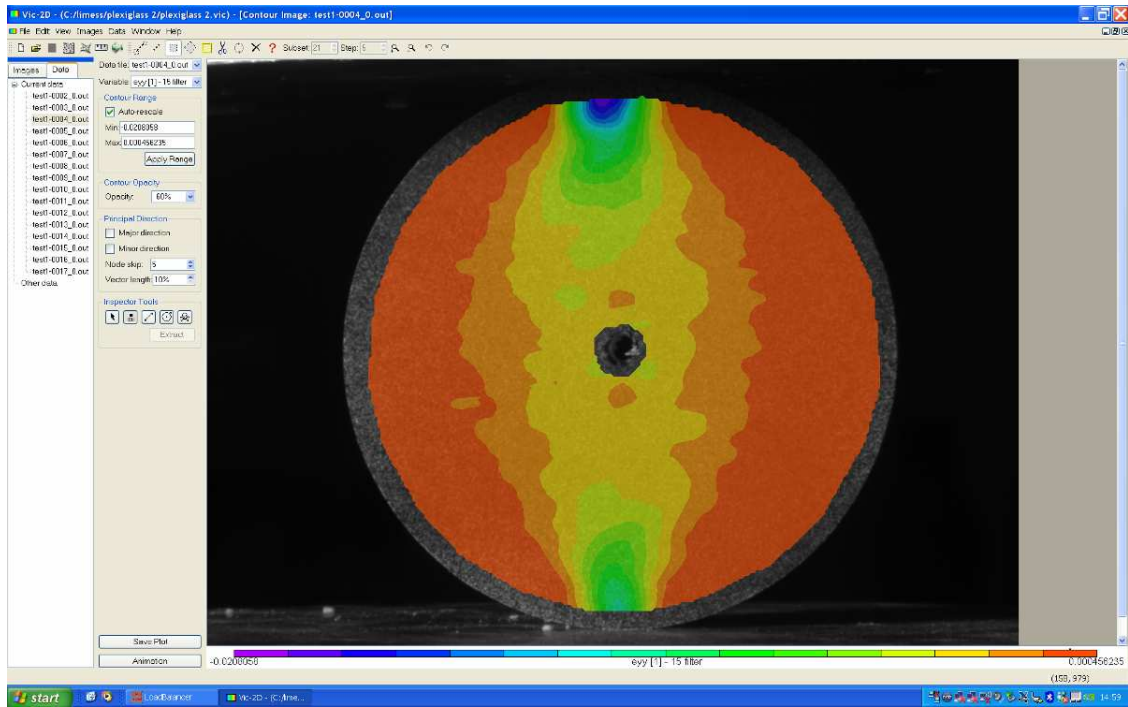
Στη συγκεκριμένη υποενοότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά y . Παρακάτω παρατίθενται τα σχήματα που απεικονίζουν το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων e_{yy} :



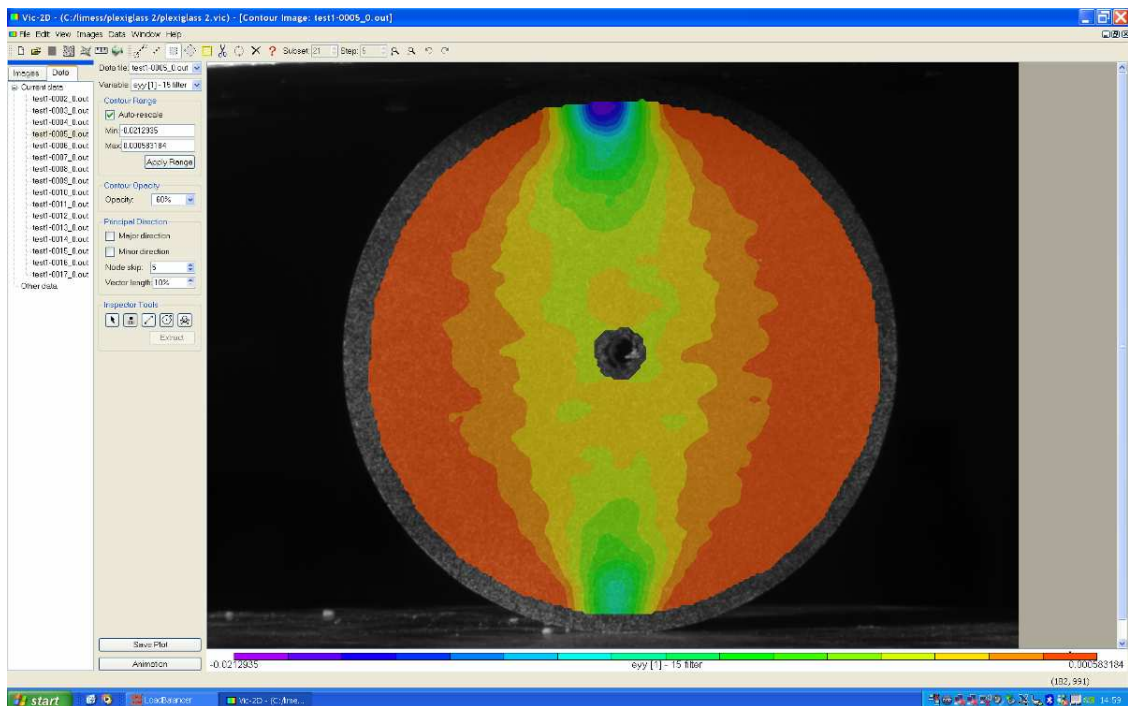
Εικόνα 6-44: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 2^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



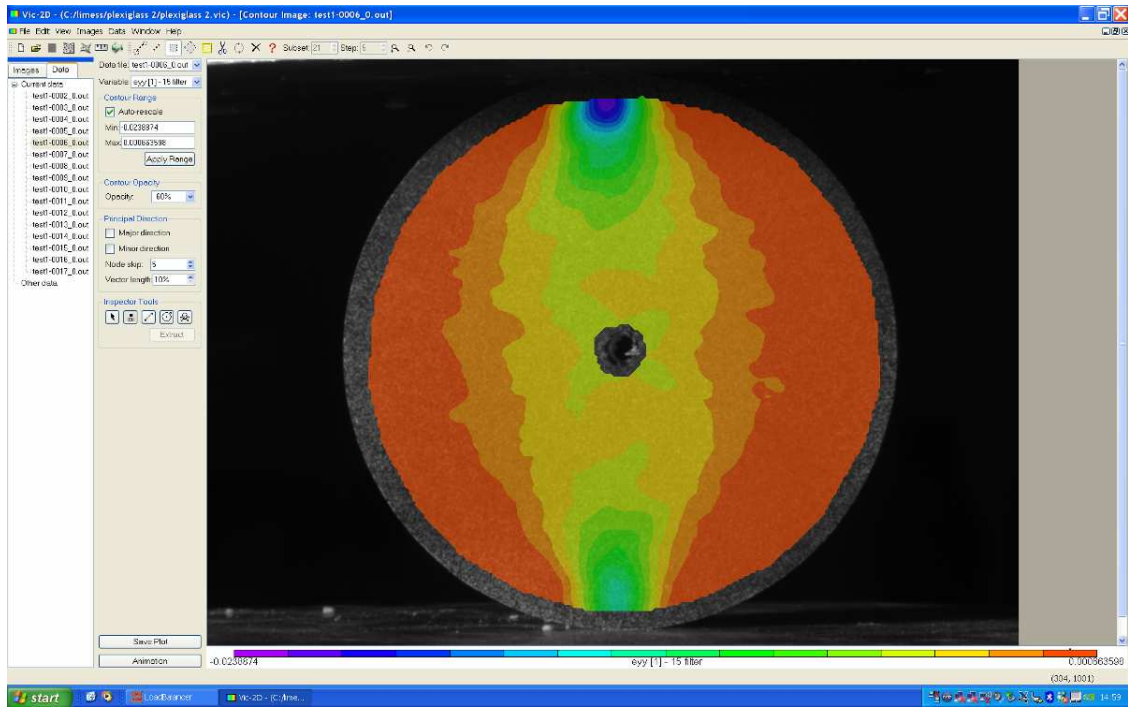
Εικόνα 6-45: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 3^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



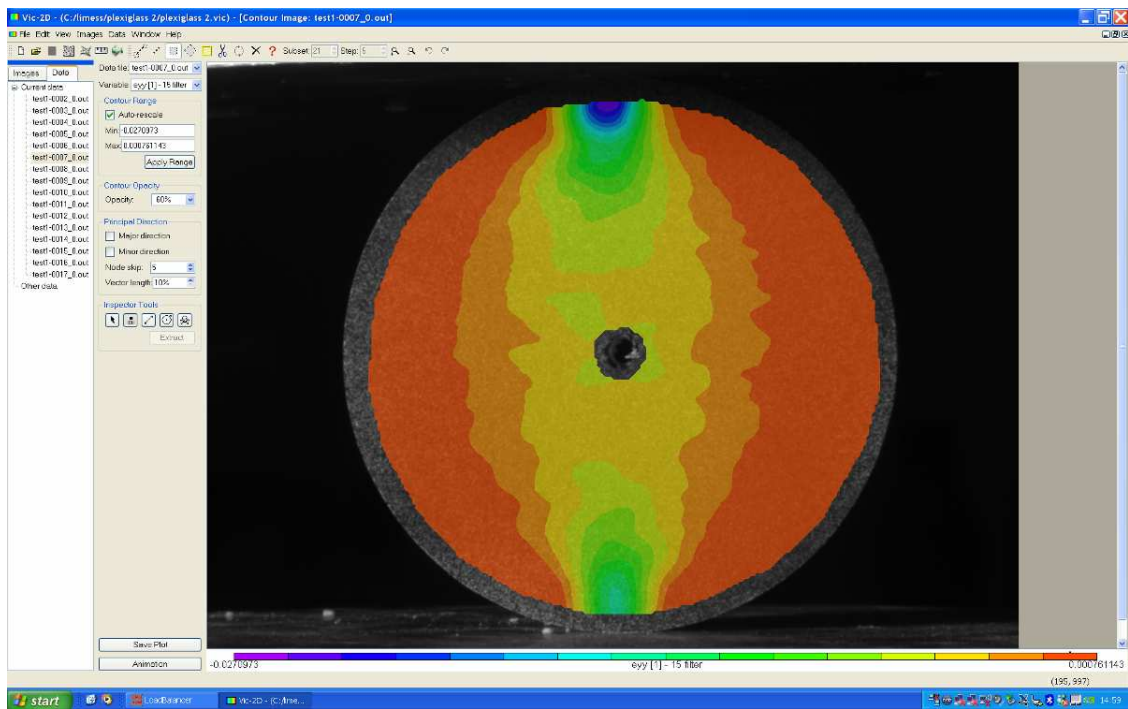
Εικόνα 6-46: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 4^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



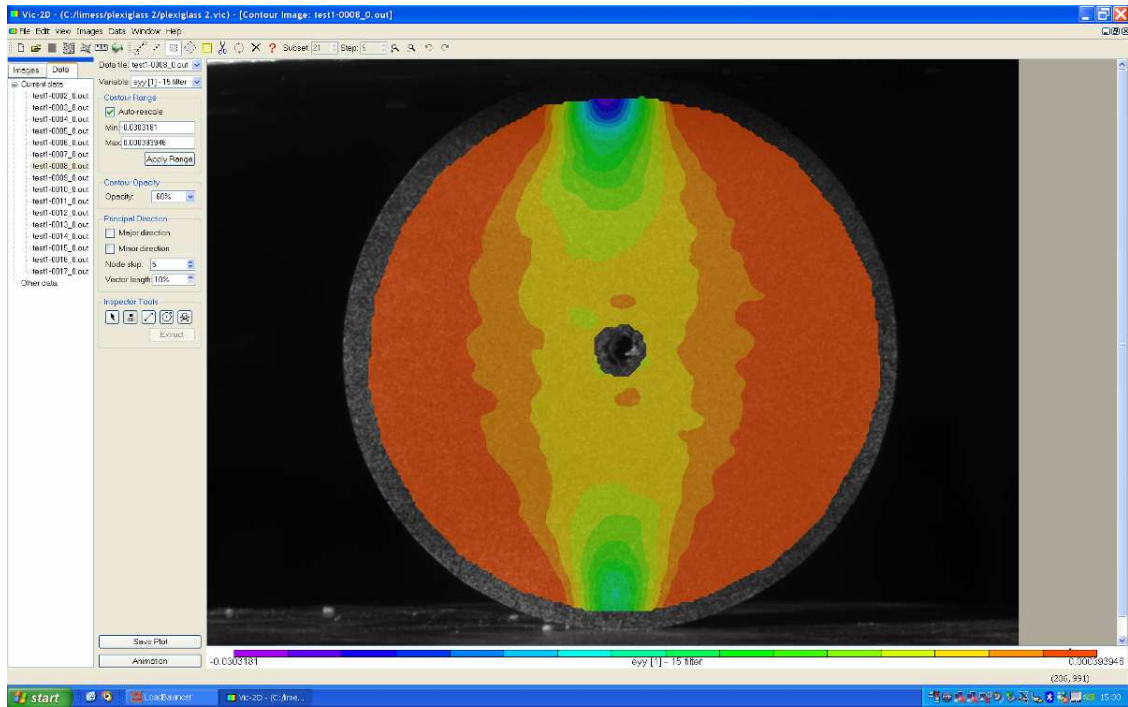
Εικόνα 6-47: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 5^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



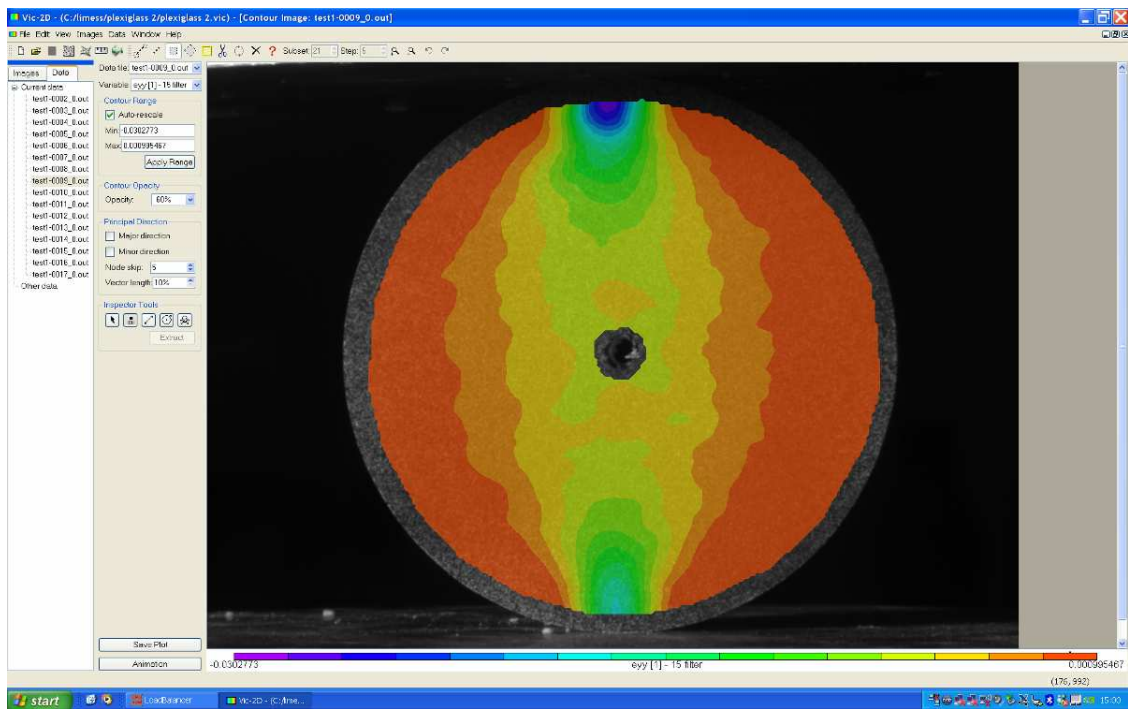
Εικόνα 6-48: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 6^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



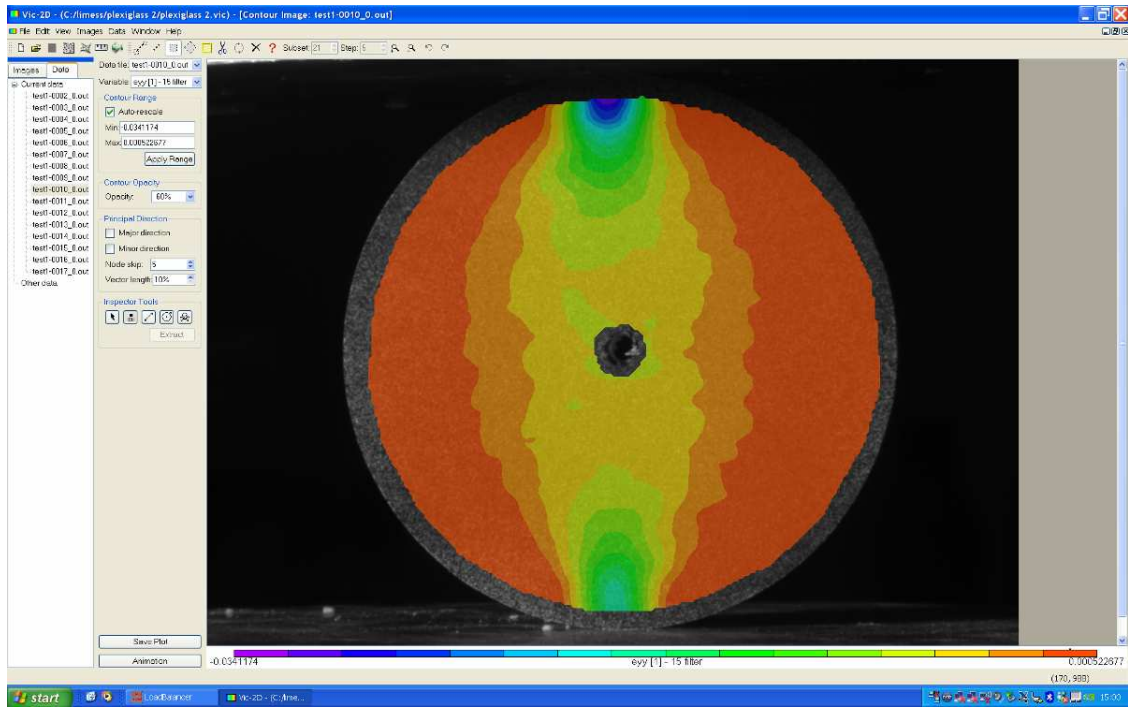
Εικόνα 6-49: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



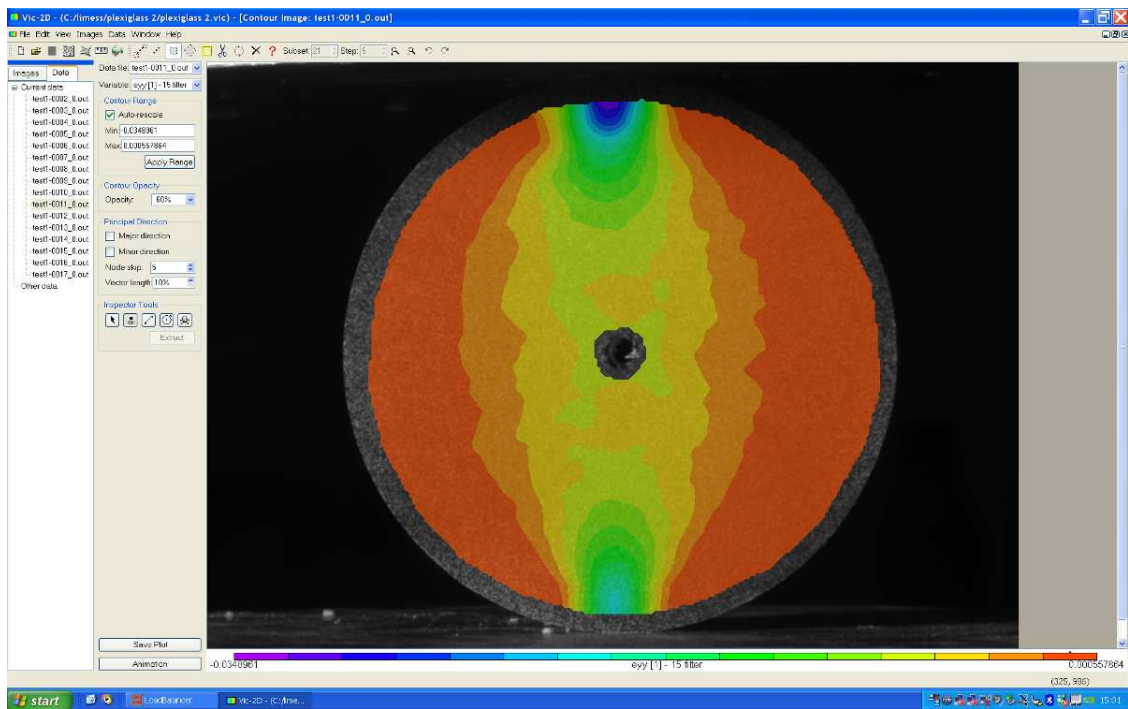
Εικόνα 6-50: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



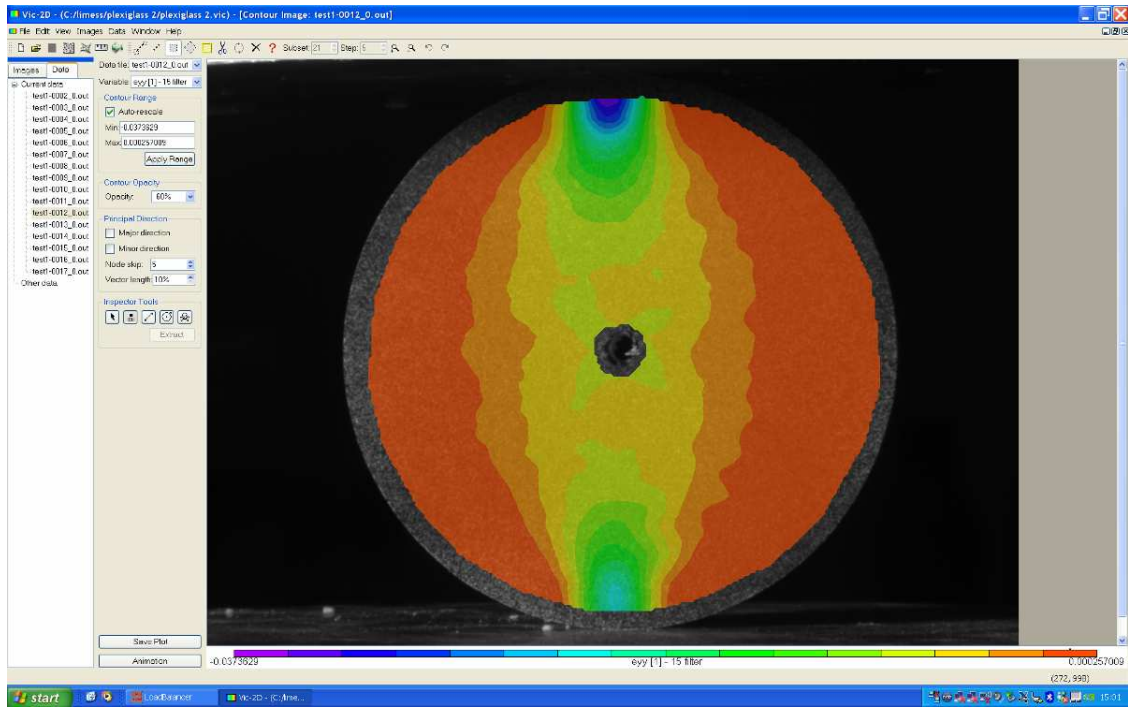
Εικόνα 6-51: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



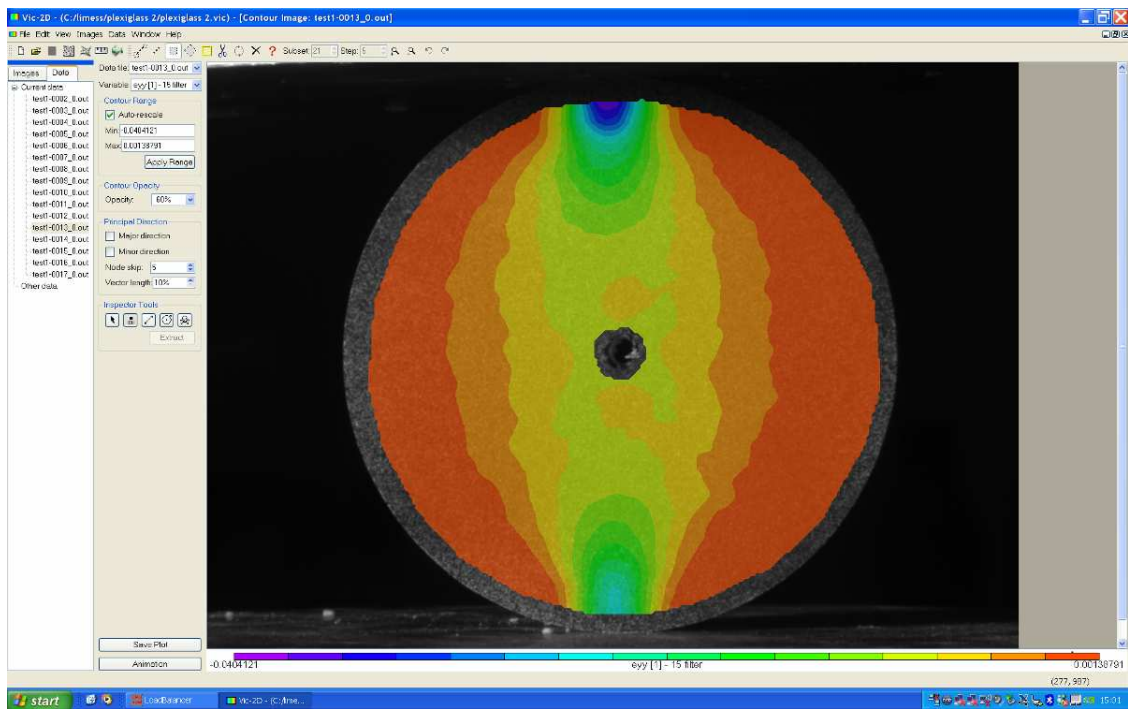
Εικόνα 6-52: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 10^{15} παραμορφωμένης εικόνας.



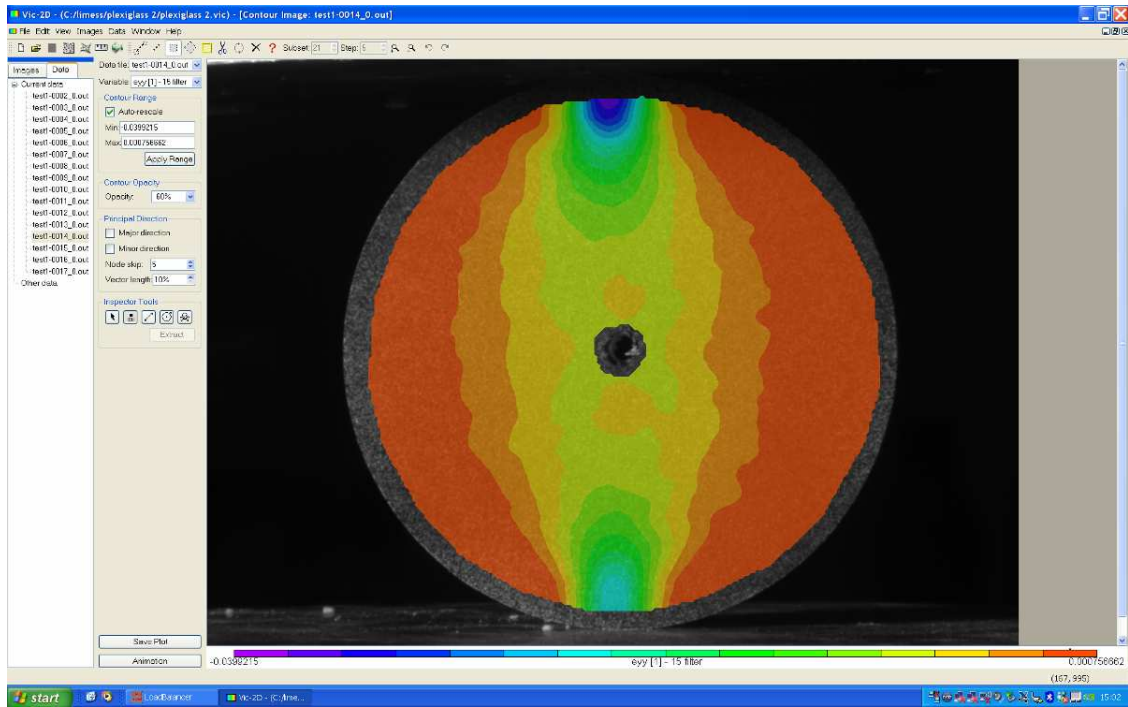
Εικόνα 6-53: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 11^{15} παραμορφωμένης εικόνας.



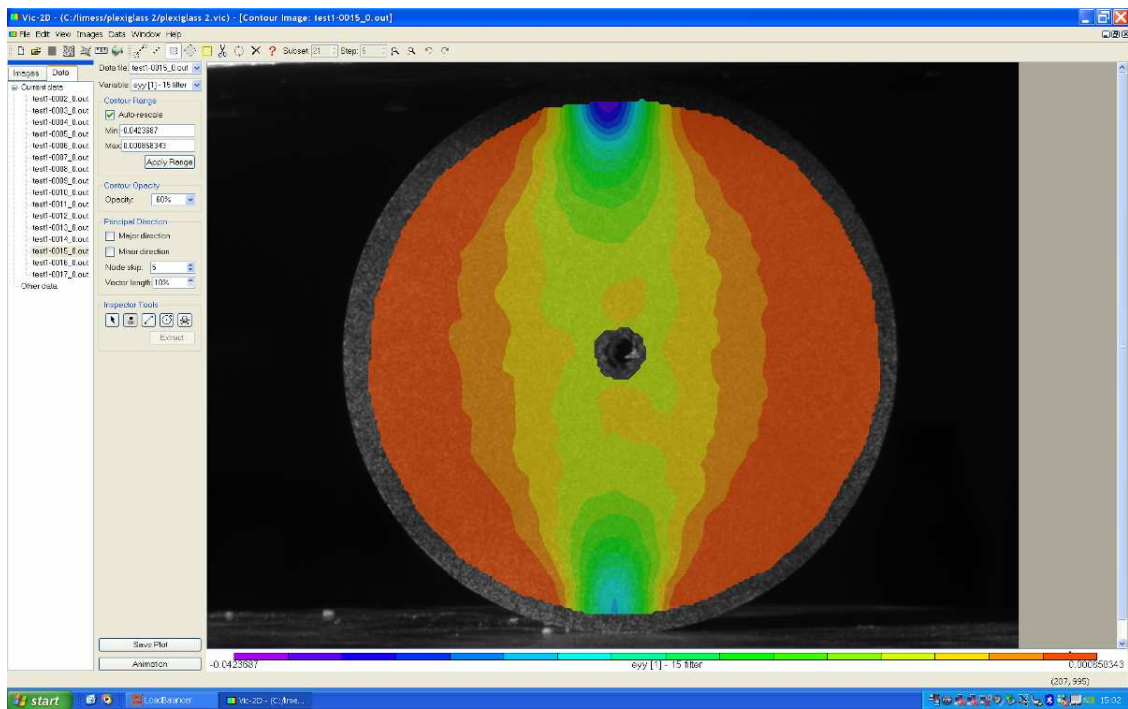
Εικόνα 6-54: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 12^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-55: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 13^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-56: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 14^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

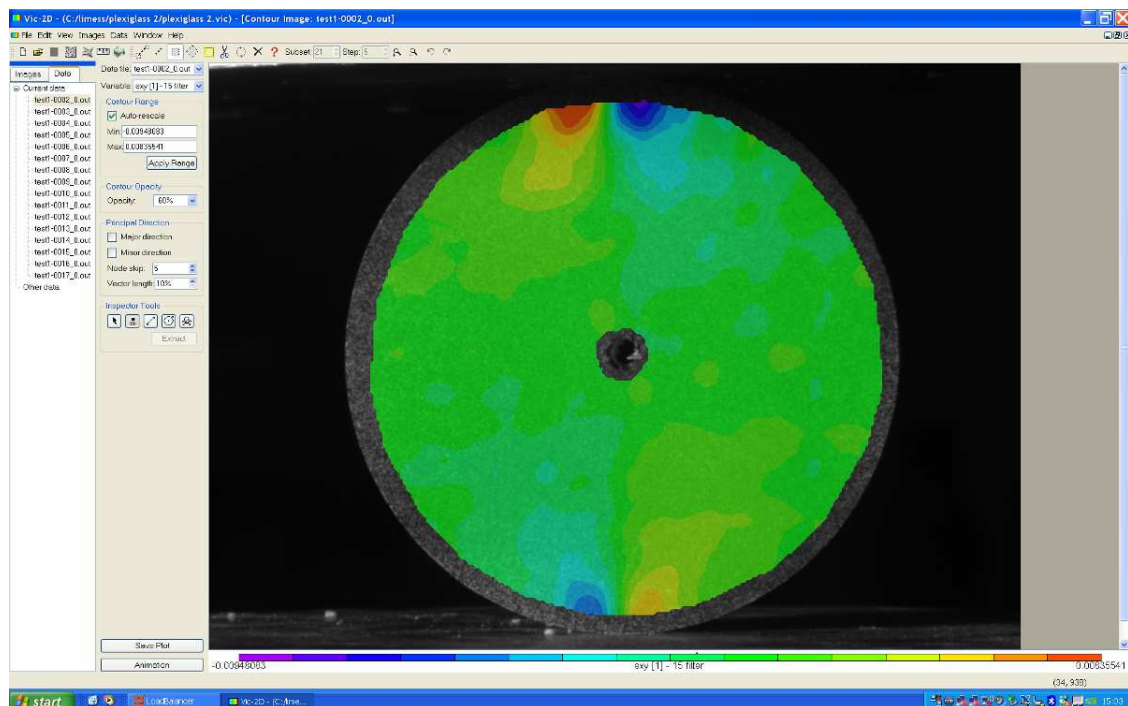


Εικόνα 6-57: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις e_{yy} της 15^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

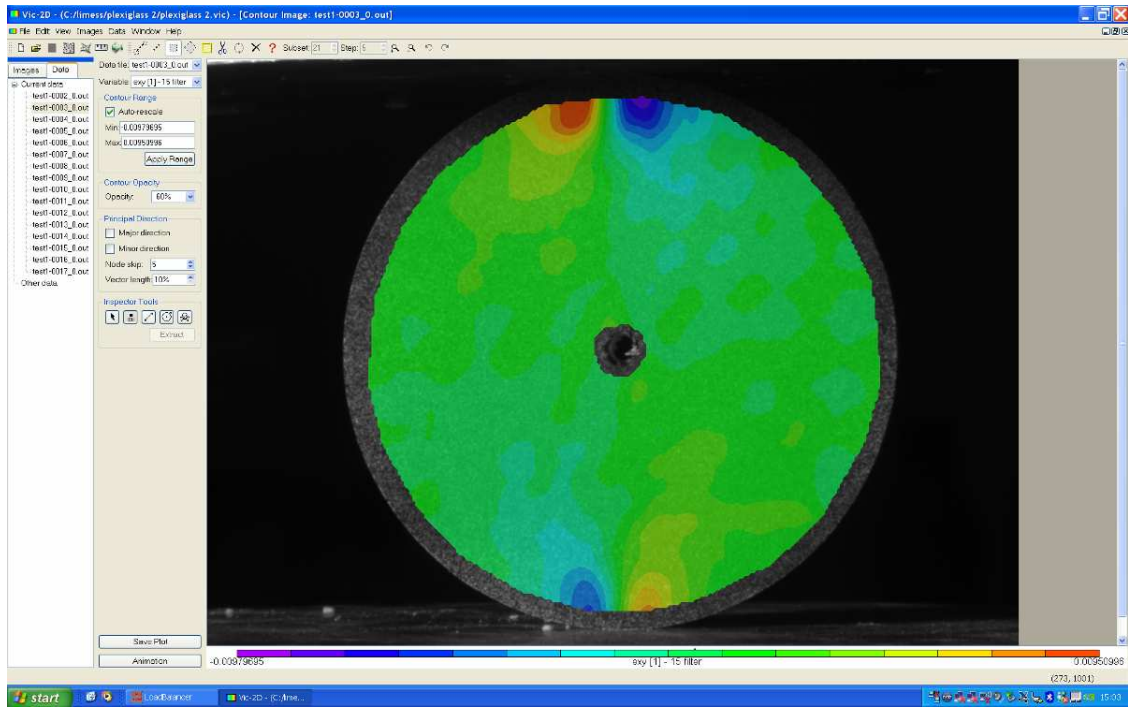
Τα παραπάνω σχήματα των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{yy} εμφανίζουν μπλε και μωβ χρώματα στα σημεία επαφής και θερμότερα χρώματα συμμετρικά γύρω από αυτά. Παρατηρείται, ακόμη, ότι οι μωβ περιοχές εμφανίζουν κατ' απόλυτο μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης από τις κόκκινες περιοχές. Αυτό σημαίνει ότι οι ψυχρές περιοχές δέχονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις κατά την y διεύθυνση απ' ότι οι πιο θερμές περιοχές, πράγμα που είναι λογικό καθώς τα σημεία επαφής με τις πλάκες της μηχανής βρίσκονται στις ψυχρές περιοχές. Τέλος, η απόλυτα συμμετρική διάταξη των ισარიθμικών καμπύλων γύρω από τα σημεία επαφής και η σταδιακή εμφάνιση κίτρινου χρώματος στο κέντρο της επιφάνειας, υποδεικνύουν ότι το δοκίμιο θα δεχθεί εντελώς κάθετη θραύση.

6.2.5. Το Πεδίο των Διαμηθικών Παραμορφώσεων ϵ_{xy}

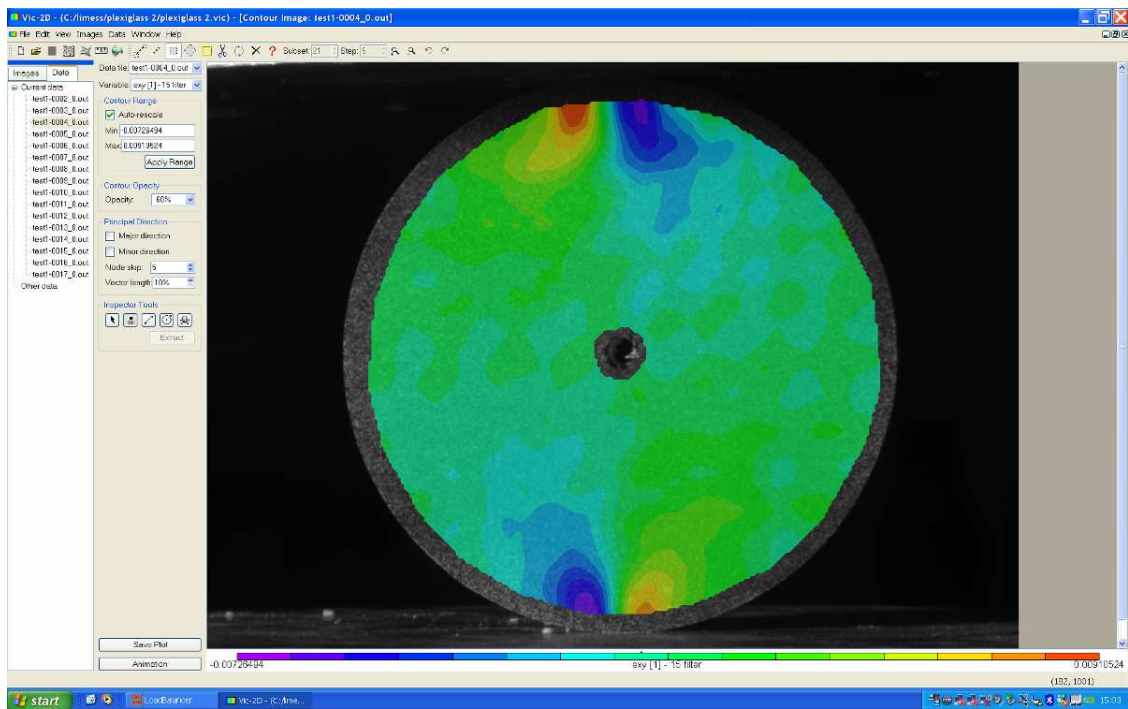
Στη συγκεκριμένη υποενότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις διαμηθικές παραμορφώσεις. Παρακάτω παρατίθενται τα σχήματα που απεικονίζουν το πεδίο των διαμηθικών παραμορφώσεων ϵ_{xy} :



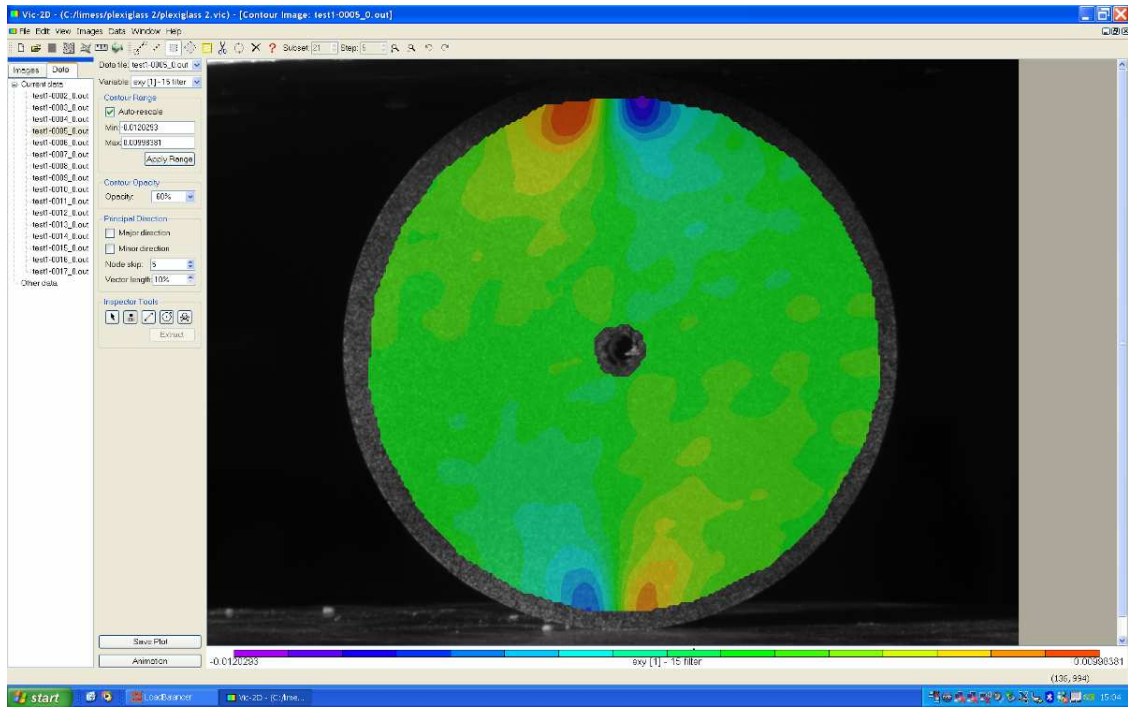
Εικόνα 6-58: Το πεδίο των διαμηθικών παραμορφώσεων ϵ_{xy} της 2^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



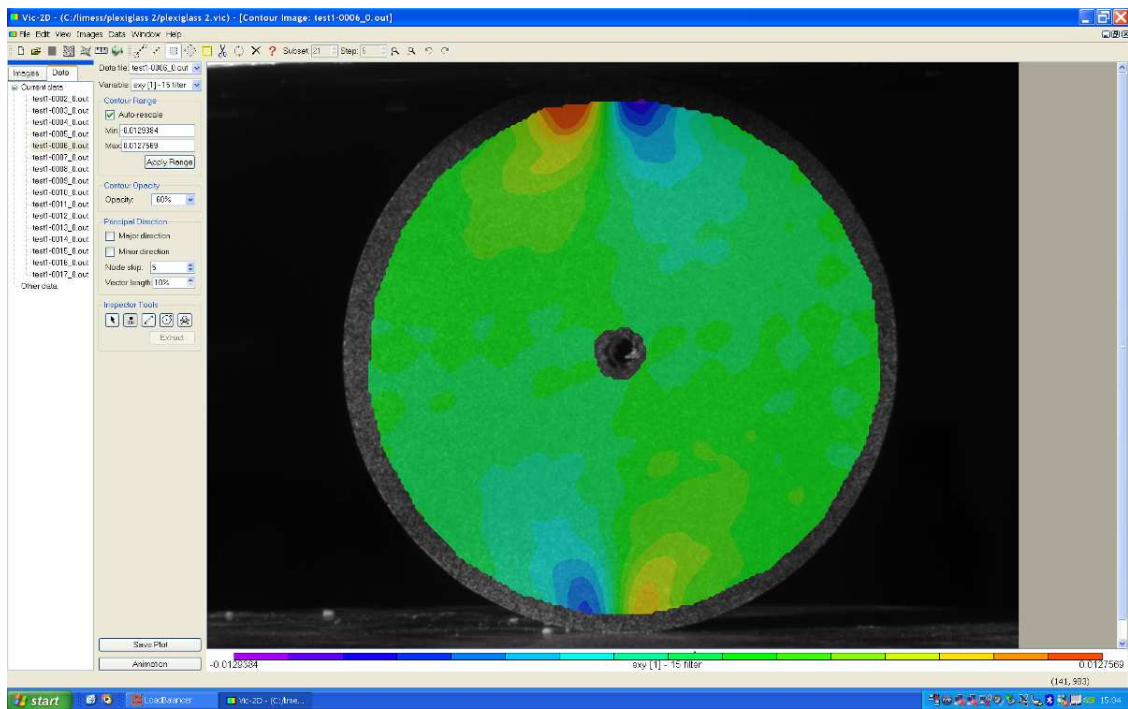
Εικόνα 6-59: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 3^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



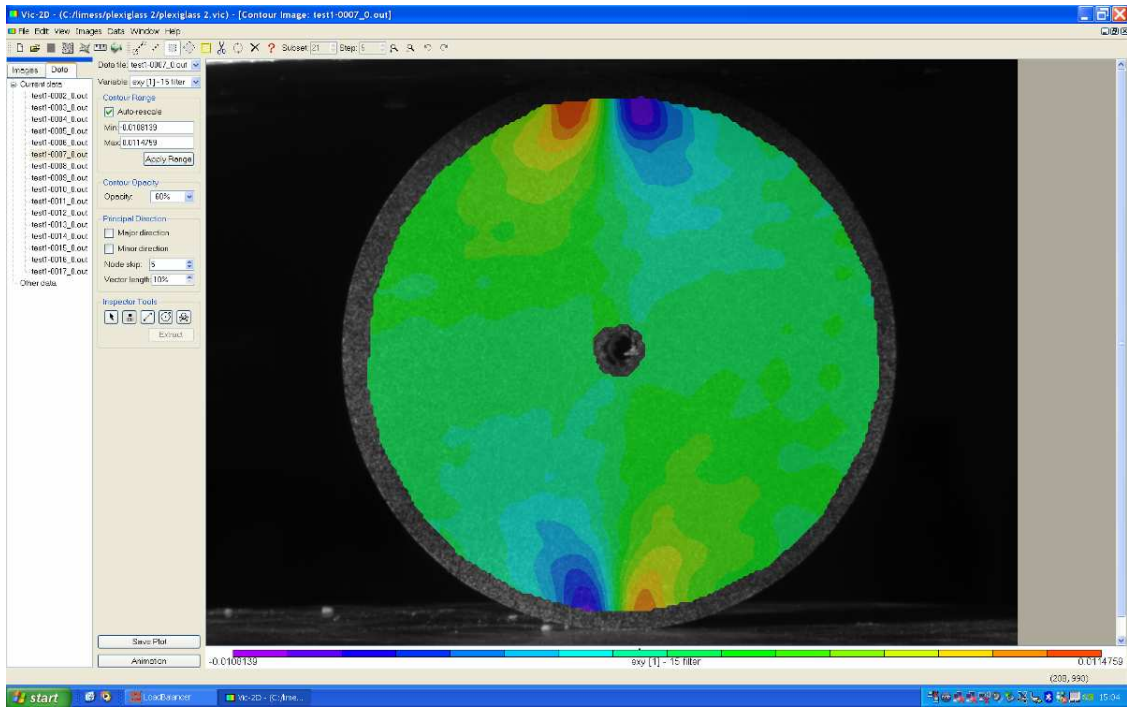
Εικόνα 6-60: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 4^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



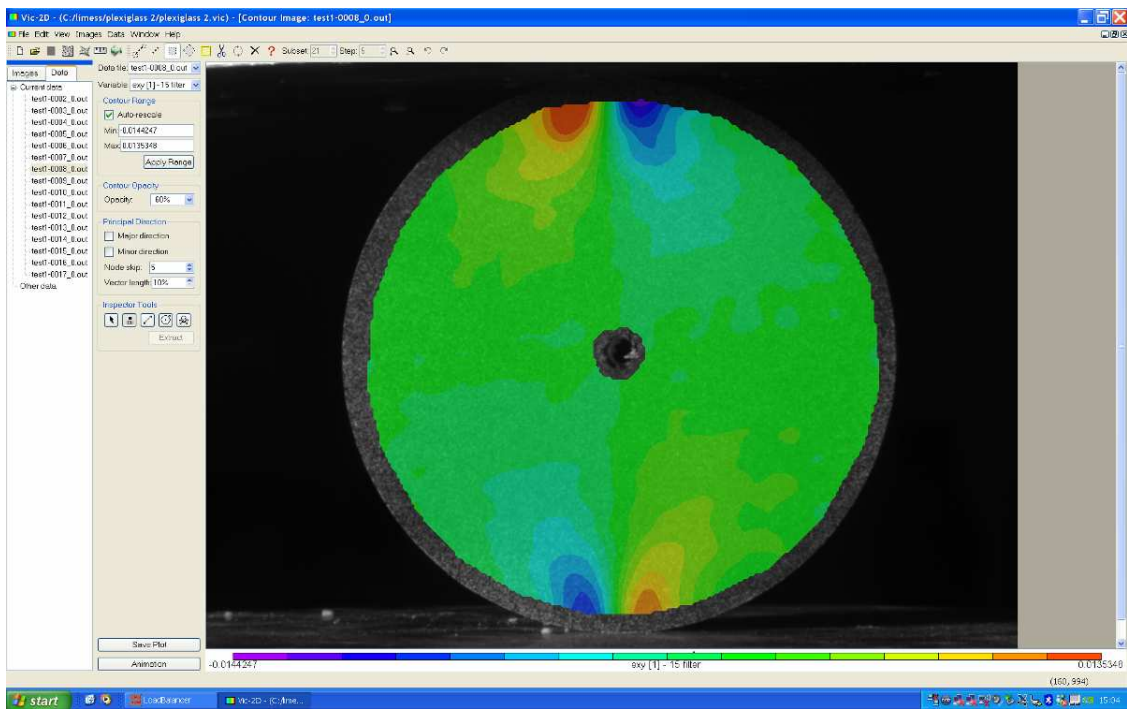
Εικόνα 6-61: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 5^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



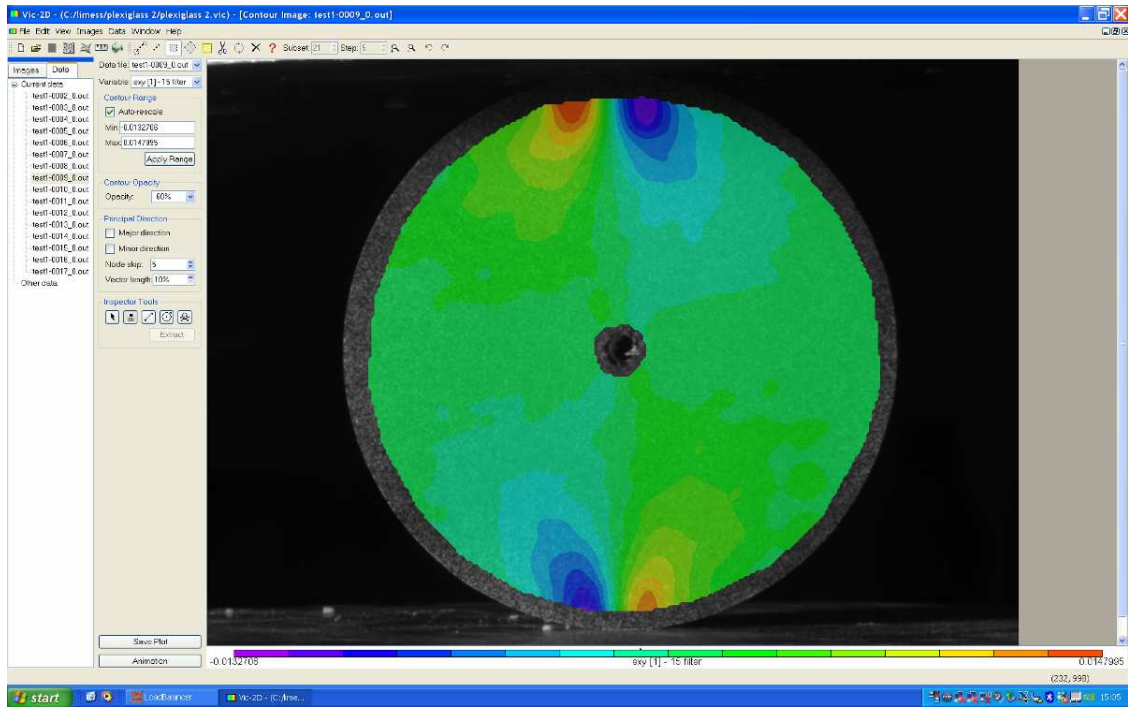
Εικόνα 6-62: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 6^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



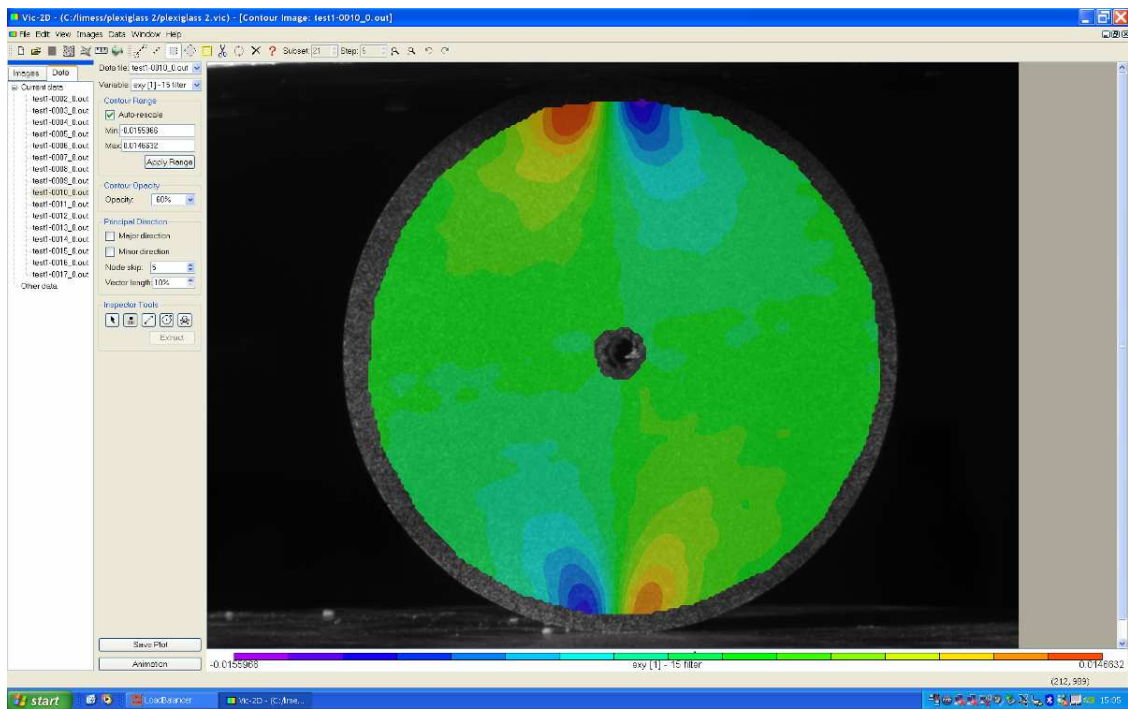
Εικόνα 6-63: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



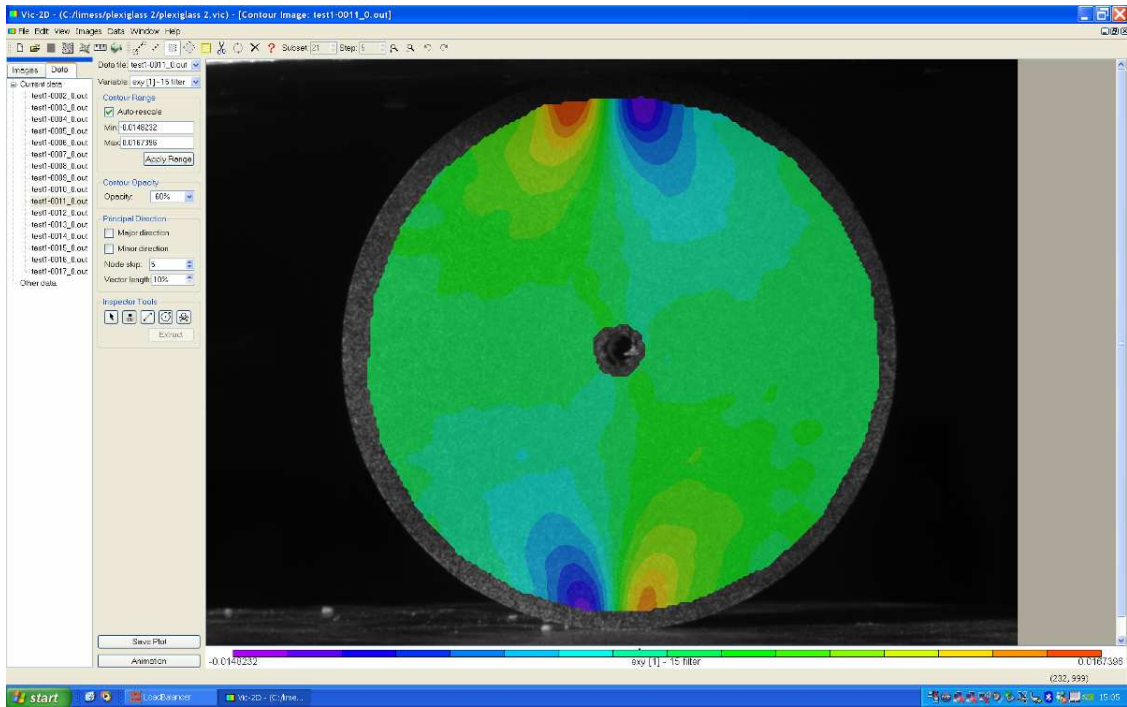
Εικόνα 6-64: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



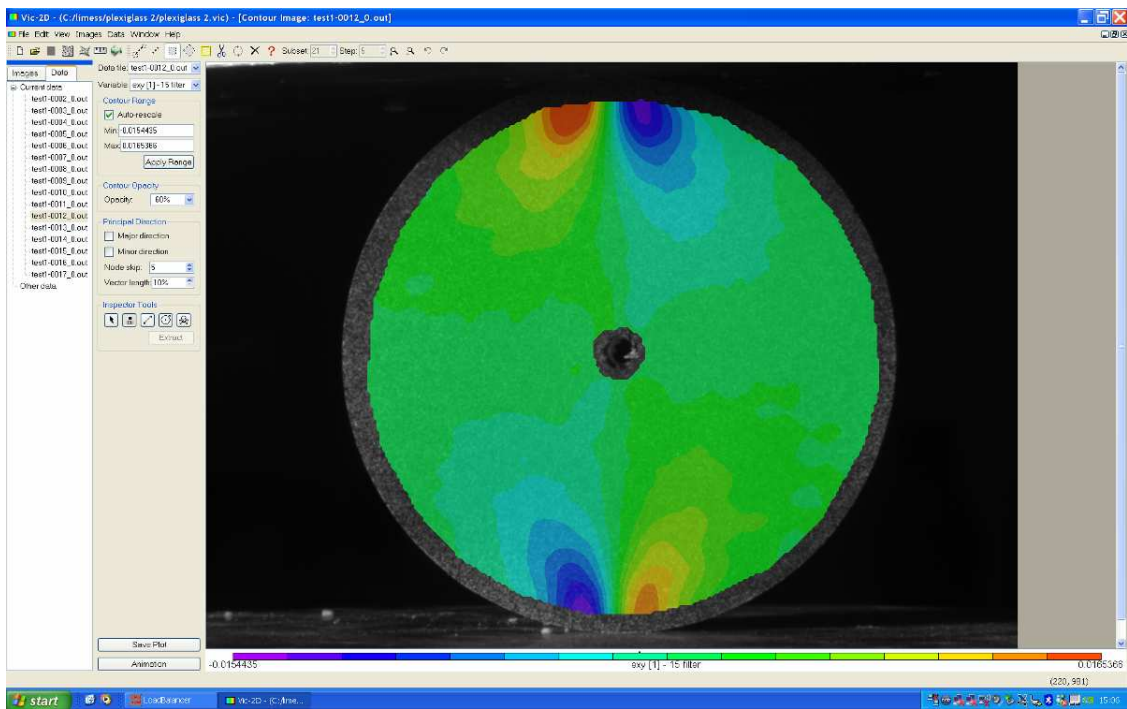
Εικόνα 6-65: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



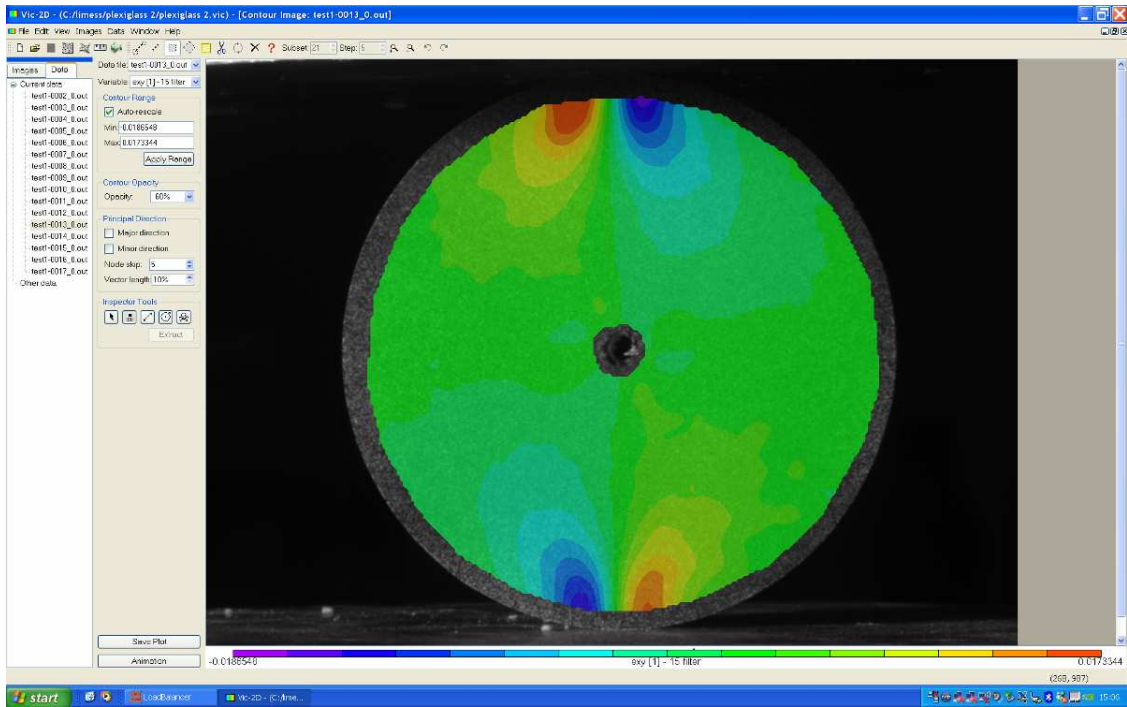
Εικόνα 6-66: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 10^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



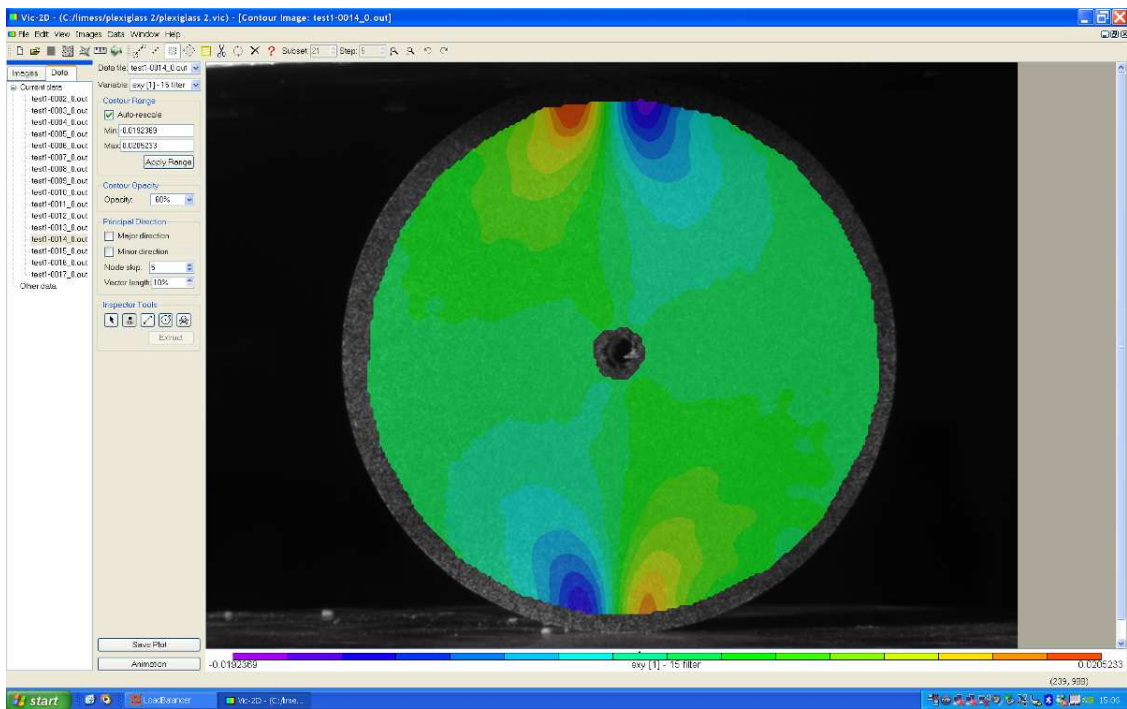
Εικόνα 6-67: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 11^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



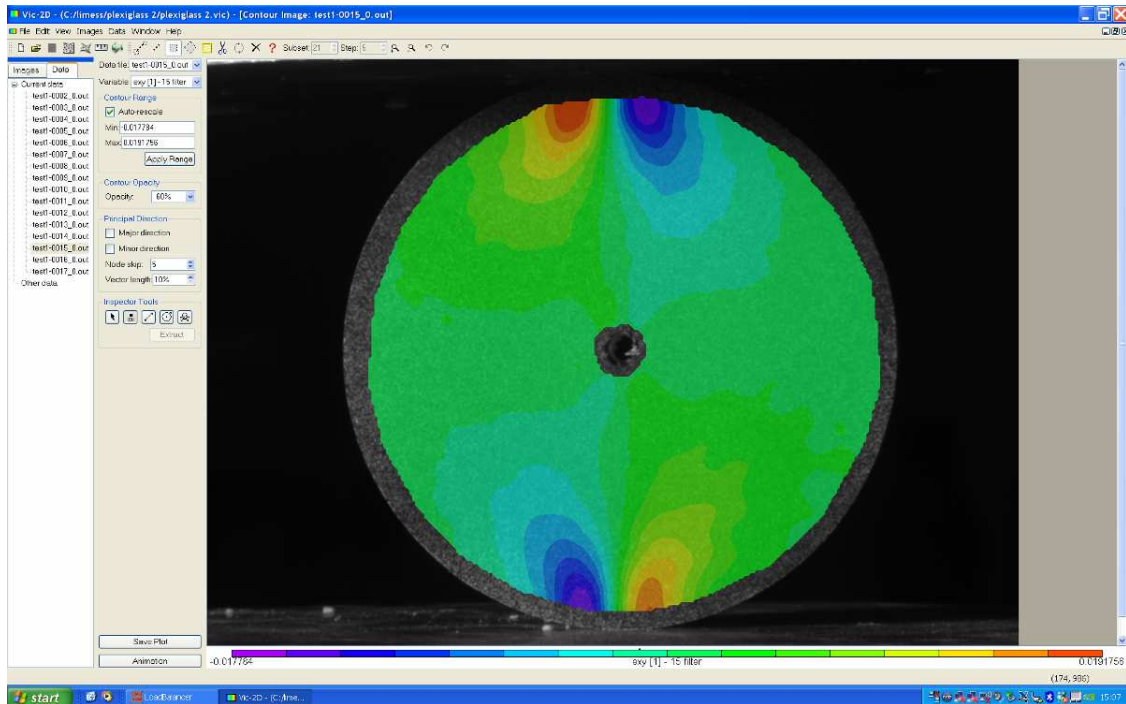
Εικόνα 6-68: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 12^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-69: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 13^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-70: Το πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων e_{xy} της 14^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.



Εικόνα 6-71: Το πεδίο των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} της 15^{ης} παραμορφωμένης εικόνας.

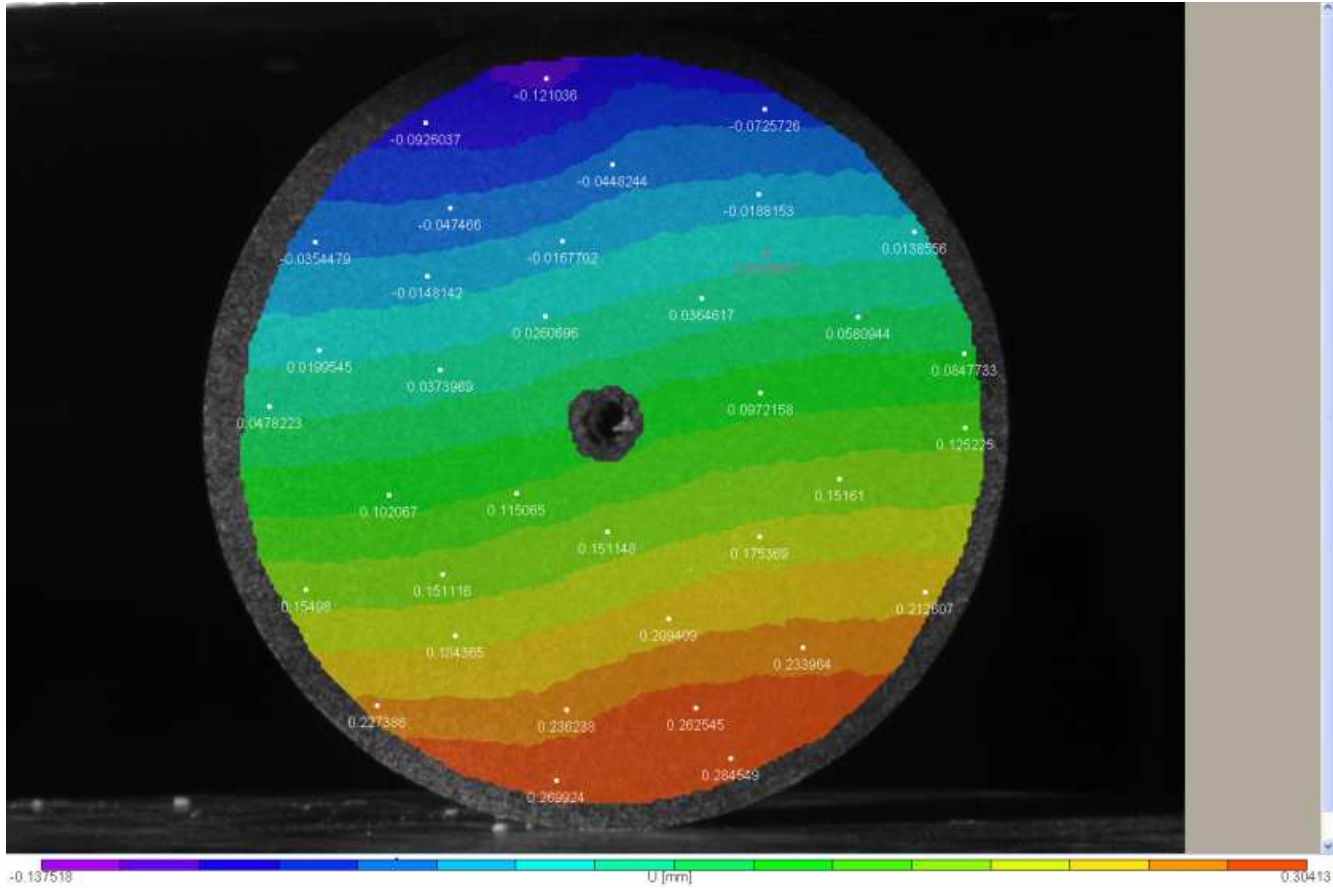
Από την προσεκτική μελέτη των παραπάνω σχημάτων των διαμηθικών παραμορφώσεων e_{xy} , εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι μωβ περιοχές αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες αρνητικές τιμές, ενώ οι κόκκινες περιοχές αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες θετικές τιμές διαμηθικής παραμόρφωσης. Στα σημεία επαφής του δείγματος με τη μηχανή θλίψης παρατηρούνται συμμετρικές συγκεντρώσεις ψυχρών και θερμών χρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, στο πάνω αριστερό σημείο επαφής του δείγματος παρατηρείται συγκεντρωση θερμών χρωμάτων, ενώ στο πάνω δεξί σημείο επαφής συγκεντρωση ψυχρών χρωμάτων. Στο κάτω μέρος του δείγματος, επίσης, παρατηρούνται τέτοιες συγκεντρώσεις ψυχρών και θερμών χρωμάτων και βρίσκονται αντιδιαμετρικά με τις συγκεντρώσεις των χρωμάτων του πάνω μέρους. Το γεγονός αυτό, καθώς και η απόλυτα συμμετρική διάταξη των ισαριθμικών καμπύλων που επικρατεί στην επιφάνεια του δείγματος, υποδηλώνει ότι το δείγμα από *plexiglass* πρόκειται να δεχθεί εντελώς κάθετη θραύση.

6.3. Σχολιασμός Αριθμητικών Αποτελεσμάτων

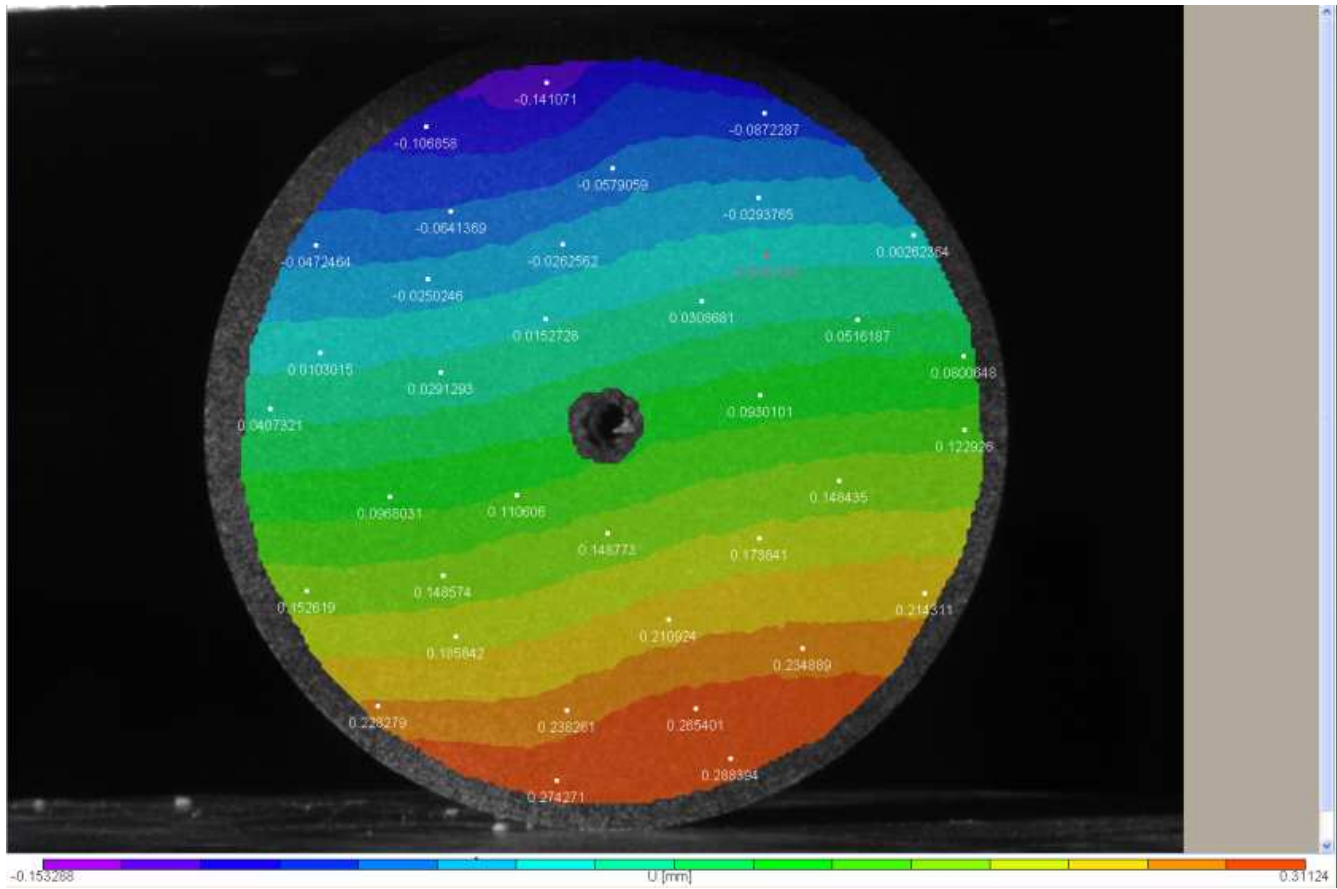
Σε αυτήν την ενότητα, σχολιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν για τις μετατοπίσεις U και V , δηλαδή εξετάζεται η συμπεριφορά των σημείων της επιφάνειας του δείγματος.

6.3.1. Τα Αριθμητικά Αποτελέσματα των Μετατοπίσεων U

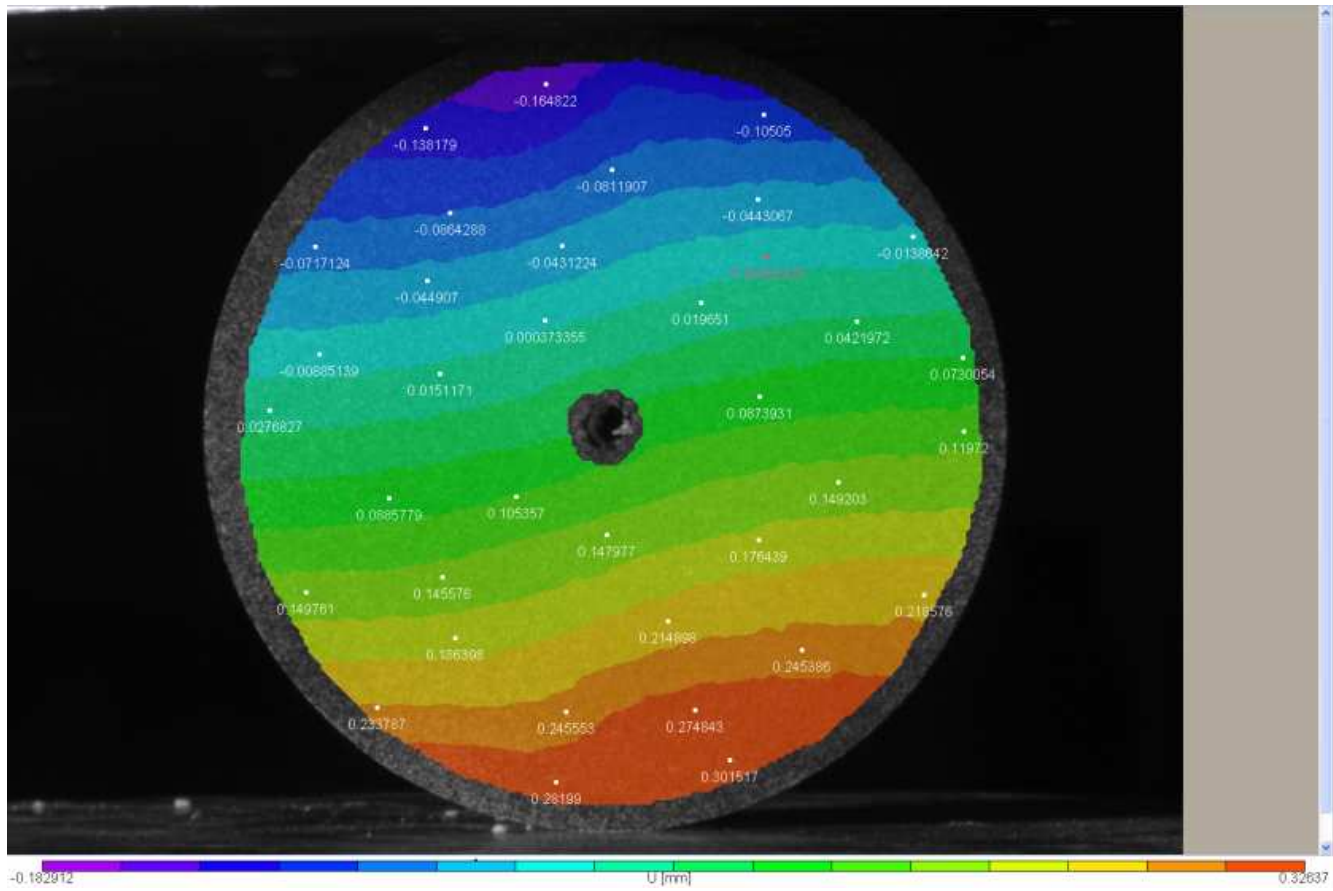
Σε αυτήν την υποενότητα, εξετάζονται τα αποτελέσματα της οριζόντιας μετακίνησης των σημείων της επιφάνειας του δείγματος. Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα σχήματα:



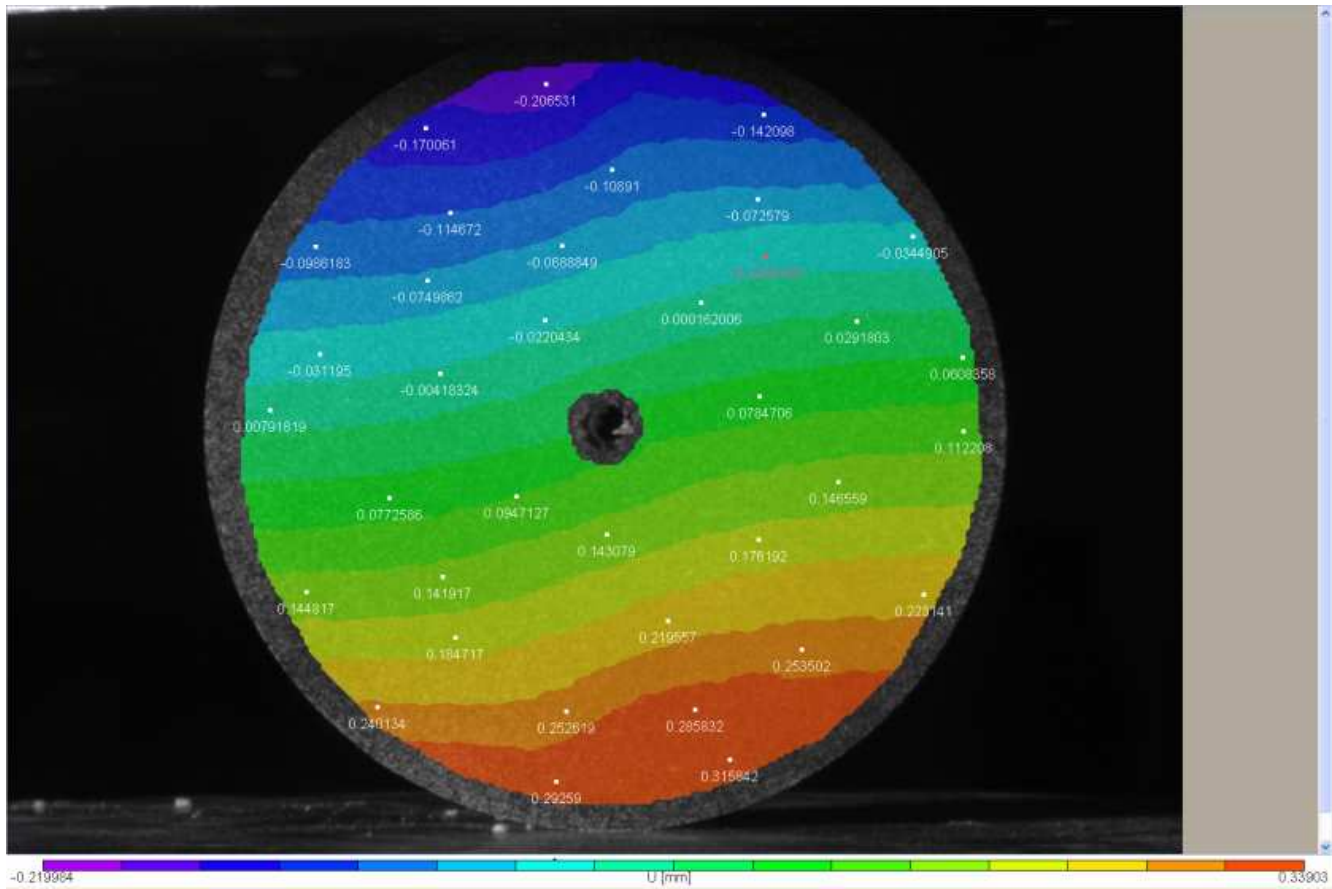
Εικόνα 6-72: Σημεία της 2^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.



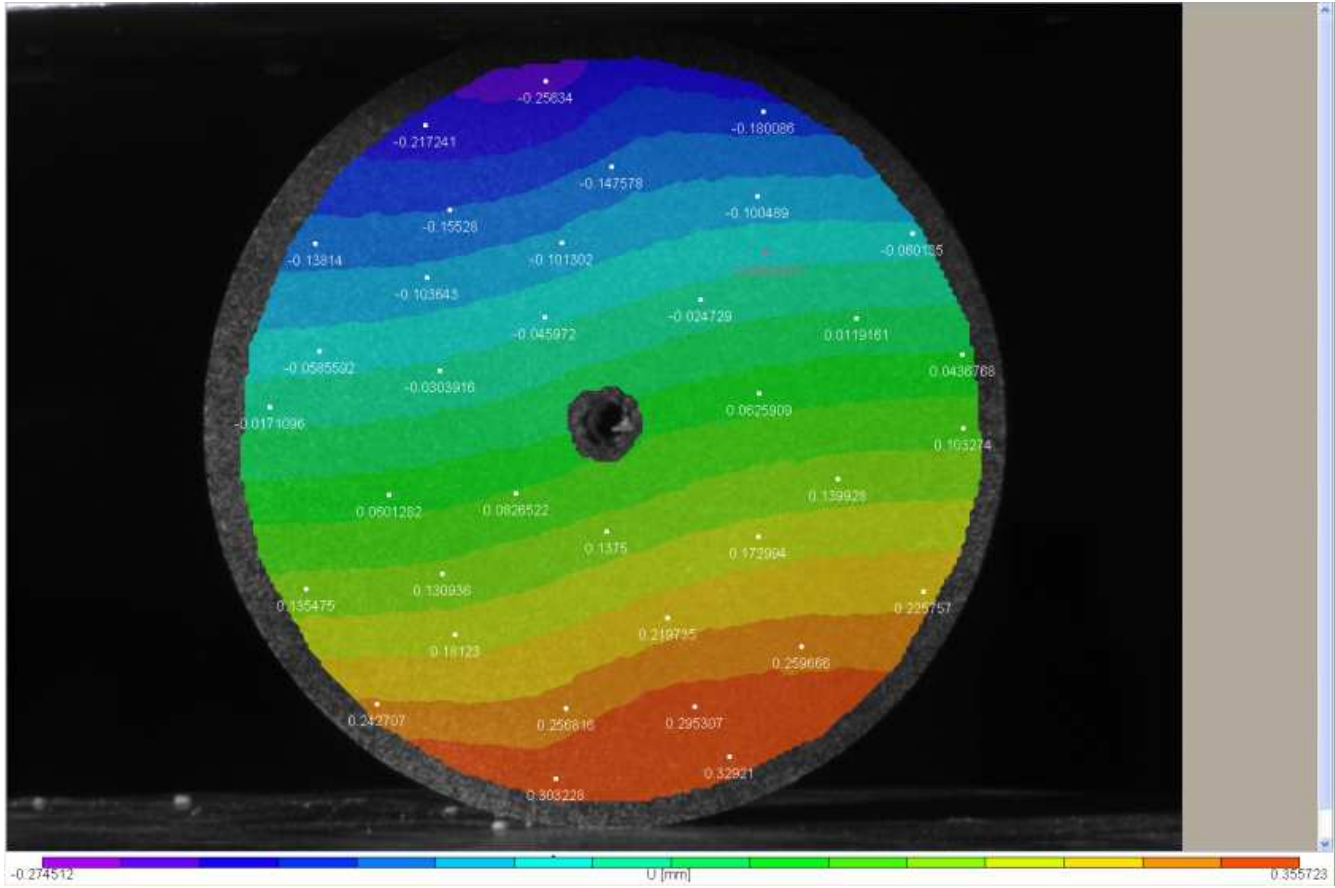
Εικόνα 6-73: Σημεία της 3^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



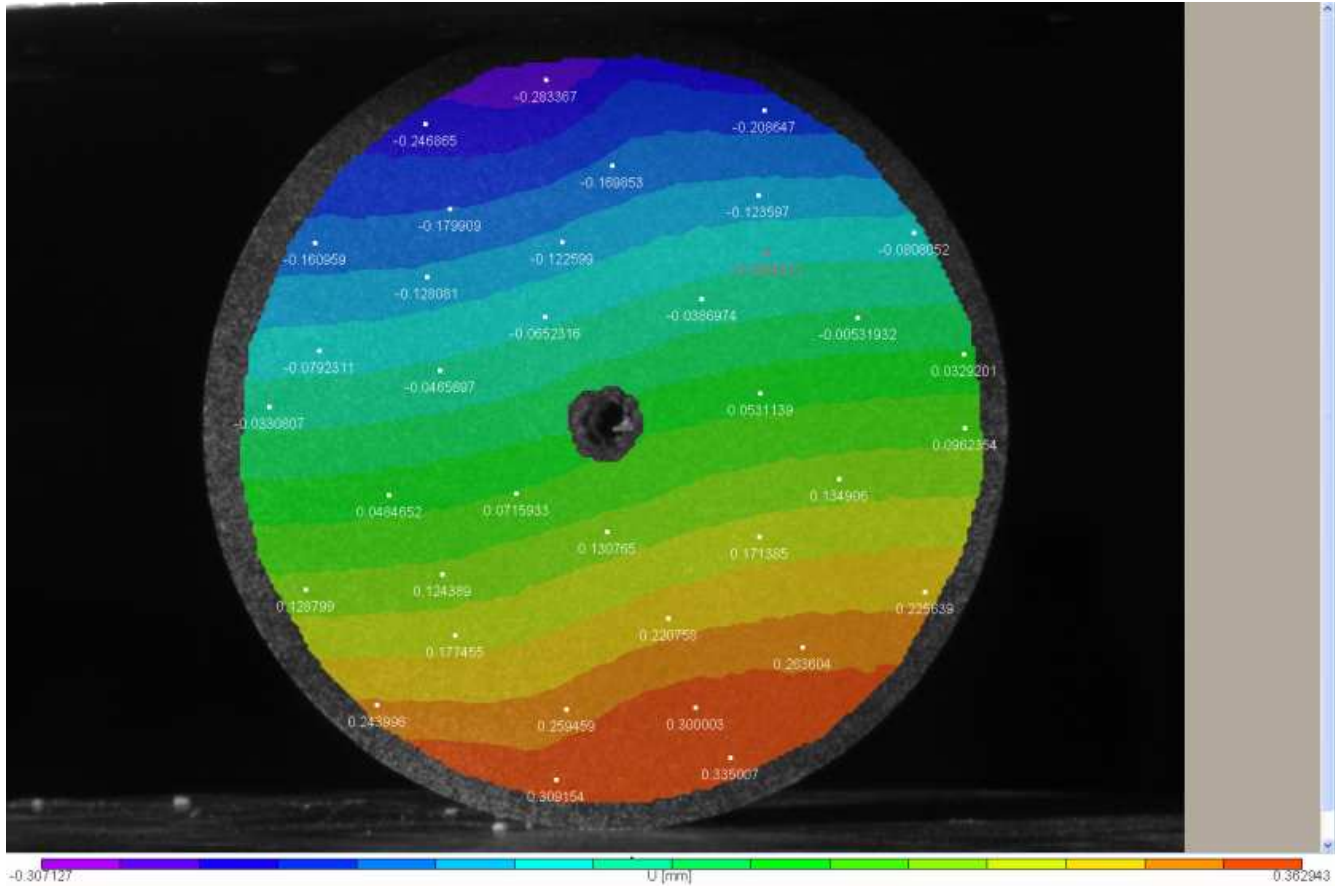
Εικόνα 6-74: Σημεία της 4^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



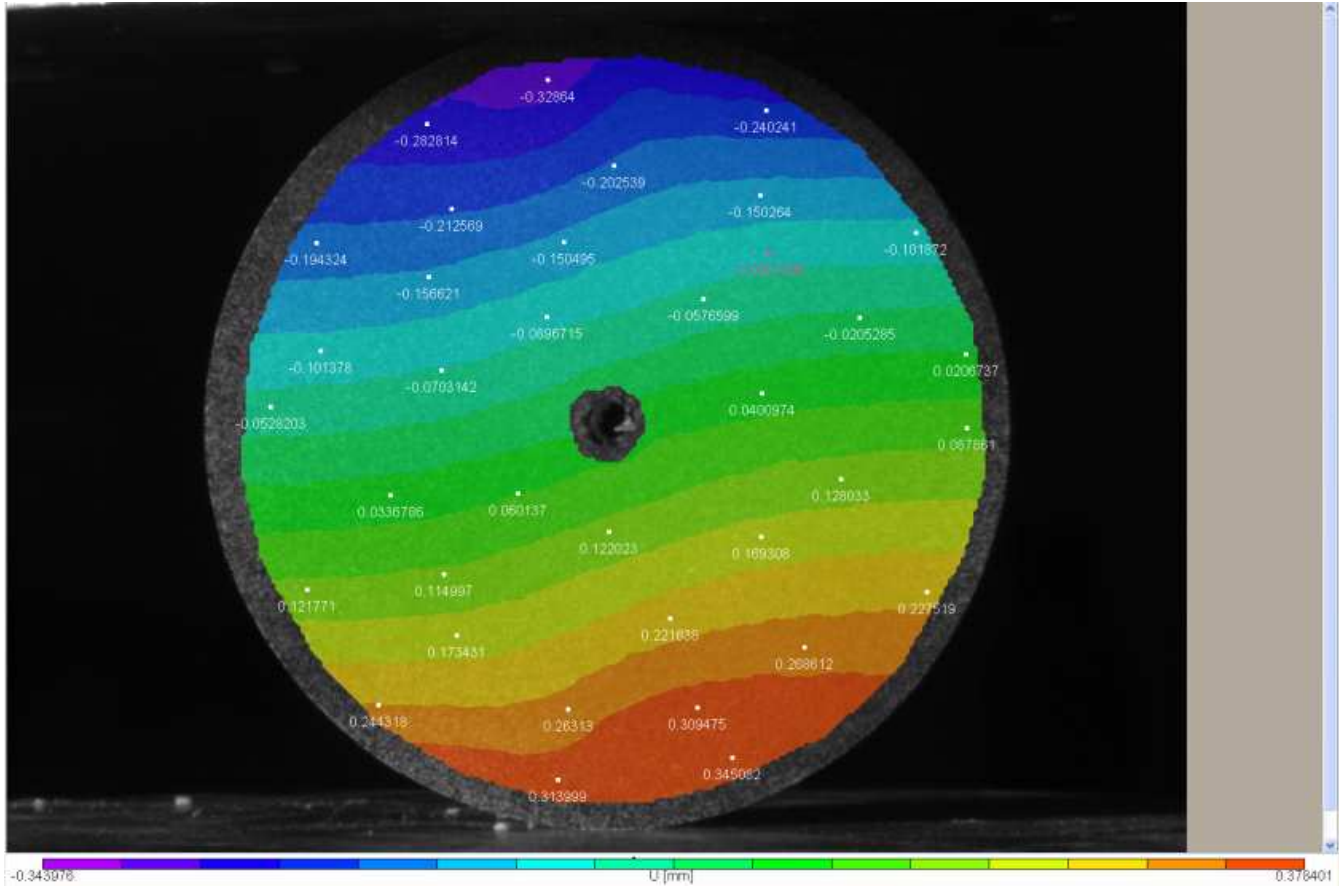
Εικόνα 6-75: Σημεία της 5^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



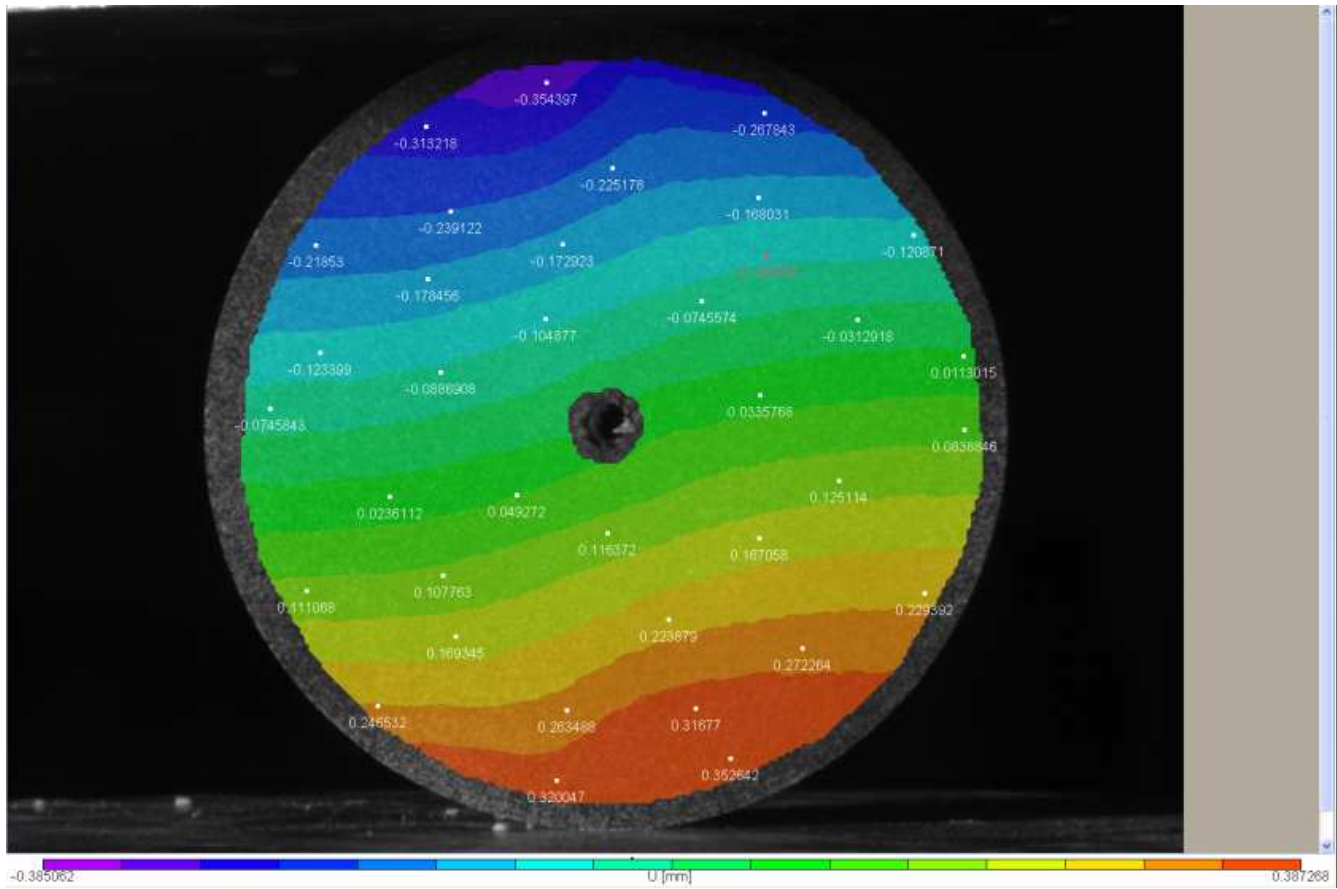
Εικόνα 6-76: Σημεία της 6^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.



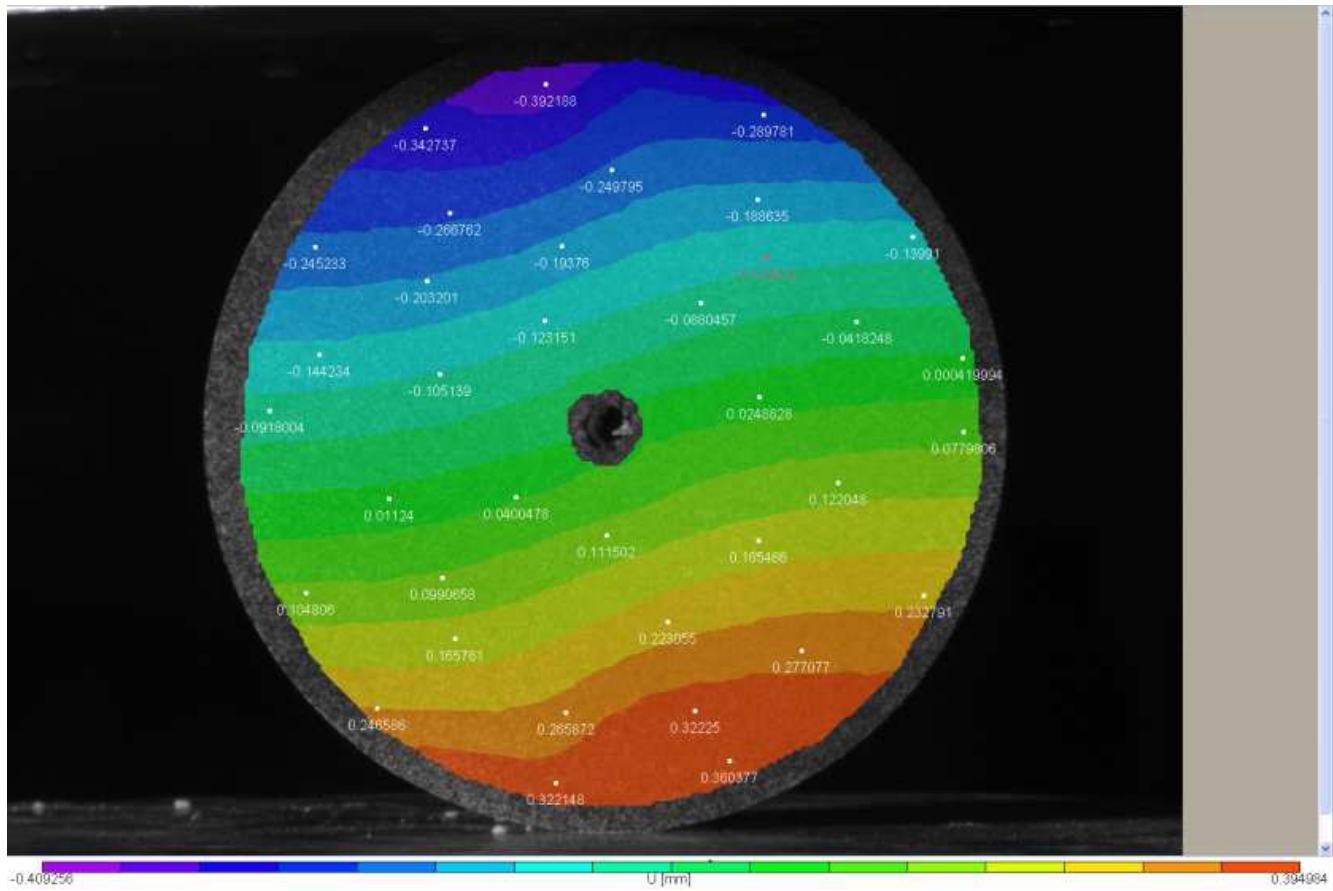
Εικόνα 6-77: Σημεία της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



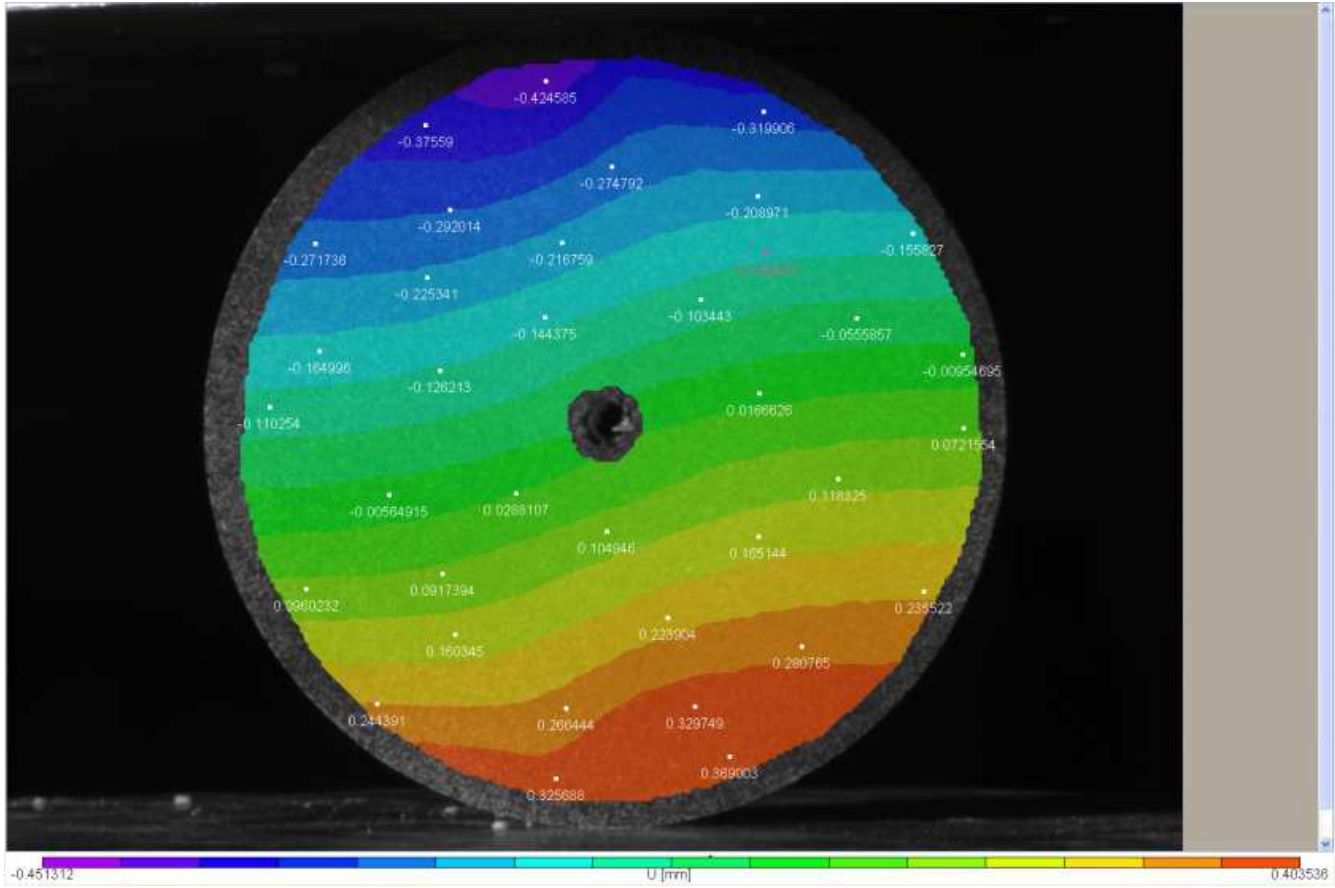
Εικόνα 6-78: Σημεία της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



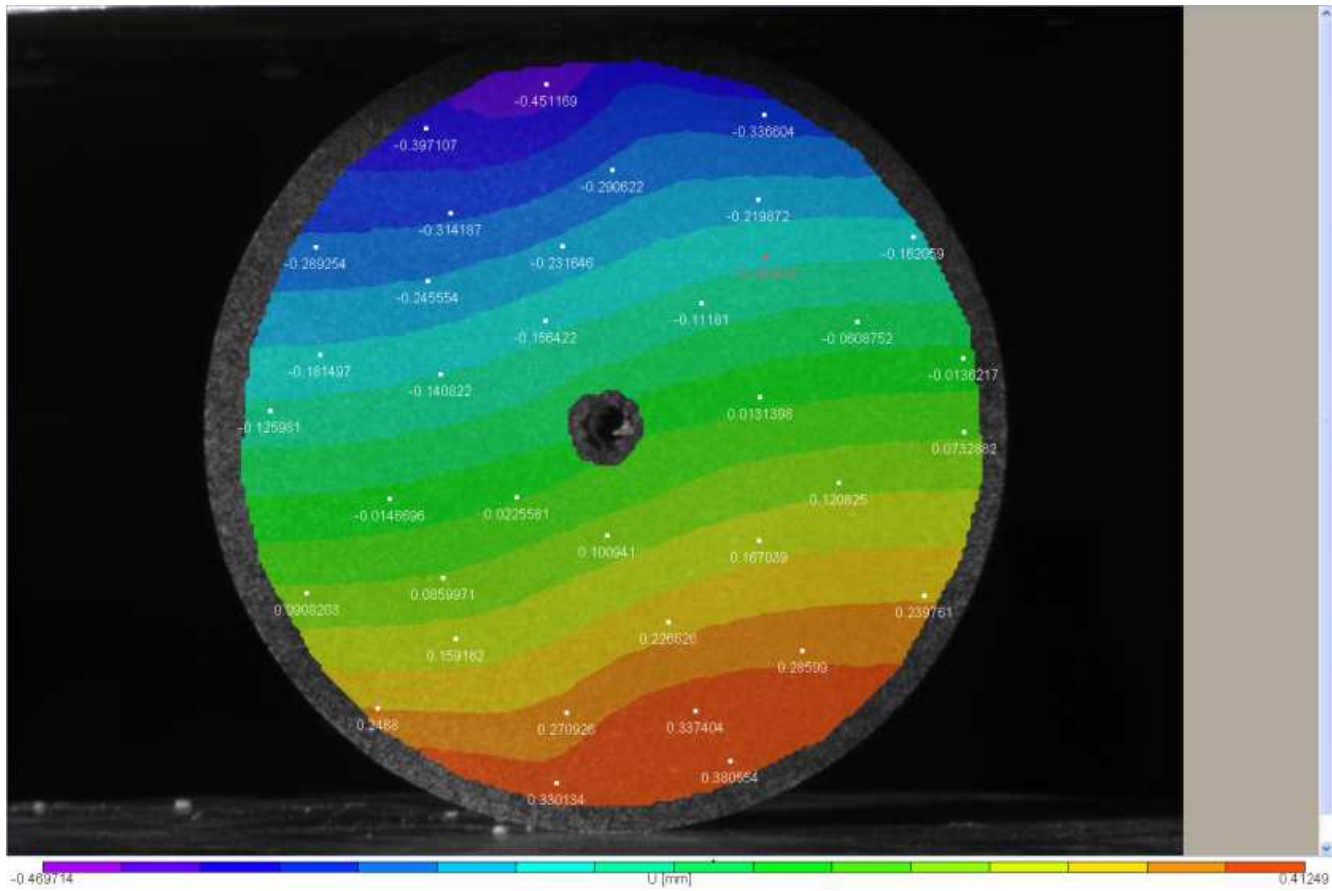
Εικόνα 6-79: Σημεία της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



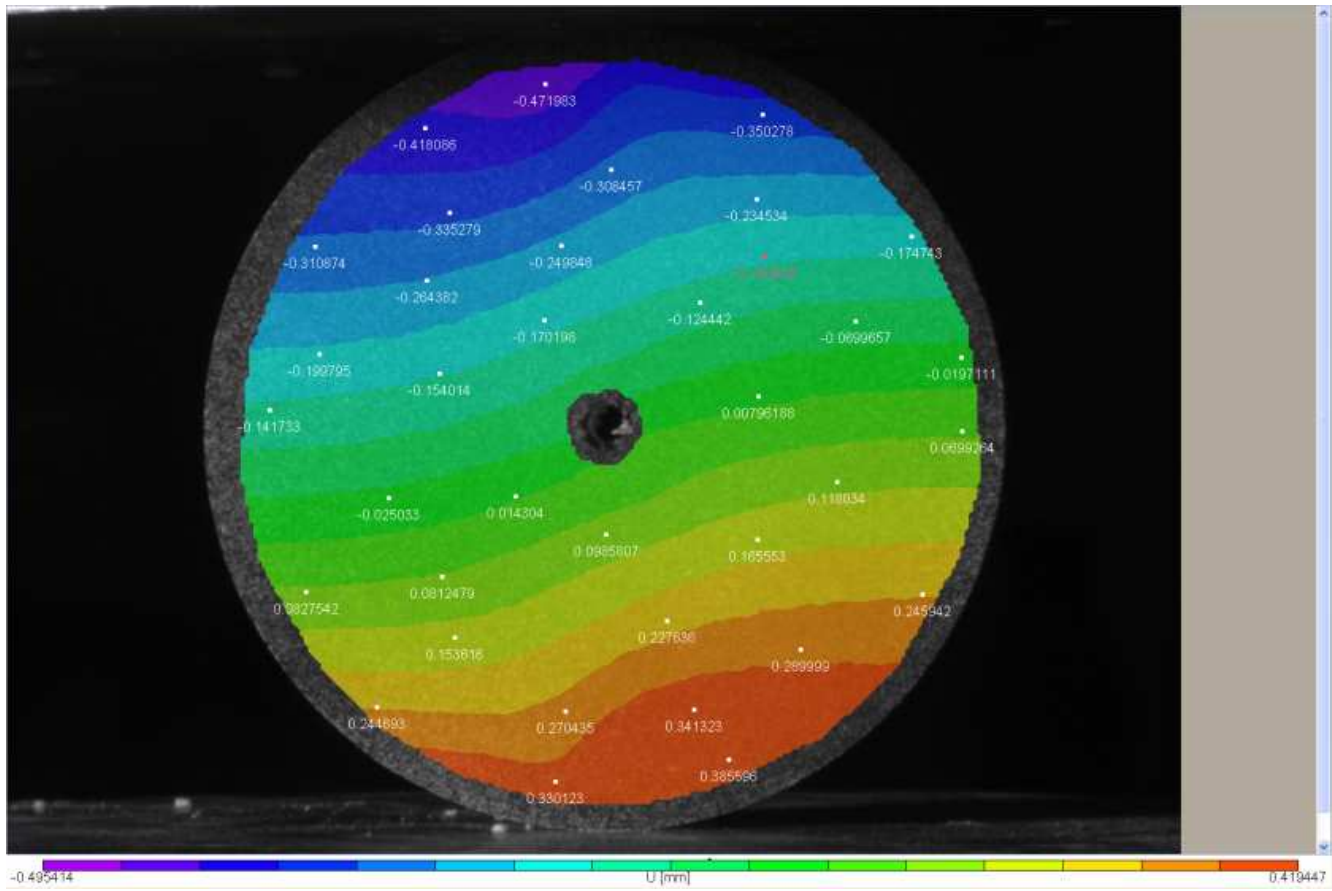
Εικόνα 6-80: Σημεία της 10^{05} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



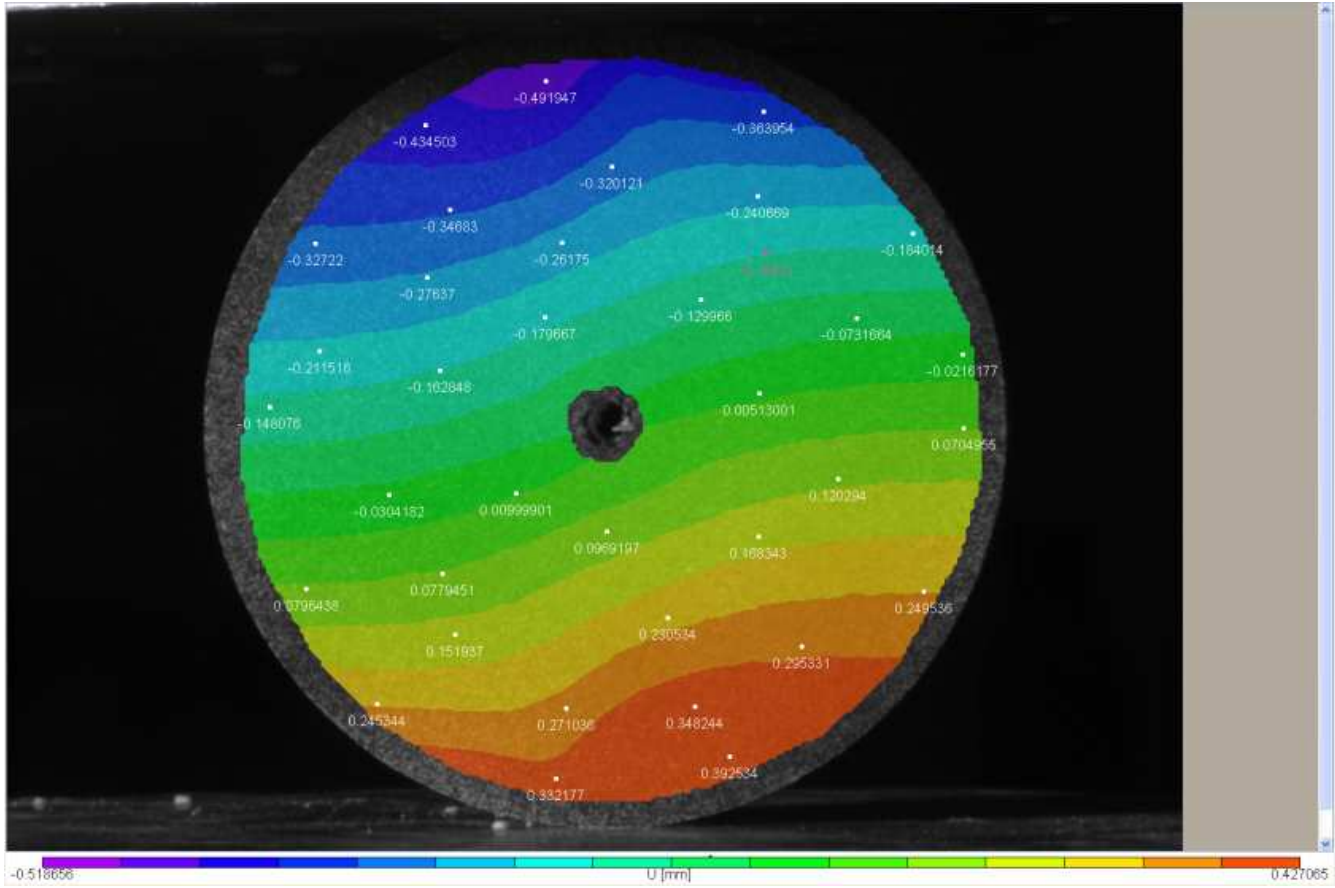
Εικόνα 6-81: Εικόνα-Σημεία της 11^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



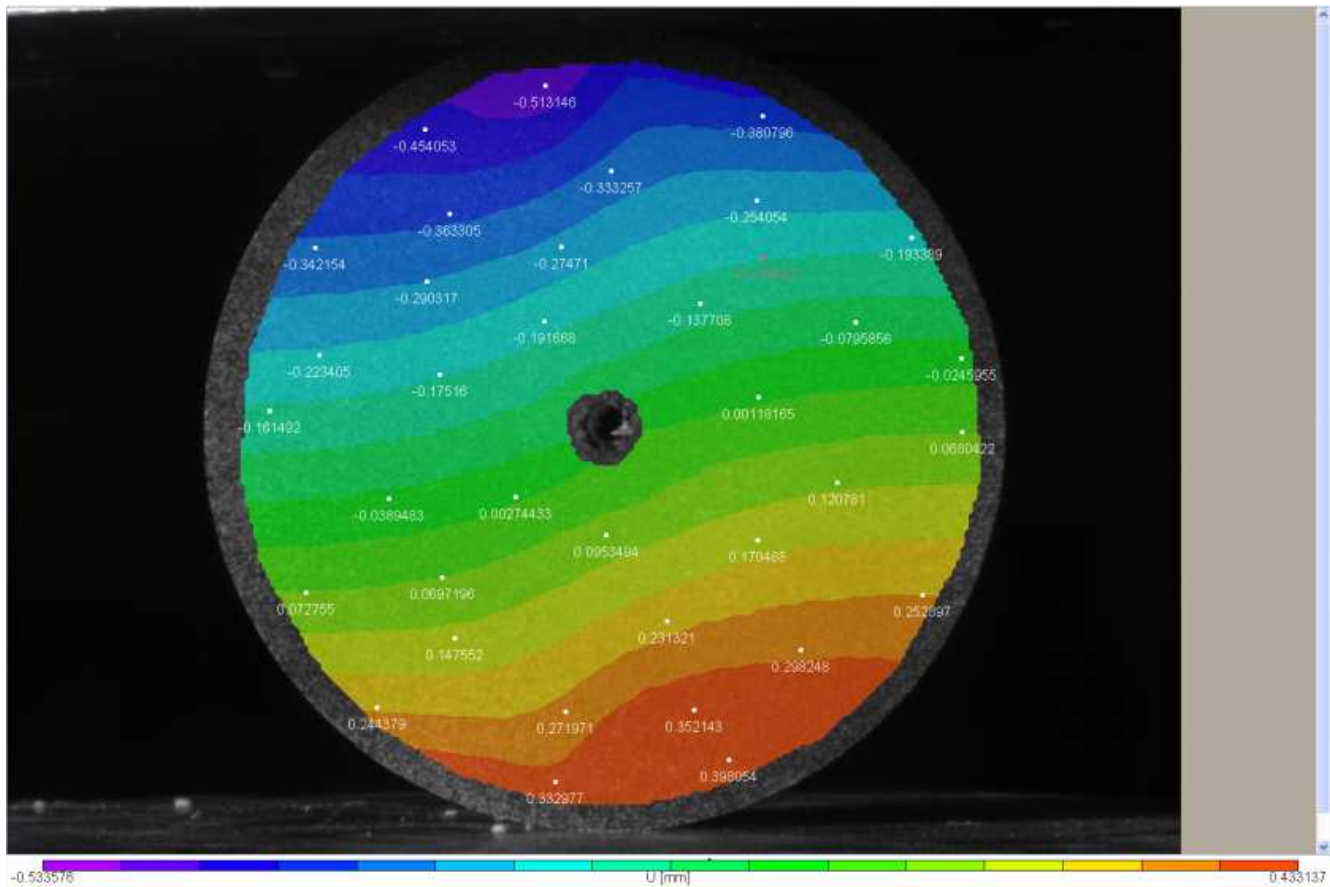
Εικόνα 6-82: Σημεία της 12^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



Εικόνα 6-83: Σημεία της 13^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



Εικόνα 6-84: Σημεία της 14^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U .



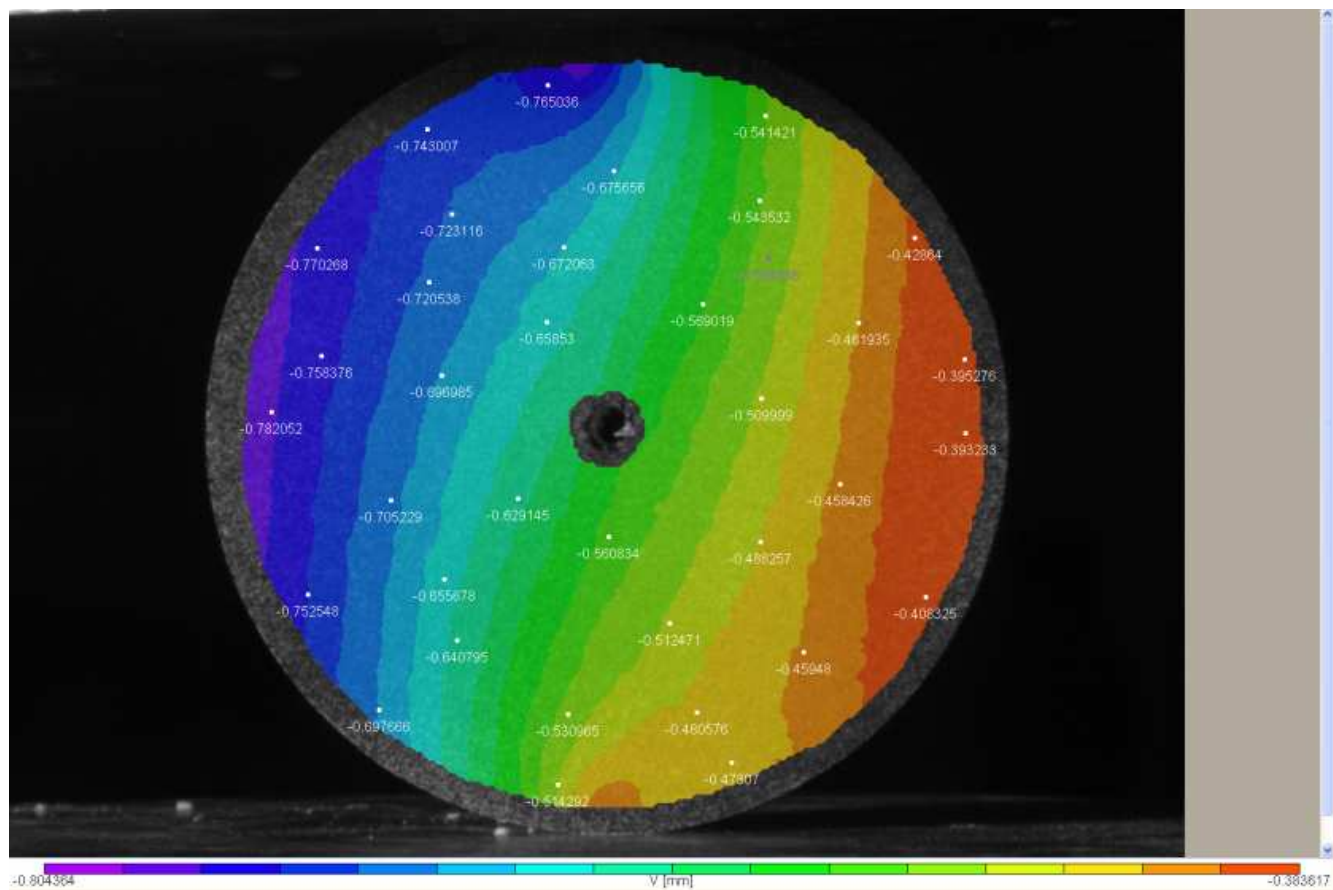
Εικόνα 6-85: Σημεία της 15^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται οριζόντια μετατόπιση U.

Οι παραπάνω εικόνες απεικονίζουν τις τιμές της οριζόντιας μετατόπισης των σημείων της επιφάνειας του δείγματος *plexiglass* που μελετάται. Από τη 2^η κιάλας παραμορφωμένη εικόνα παρατηρείται ότι στο πάνω μέρος του δείγματος υπάρχει μία πολύ μικρή οριζόντια μετατόπιση των σημείων προς τα αριστερά. Αντίθετα, στο κάτω μέρος του δείγματος παρατηρείται μία επίσης μικρή μετατόπιση προς τα δεξιά. Στις επόμενες εικόνες, μέχρι και τη 14^η, οι οριζόντιες μετατοπίσεις προς τα αριστερά αλλά και προς τα δεξιά γίνονται όλο και μεγαλύτερες, πράγμα που είναι απόλυτα λογικό και αναμενόμενο, εφόσον το φορτίο που προστίθεται κατά τη θλίψη αυξάνεται. Πρέπει, επιπλέον, να σχολιαστεί το γεγονός ότι καθώς προστίθεται μεγαλύτερο φορτίο, σημεία της αριστερής πλευράς του δείγματος, που στις αρχικές εικόνες μετατοπίστηκαν προς τα δεξιά, τώρα μετατοπίζονται προς τα αριστερά. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς πλησιάζει η στιγμή της θραύσης όλο και περισσότερο. Βέβαια, αυτό φαίνεται καλύτερα στο σχήμα της 15^{ης} εικόνας, όπου οι οριζόντιες μετατοπίσεις, δεξιές και αριστερές, λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους. Η συγκεκριμένη εικόνα απεικονίζει τη στιγμή ελάχιστα πριν τη θραύση του δείγματος, δηλαδή τη στιγμή που το δείγμα δέχεται τις μεγαλύτερες τιμές φορτίου χωρίς να «σπάει». Παρατηρεί κανείς ότι από το πάνω μέρος μέχρι περίπου το κέντρο του δείγματος οι τιμές της

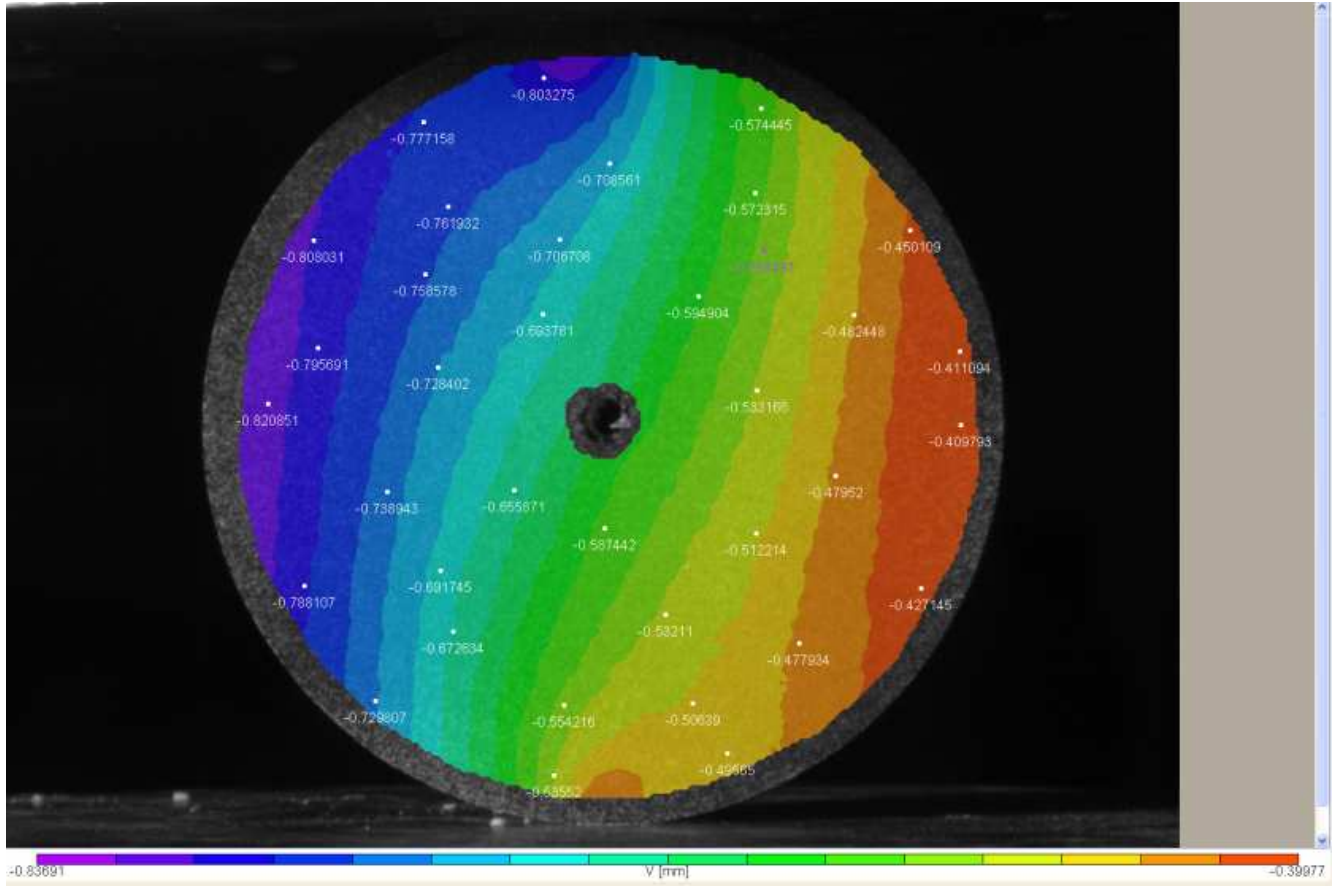
μετατόπισης U είναι αρνητικές, ενώ στο υπόλοιπο μέρος του δείγματος οι τιμές είναι θετικές. Οι πιέσεις αυτές που δέχεται το δείγμα δείχνουν ότι υπάρχει μία τάση για θραύση και αποχωρισμού των δεξιών και των αριστερών σημείων. Με άλλα λόγια, κατά τη στιγμή της θραύσης, τα σημεία που κινούνται αριστερά στο πάνω μέρος του δείγματος, έχουν την τάση να «φύγουν» προς τα αριστερά, συμπαρασύροντας και όλο το αριστερό κομμάτι του δείγματος. Αντίστοιχα, τα σημεία που κινούνται προς τα δεξιά, δηλαδή τα σημεία στο κάτω μέρος του δείγματος, έχουν την τάση να «φύγουν» προς τα δεξιά, συμπαρασύροντας και όλα τα σημεία που βρίσκονται στη δεξιά μεριά του δείγματος. Το γεγονός αυτό ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα, καθώς στη συνέχεια του πειράματος, το δείγμα *plexiglass* είχε μία τελείως κάθετη θραύση.

6.3.2. Τα Αριθμητικά Αποτελέσματα των Μετατοπίσεων V

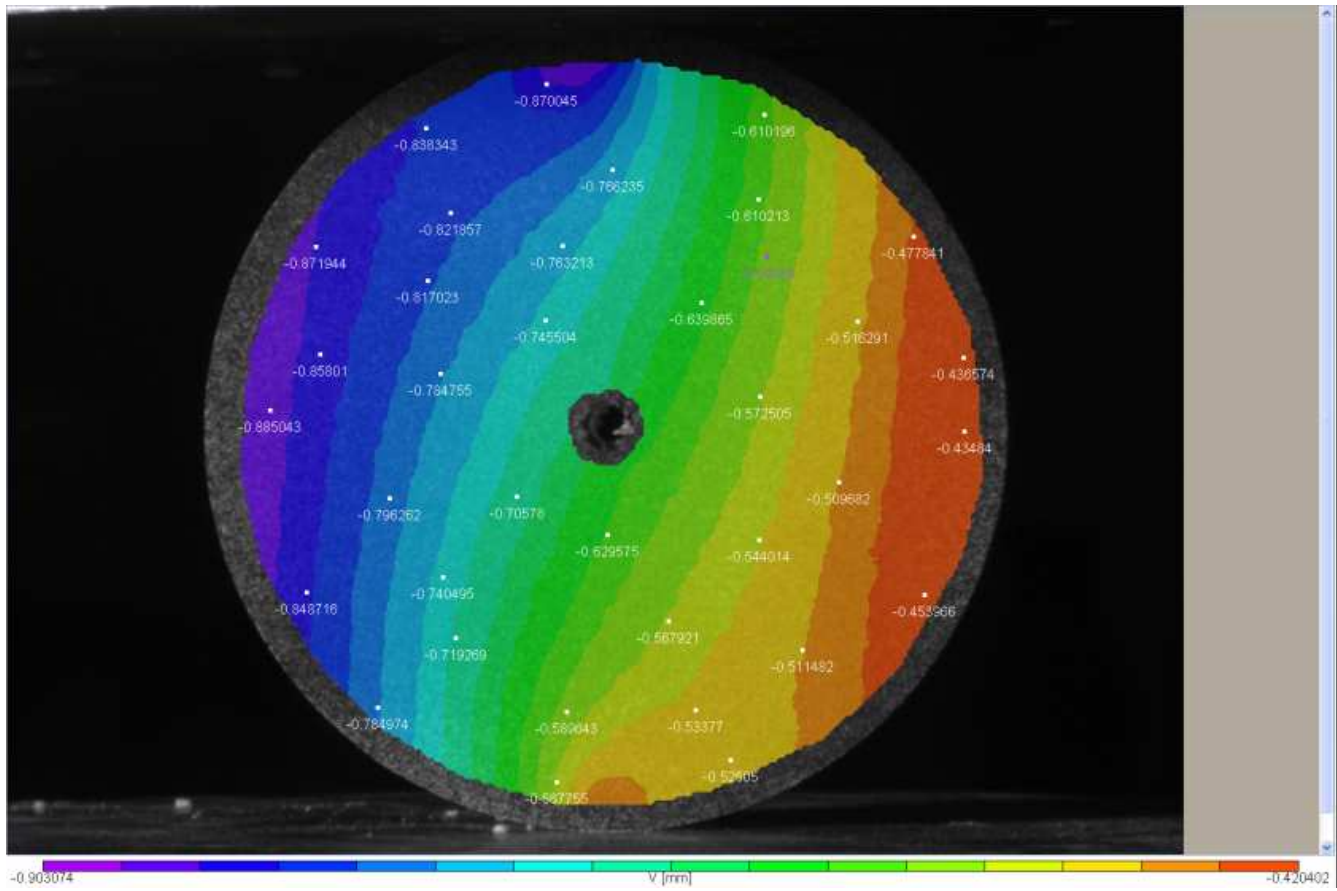
Σε αυτήν την υποενότητα, εξετάζονται τα αποτελέσματα της κάθετης μετακίνησης των σημείων της επιφάνειας του δείγματος. Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα σχήματα:



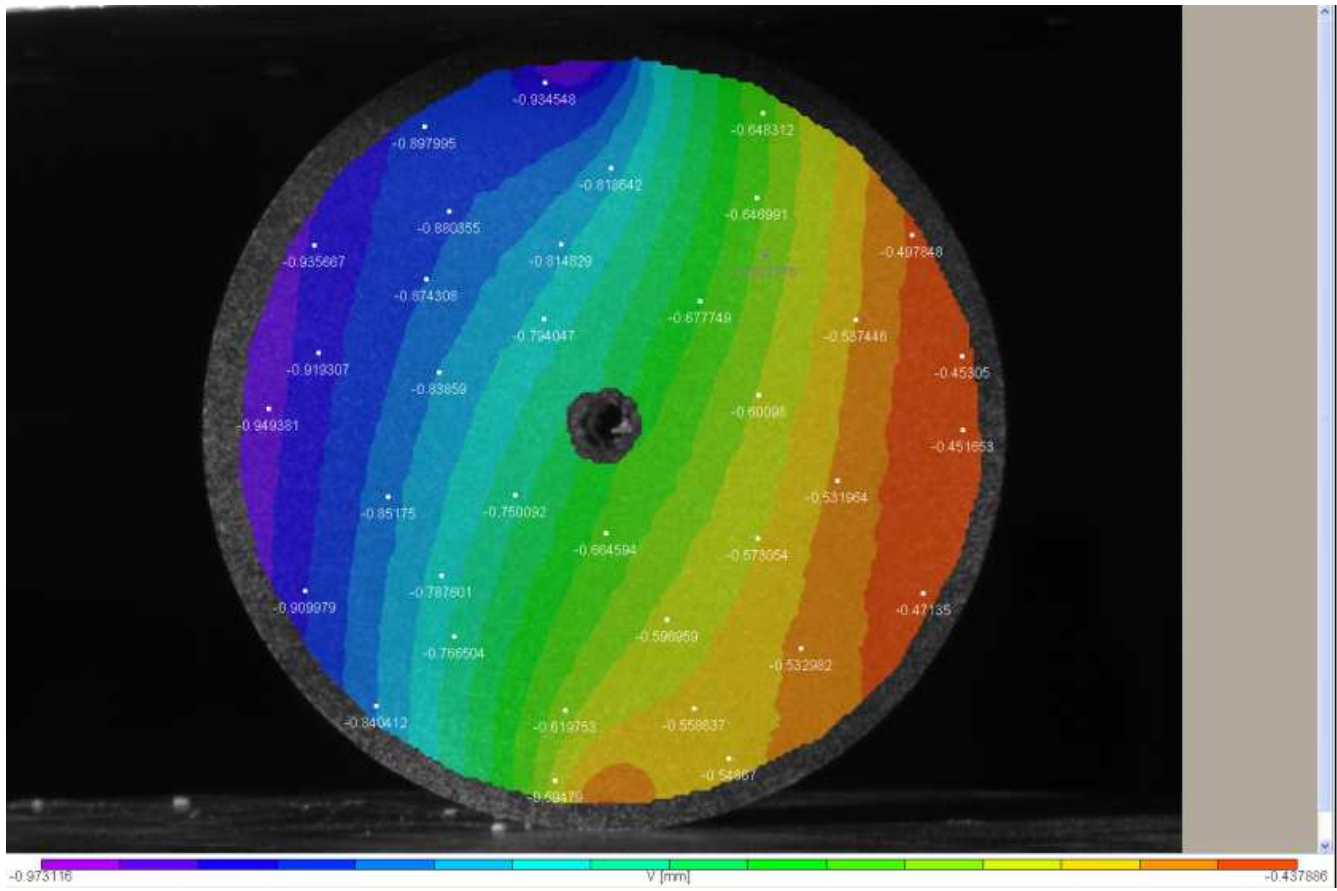
Εικόνα 6-86: Σημεία της 2¹⁵ παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



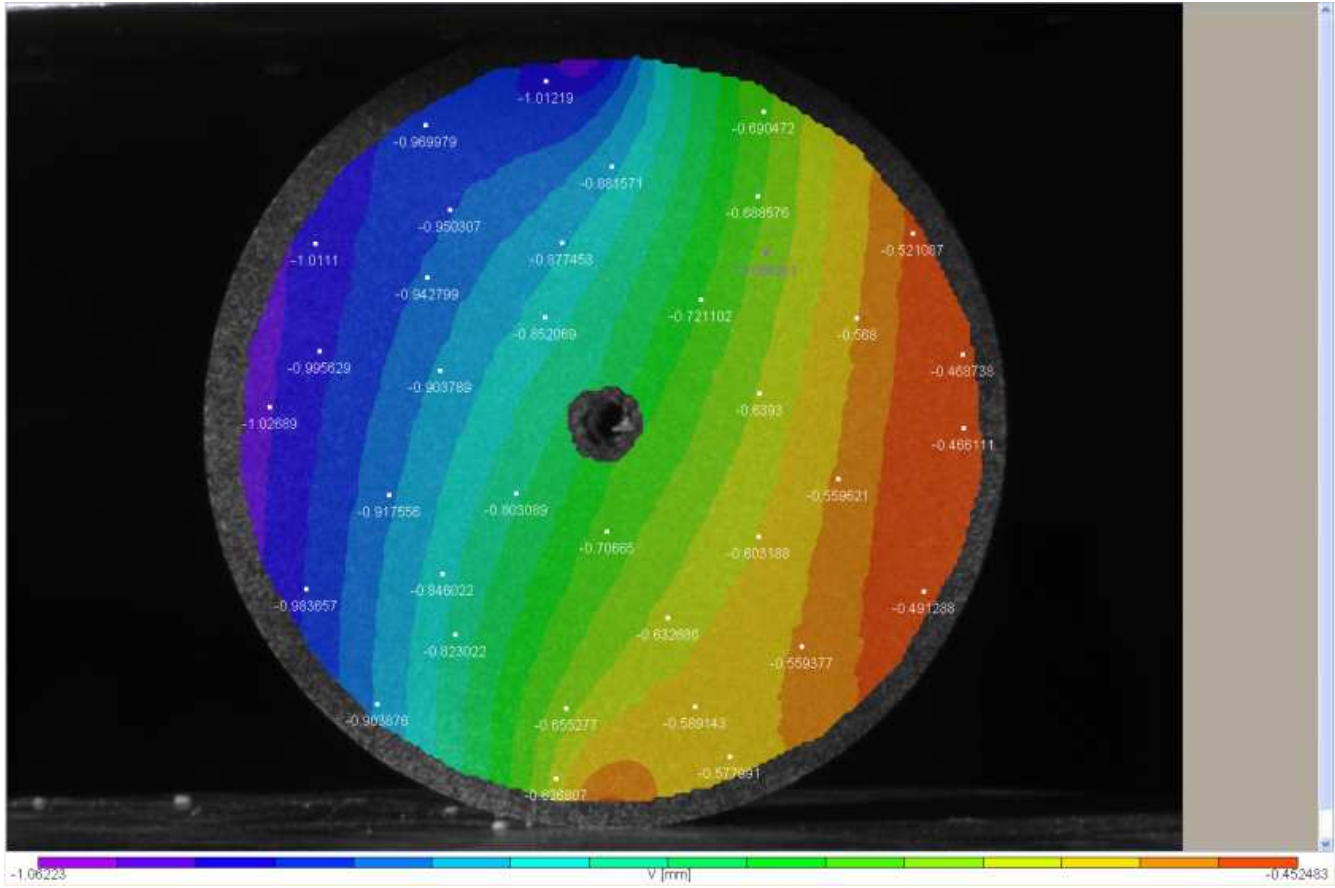
Εικόνα 6-87: Σημεία της 3^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.



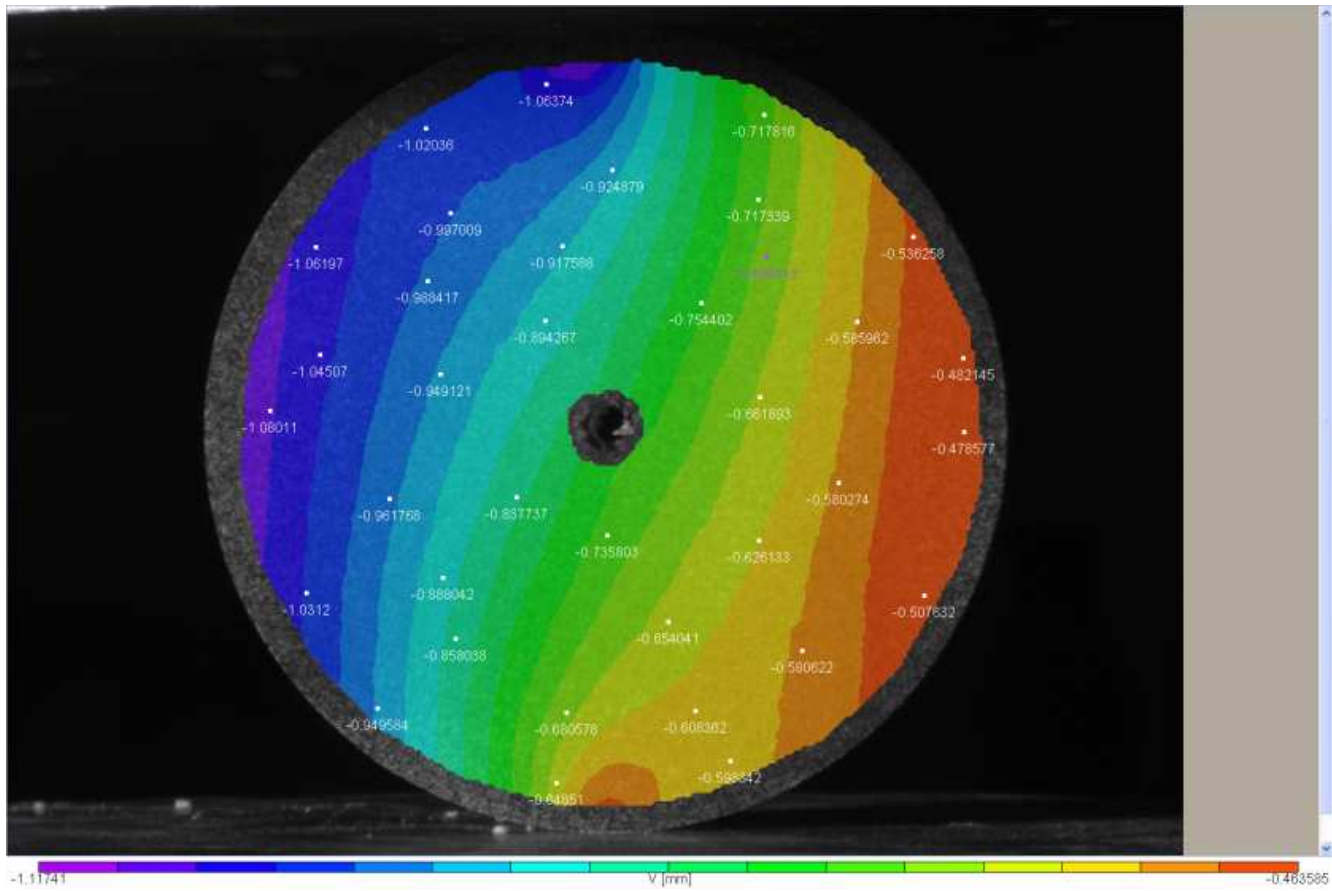
Εικόνα 6-88: Σημεία της 4^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



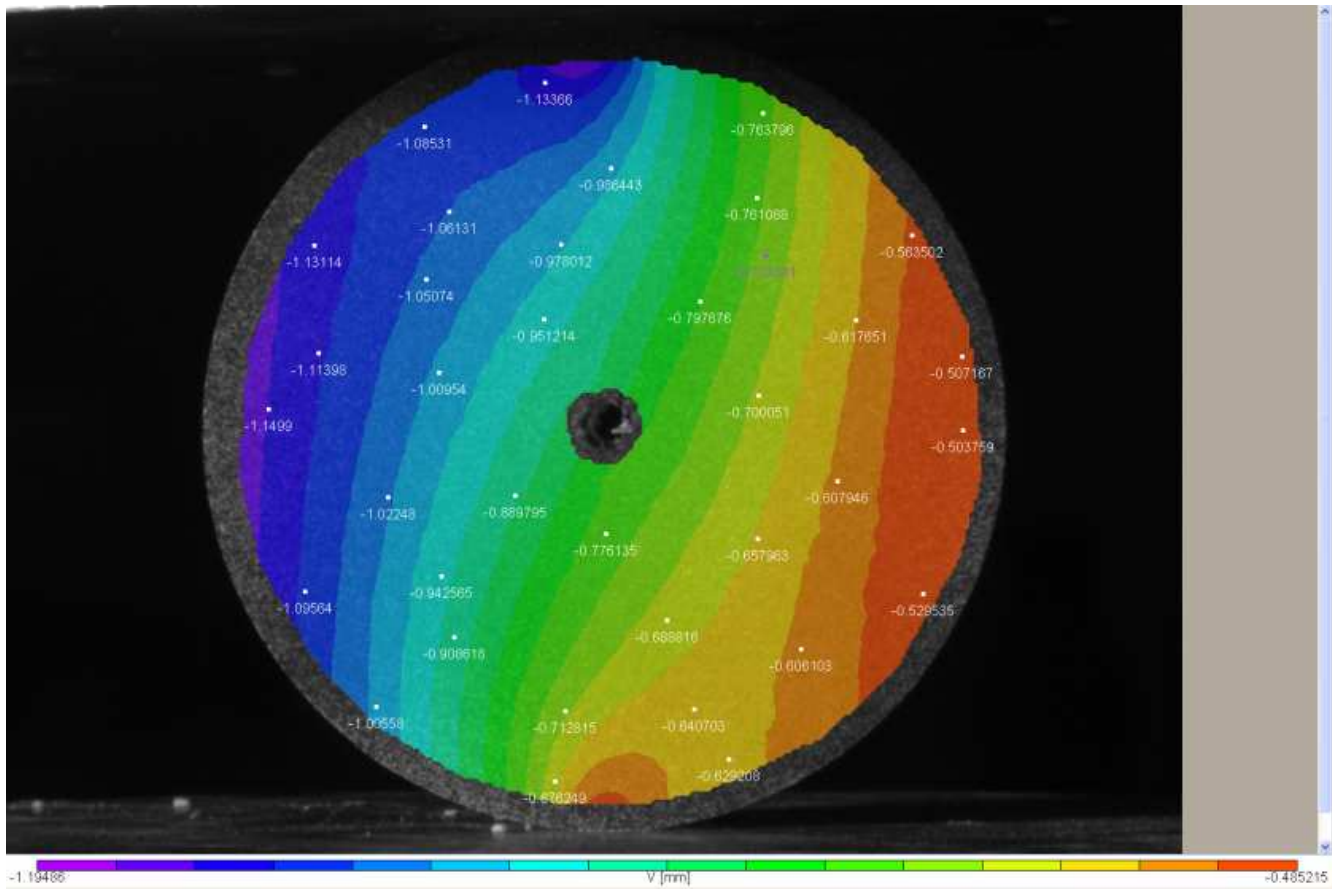
Εικόνα 6-89: Σημεία της 5^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



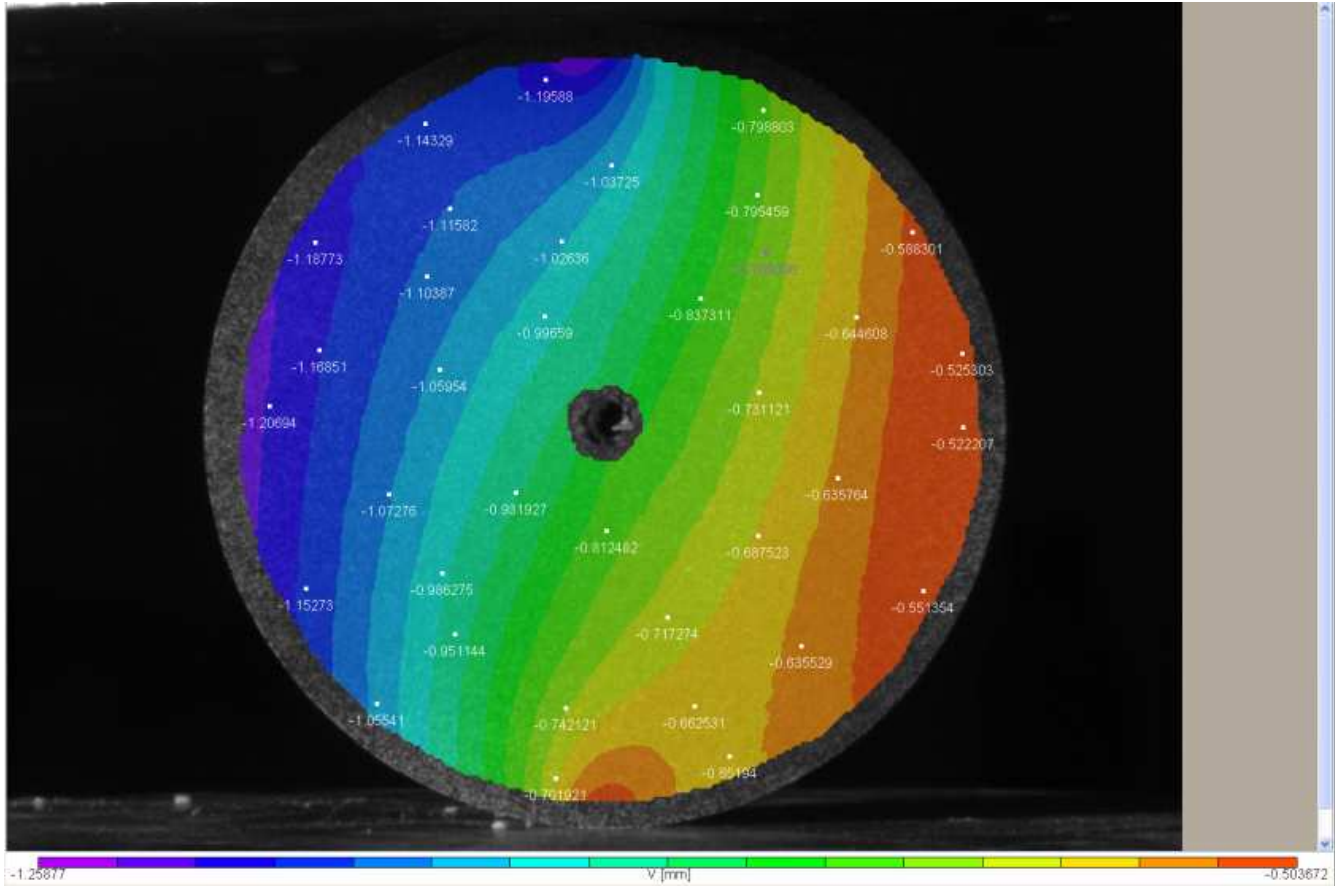
Εικόνα 6-90: Σημεία της 6^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



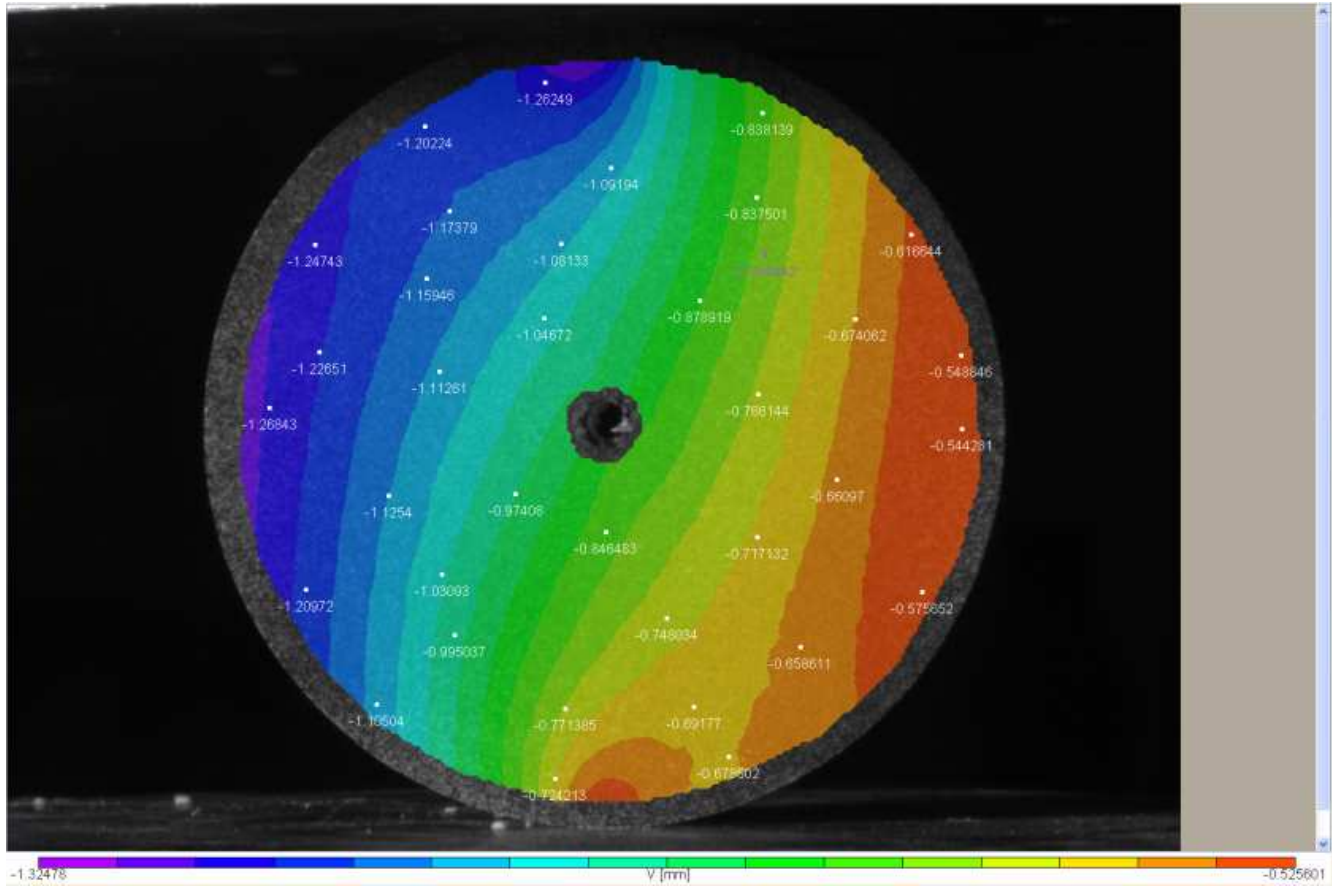
Εικόνα 6-91: Σημεία της 7^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



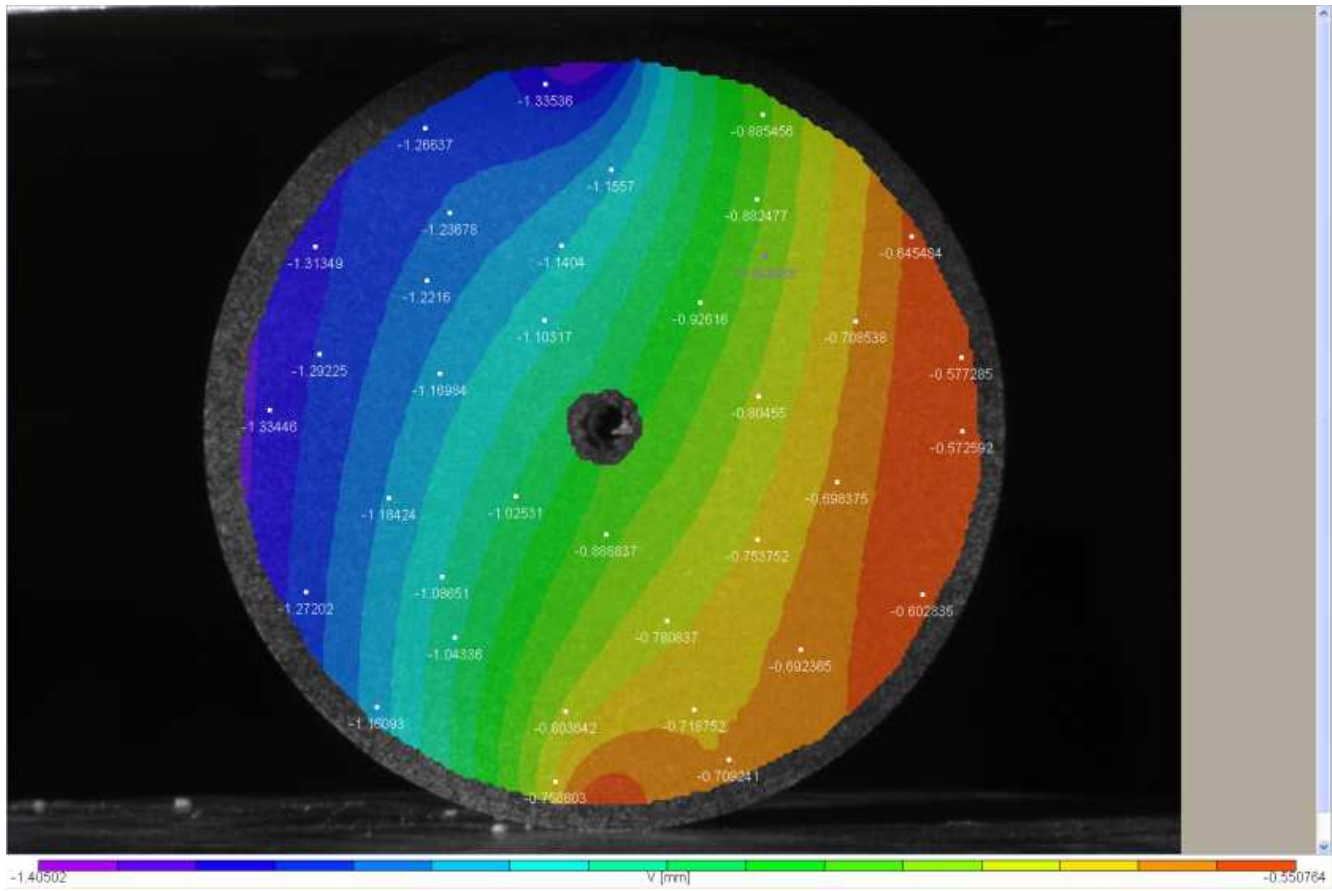
Εικόνα 6-92: Σημεία της 8^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.



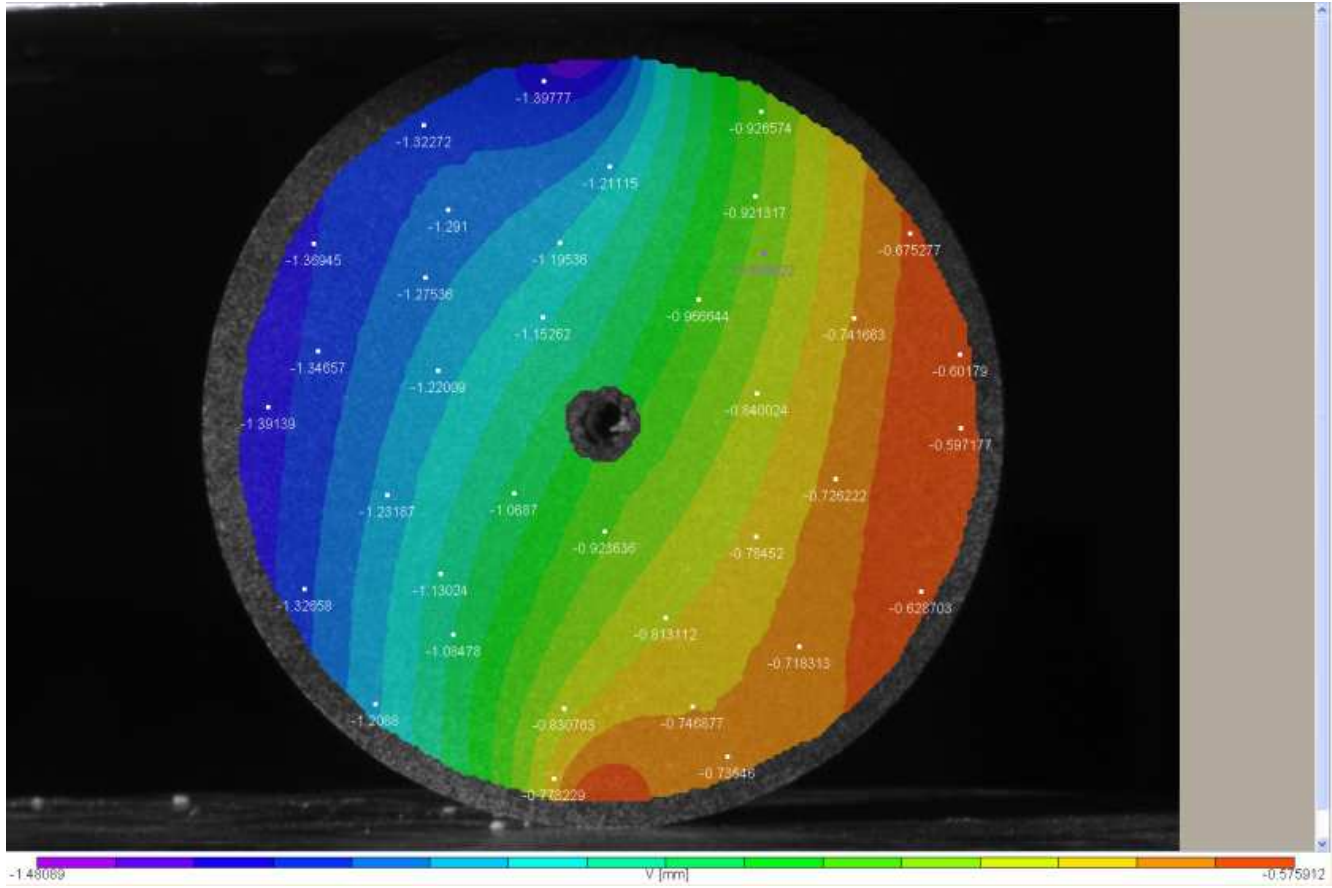
Εικόνα 6-93: Σημεία της 9^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



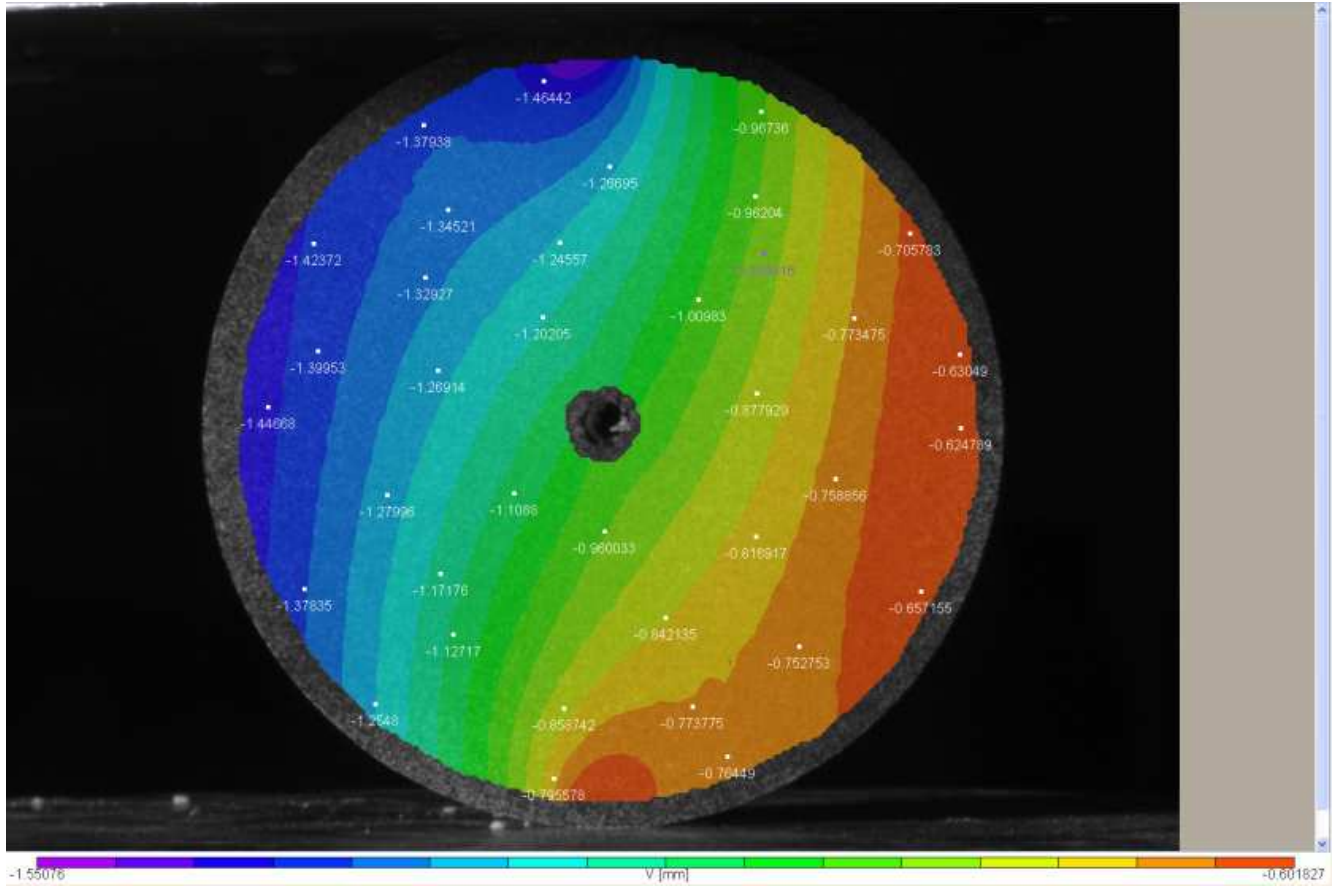
Εικόνα 6-94: Σημεία της 10^{th} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



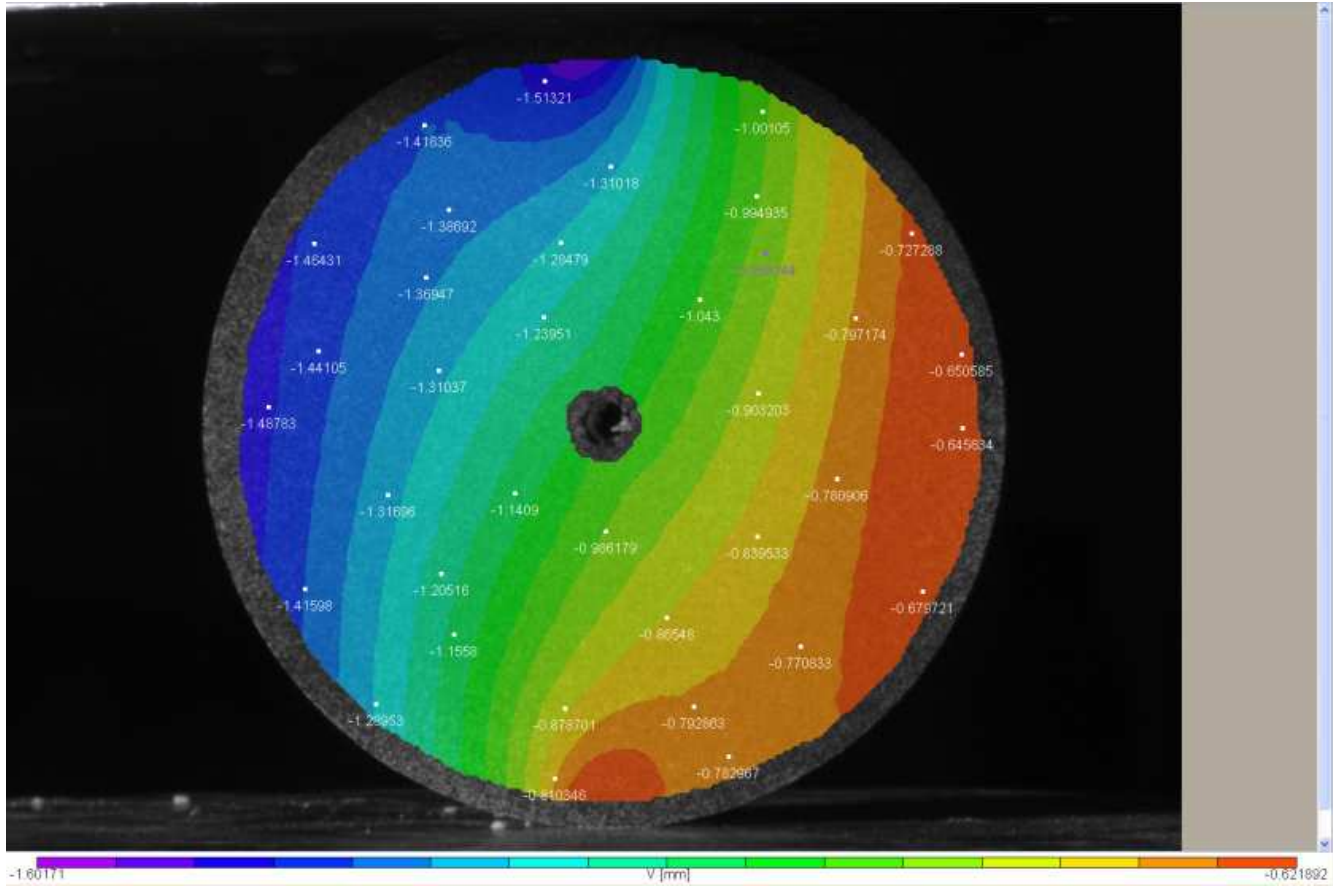
Εικόνα 6-95: Σημεία της 11^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



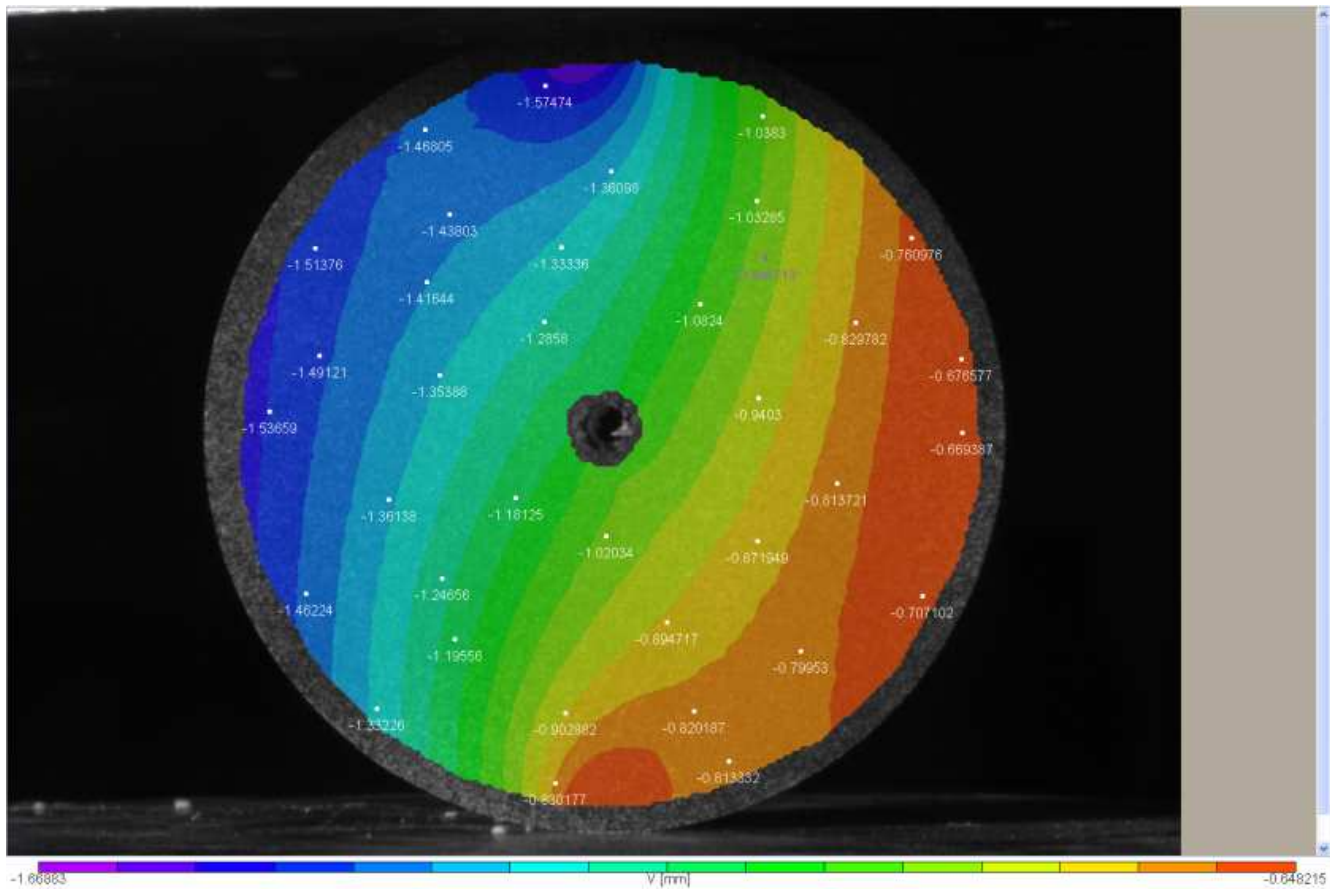
Εικόνα 6-96: Σημεία της 12^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



Εικόνα 6-97: Σημεία της 13^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



Εικόνα 6-98: Σημεία 14^{ns} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V .



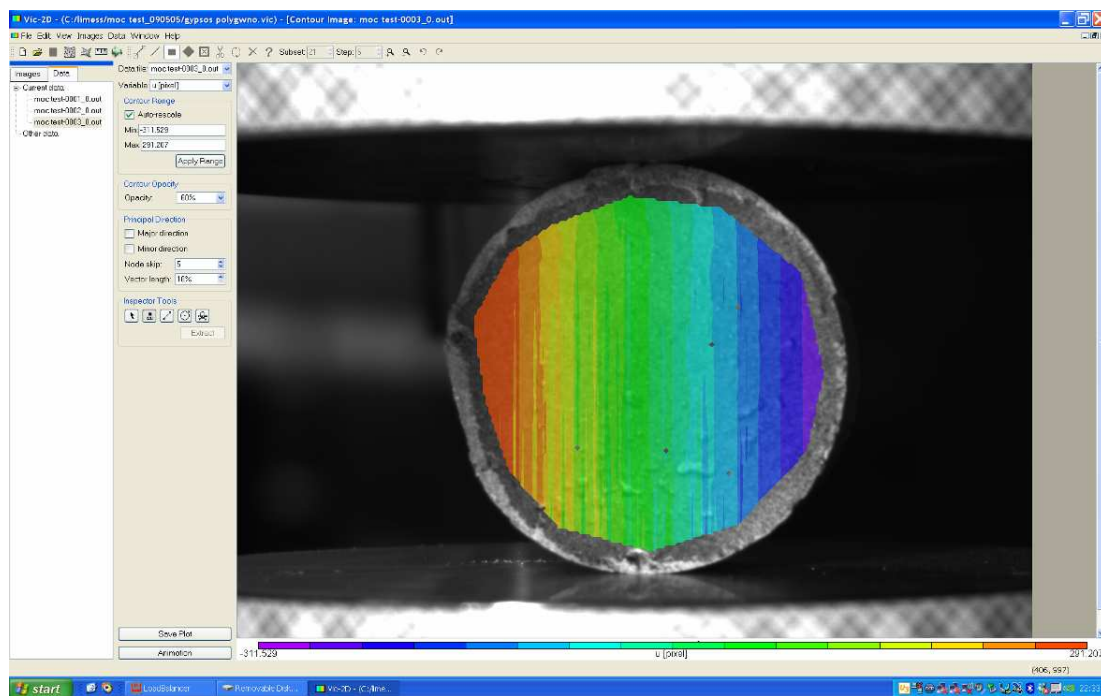
Εικόνα 6-99: Σημεία της 15^{ης} παραμορφωμένης εικόνας που δέχονται κάθετη μετατόπιση V.

Στις παραπάνω εικόνες απεικονίζονται οι κάθετες μετατοπίσεις σημείων που βρίσκονται στη επιφάνεια του δείγματος. Οι κάθετες αυτές μετατοπίσεις έχουν αρκετά μικρές τιμές στις αρχικές παραμορφωμένες εικόνες, ενώ καθώς προστίθεται φορτίο αποκτούν όλο και μεγαλύτερες. Ακόμη, σε όλες τις εικόνες παρατηρείται μία μετατόπιση των σημείων της επιφάνειας προς τα κάτω, φαίνεται από το αρνητικό πρόσημο όλων των μετατοπίσεων των σημείων που εμφανίζονται. Αυτό συμβαίνει διότι η μηχανή θλίψης που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση του πειράματος, ασκεί φορτίο από το πάνω μέρος. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα σημεία που βρίσκονται στο πάνω μέρος του δείγματος δέχονται μεγαλύτερες μετατοπίσεις V από οποιαδήποτε άλλα σημεία, ενώ στο κάτω μέρος δέχονται πολύ μικρότερες.

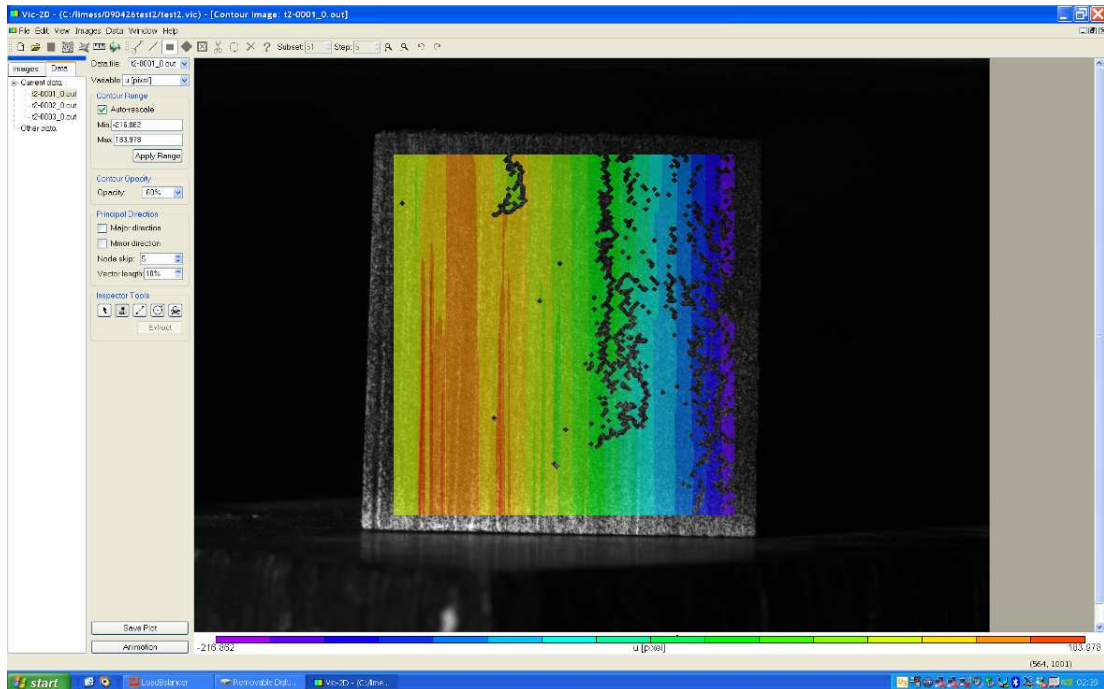
7. Ποιότητα των Πειραμάτων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, εξετάζεται κατά πόσο τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και αναλύθηκαν παραπάνω, θεωρούνται πετυχημένα και καλής ποιότητας. Από τα συμπεράσματα που εξαχθηκαν για τα παραπάνω πειράματα και τα αποτελέσματα που παράχθηκαν, αξίζει να σημειωθεί, ότι τα πειράματα που αναλύθηκαν θεωρούνται άκρως ικανοποιητικά και ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικότητα. Αυτό, βέβαια, δεν είναι κάτι που προέκυψε από την πρώτη στιγμή. Χρειάστηκαν πολλές και επανειλημμένες προσπάθειες για να ληφθεί ένα καλό αποτέλεσμα.

Υπήρξαν πειράματα που δεν είχαν ικανοποιητικό αποτέλεσμα, λόγω του ακατάλληλου σχεδίου στιγμάτων στην επιφάνεια του δείγματος. Αποτελέσματα από τέτοια ανεπιτυχή πειράματα φαίνονται παρακάτω:

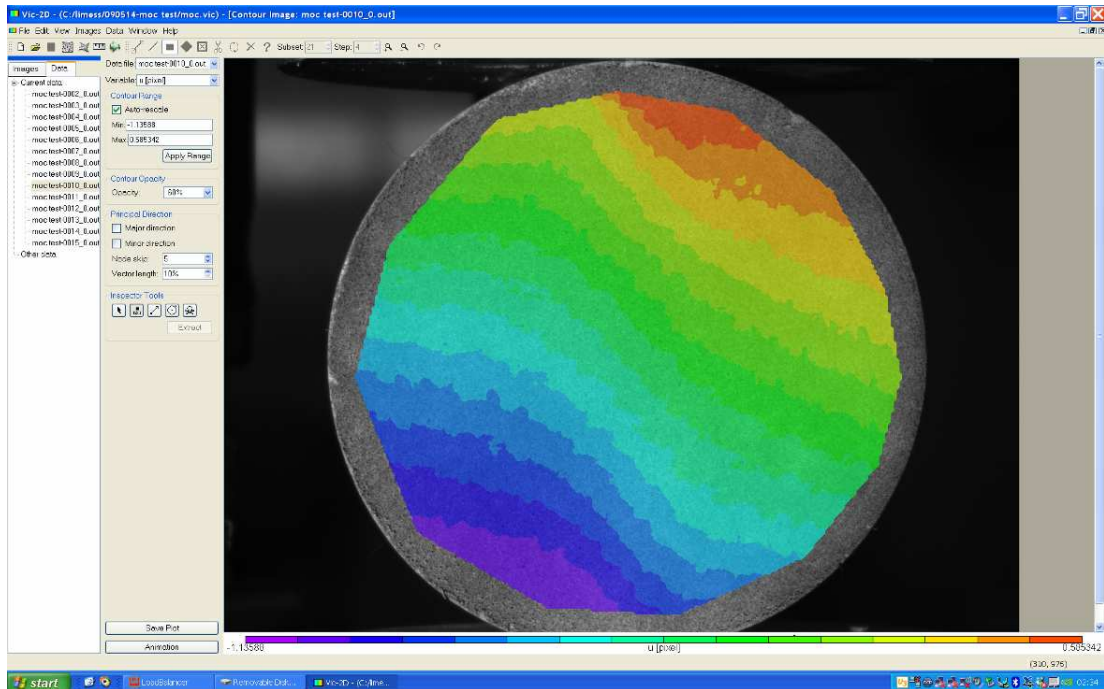


Εικόνα 7-1: Μη ικανοποιητικό αποτέλεσμα από πείραμα θλίψης με δείγμα γύψου διαμέτρου 53 mm, λόγω ακατάλληλου σχεδίου στιγμάτων.



Εικόνα 7-2: Μη ικανοποιητικό αποτέλεσμα από πείραμα θλίψης με δείγμα ξύλου διαστάσεων 30*30 mm, λόγω ακατάλληλου σχεδίου στιγμάτων.

Επιπροσθέτως, στα αρχικά πειράματα τύπου βραζιλιανής δοκιμής που πραγματοποιούνταν, τα δείγματα που υποβάλλονταν στη διαδικασία της θλίψης δέχονταν κάποια εμφανώς μεγάλη στροφή. Αυτό συνέβαινε, διότι τα πειράματα αυτά πραγματοποιούνταν στη μικρή μηχανή θλίψης του εργαστηρίου, και τα συγκεκριμένα δείγματα ήταν μεγάλων διαστάσεων για τη συγκεκριμένη μηχανή. Αποτέλεσμα που λαμβάνεται από το πρόγραμμα με δείγμα που έχει δεχθεί στροφή, φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 7-3: Δείγμα γύψου διαμέτρου 120 mm, που έχει δεχθεί μεγάλη στροφή κατά τη διαδικασία της θλίψης.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι τα πειράματα τα οποία σχολιάστηκαν και αναλύθηκαν παραπάνω είναι εμφανώς πολύ καλής ποιότητας. Αυτό επιτεύχθηκε με συνεχείς δοκιμές και με παρατήρηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων κάθε αποτυχημένου πειράματος, έτσι ώστε κάθε φορά να λαμβάνονται καλύτερα αποτελέσματα. Τέλος, αυτό που κατανοήθηκε είναι ότι με ένα καλό σχέδιο στιγμάτων δεν θα υπάρχουν προβλήματα στη διαδικασία της συσχέτισης και το πρόγραμμα θα μπορεί να εξαγάγει τα σωστά αποτελέσματα, καθώς επίσης, ότι η μικρή μηχανή θλίψης δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε μεγάλων διαστάσεων δοκίμια, διότι διακρίνονται χονδροειδή σφάλματα στα αποτελέσματα, όπως μεγάλες στροφές των δειγμάτων. Τέτοιου είδους δοκίμια καλό θα ήταν να θλίβονται στη μεγάλη μηχανή, αφού με αυτόν τον τρόπο, δεν δημιουργούνται τα προαναφερθέντα προβλήματα.

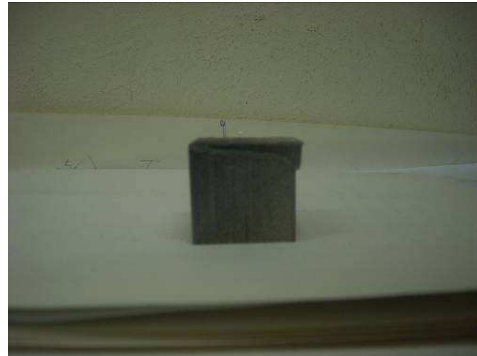
8. Συμπεράσματα-Συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο, και αφού έχει μελετηθεί διεξοδικά το σύστημα *Vic-2D* και τα αποτελέσματά του, θα εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για αυτή τη μέθοδο της μέτρησης των παραμορφώσεων και τη διεξαγωγή των πειραμάτων, θα γίνει συζήτηση για τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν, καθώς και για τα πράγματα που αποκομίστηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Κλείνοντας, θα αναφερθούν κάποιες προτάσεις για συνέχεια της εργασίας ή της έρευνας πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Καταρχάς, είναι πολύ σημαντικό το δείγμα που εξετάζεται να έχει εντελώς επίπεδη επιφάνεια. Τα υλικά με τα οποία πραγματοποιήθηκαν πειράματα ήταν το ξύλο (έτοιμα δοκίμια με τετραγωνικές επιφάνειες), το μάρμαρο (έτοιμα δοκίμια με κυκλική λεία επιφάνεια), ο γύψος και το τσιμέντο, τα οποία κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο. Πιο συγκεκριμένα, αφού το μείγμα νερού και σκόνης αναδευόταν ικανοποιητικά, έπρεπε να τοποθετηθεί σε κομμένους σωλήνες PVC διαμέτρων 53 ή 120 mm και πάχους 35 mm ή 70 mm αντίστοιχα, κάτω από τους οποίους ήταν τοποθετημένο πλακάκι, το οποίο θα επέτρεπε τη δημιουργία μίας τελείως λείας επιφάνειας, όπως ακριβώς απαιτούσαν οι προδιαγραφές του πειράματος. Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά την κατασκευή των δειγμάτων γύψου ήταν ότι το μείγμα στερεοποιείτο πολύ γρήγορα και έτσι, έπρεπε να τοποθετηθεί εξίσου γρήγορα και ομοιόμορφα στο PVC. Ενδεικτικά παρατίθενται σε εικόνες μερικά από τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε πειράματα:



Εικόνα 8-1: Δείγμα μαρμάρου διαμέτρου 92 mm.



Εικόνα 8-2: Δείγμα ξύλου διαστάσεων 30*30mm.



Εικόνα 8-3: Δείγμα γύψου διαμέτρου 120 mm.



Εικόνα 8-4: Δείγμα γύψου διαμέτρου 53 mm.

Επιπρόσθετα, προκύπτει ότι ένα από τα πιο βασικά στοιχεία που πρέπει να υπάρχουν για να είναι επιτυχές το πείραμα, είναι να έχει δημιουργηθεί ένα πολύ καλό σχέδιο σιγμάτων (*speckle pattern*). Σε περίπτωση που το *speckle pattern* δεν είναι καλό, η διαδικασία της συσχέτισης προχωράει με πολύ αργό ρυθμό, δεν ολοκληρώνεται καθόλου γρήγορα και τελικά, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το πρόγραμμα δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Αξίζει να αναφερθεί ότι, πολλές φορές τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν δεν ήταν επιτυχή λόγω του κακού σχεδίου σιγμάτων και χρειάστηκαν πολλές προσπάθειες για να κατανοηθεί ο σωστός τρόπος κατασκευής του. Επομένως, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι για να επιτευχθεί ένα καλό *speckle pattern*, θα πρέπει αφού δημιουργηθεί το άσπρο φόντο στην επιφάνεια του δείγματος, να χρωματιστεί με μαύρο σπρέι, αλλά κρατώντας κάποια απόσταση και ελέγχοντας πάντοτε την ποσότητα που θα ριφθεί.

Επιπλέον, το καλό «στήσιμο» του συστήματος θεωρήθηκε υψίστης σημασίας. Ο τρίποδας πάνω στον οποίο ήταν τοποθετημένη η κάμερα έπρεπε να είναι πολύ καλά κεντρωμένος και οριζοντιωμένος, έτσι ώστε η κάμερα να βρίσκεται σε κάθετη θέση σε σχέση με το δοκίμιο. Αυτό το στοιχείο σε συνδυασμό με την επίπεδη επιφάνεια που θα έχει το δοκίμιο, οδηγούν σε όλο και μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχίας του πειράματος. Ακόμη, σημαντικό ρόλο έπαιξε η εστιακή απόσταση και η απόσταση κάμερας-δείγματος. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι όταν χρησιμοποιείται μεγάλη εστιακή απόσταση, η απόσταση κάμερας-δείγματος είναι μικρότερη και το αντίθετο.

Παράλληλα, ο φωτισμός του σχεδίου σιγμάτων της επιφάνειας του δείγματος έπαιξε πολύ σοβαρό ρόλο. Ο μη επαρκής και καλός φωτισμός μπορεί να δημιουργήσει σφάλματα στη διαδικασία της συσχέτισης και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι λανθασμένα. Στην προκειμένη περίπτωση, η πηγή λευκού φωτός που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δεν ήταν επαρκής και το δείγμα δεν φωτιζόταν κατάλληλα. Για αυτόν το λόγο, κρίθηκε αναγκαία η τοποθέτηση μίας επιπλέον πηγής φωτός, συγκεκριμένα ενός προβολέα, με τη

βοήθεια του οποίου θα μπορούσε κανείς να έχει ικανοποιητικό φωτισμό για τη σωστή πραγματοποίηση του πειράματος. Από την άλλη πλευρά, το σχέδιο στιγμάτων δεν θα πρέπει και να υπερ-φωτίζεται, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στην επιφάνεια του δείγματος (στην οθόνη του υπολογιστή), κόκκινα στίγματα. Γι' αυτό, λοιπόν, πρέπει να τονιστεί ότι οι πηγές φωτός πρέπει να είναι στραμμένες κατάλληλα προς το δείγμα για να μπορέσει η επιφάνεια να φωτιστεί με το σωστό τρόπο. Αυτό, βέβαια, είναι κάτι που χρειάζεται συνεχείς δοκιμές και εμπειρία σε τέτοιου είδους πειράματα.

Εν συνεχεία, κατά την προετοιμασία της διάταξης για τη λήψη των φωτογραφιών, βασικό στοιχείο ήταν να έχει δημιουργηθεί μία καθαρή εικόνα του δοκιμίου στην οθόνη του υπολογιστή. Σε αρχικά πειράματα που η ποιότητα των εικόνων δεν ήταν καλή, δημιουργούνταν προβλήματα κατά τη διαδικασία της συσχέτισης, καθώς και τα αποτελέσματα δεν ήταν τα αναμενόμενα. Έτσι, λοιπόν, κρίνεται σκόπιμο πριν τη λήψη των φωτογραφιών να κάνει κανείς τις κατάλληλες ρυθμίσεις με τους ρυθμιστές της κάμερας.

Επίσης, ένα θέμα που απασχόλησε αρκετά και χρειάστηκε πολλές προσπάθειες για να καταλήξει κανείς σε κάποιο συμπέρασμα, είναι η συχνότητα λήψης των εικόνων. Καλό θα ήταν, οι εικόνες να λαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να καταγραφούν οι περισσότερες φάσεις της παραμόρφωσης. Γι' αυτό και αφού ρυθμιστεί η μηχανή θλίψης, θα ήταν συνετό να ληφθεί φωτογραφία κάθε φορά που αυξάνει το φορτίο κατά 0,5 kN. Ένα ακόμη κριτήριο είναι να απεικονίζονται οι πιο σημαντικές φάσεις της παραμόρφωσης, όπως πχ. η δημιουργία κάποιας ρωγμής ή γενικά όταν γίνεται αντιληπτή κάποια αλλαγή στα επιφανειακά χαρακτηριστικά του δείγματος.

Ένα επιπλέον σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε, αφορά τον ορισμό της περιοχής ενδιαφέροντος και τη διαδικασία της συσχέτισης. Η περιοχή ενδιαφέροντος πρέπει να περιλαμβάνει σχεδόν όλη την επιφάνεια του δείγματος ή μόνο περιοχές πάνω στην επιφάνεια που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αυτό εξαρτάται από το τι ενδιαφέρει καθέναν να μελετήσει κάθε φορά. Στην προκειμένη περίπτωση, μελετήθηκαν οι παραμορφώσεις σε ολόκληρη την επιφάνεια των δοκιμίων. Ακόμη, η διαδικασία της συσχέτισης μπορεί να πραγματοποιηθεί ορίζοντας διαφορετικά μεγέθη *pixel*. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε ότι, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του *pixel*, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια επιτυγχάνεται στα αποτελέσματα.

Επιπροσθέτως, ορισμένες φορές παρατηρήθηκε ότι τα δείγματα δεν «πατούσαν» καλά και σταθερά πάνω στη μηχανή θλίψης, και ιδιαίτερα στη μικρή μηχανή θλίψης (αυτή που χρησιμοποιήθηκε για το δείγμα από *plexiglass*). Αυτό είχε ως συνέπεια, στα αποτελέσματα που λαμβάνονταν από το πρόγραμμα, να φαίνεται ότι υπάρχει στροφή. Αυτό το πρόβλημα δεν αντιμετωπίστηκε με τη μεγάλη μηχανή θλίψης, όπου η διάταξη ήταν εντελώς συμμετρική.

Επιπλέον, ύστερα από διεξοδική μελέτη των αποτελεσμάτων από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι το σύστημα *Vic-2D* είναι ευαίσθητο και έχει τη δυνατότητα να «καταλαβαίνει» οποιαδήποτε απειροελάχιστη κίνηση. Αυτό μερικές φορές δημιουργούσε πρόβλημα στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, όπως στο πείραμα τύπου βραζιλιανής δοκιμής με το δείγμα μαρμάρου, όπου κατά τη Χ-μετατόπιση εμφανιζόταν κίνηση όλων των σημείων της επιφάνειας προς τα αριστερά ή κατά την Υ-μετατόπιση, όπου εμφανιζόταν κίνηση των σημείων προς τα πάνω.

Εν κατακλείδι, σημαντικά ήταν τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν για την αντοχή των υλικών στην παραμόρφωση και τη θλίψη. Παρατηρήθηκε ότι από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα, οι παραμορφώσεις και οι τιμές των μετατοπίσεων είναι πολύ μεγαλύτερες στο ξύλο και στο γύψο, πράγμα που σημαίνει ότι η αντοχή τους είναι αρκετά μικρή. Μικρότερες παραμορφώσεις, και συνεπώς μεγαλύτερη αντοχή, από τα προαναφερθέντα υλικά παρατηρήθηκαν στο μάρμαρο και το *plexiglass*. Βέβαια, τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για τα παραπάνω πειράματα δεν είναι απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ τους, γιατί οι διαστάσεις και το μέγεθός τους δεν ήταν διαφορετικά. Επομένως, δεν μπορεί να πει κανείς με βεβαιότητα και ακρίβεια ποιο είναι πιο ανθεκτικό από όλα, αλλά μόνο να καταλήξει σε κάποια γενικά συμπεράσματα.

Πιο συνοπτικά, κατορθώθηκε:

- ✓ Ο καλός χειρισμός του συστήματος *Vic-2D* (κάμερα-λήψη εικόνων-εξαγωγή αποτελεσμάτων)
- ✓ Η κατάλληλη προετοιμασία της διάταξης (προετοιμασία δείγματος-ρύθμιση φωτισμού-δημιουργία καθαρής εικόνας)
- ✓ Η ερμηνεία και η κατανόηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων θλίψης
- ✓ Η χρησιμοποίηση των μηχανών θλίψης, πραγματοποιώντας πειράματα
- ✓ Η κατασκευή γύψου και τσιμέντου
- ✓ Η κατανόηση της αντοχής διαφόρων υλικών στη θλίψη

Τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν:

- ✓ Δυσκολίες κατά την κατασκευή δειγμάτων επίπεδων επιφανειών
- ✓ Προβλήματα κατά τη διαδικασία της συσχέτισης λόγω ακατάλληλου φωτισμού ή σχεδίου στιγμάτων
- ✓ Έλλειψη βιβλιογραφίας για τη μέθοδο και το σύστημα

Προτάσεις για συνέχεια της εργασίας/έρευνας:

- ✓ Πραγματοποίηση πιο σύνθετων πειραμάτων και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αυτά της θεωρίας ή με αποτελέσματα αριθμητικών μεθόδων
- ✓ Εντρύφηση στον αλγόριθμο του συστήματος και λεπτομερής μελέτη του τρόπου λειτουργίας του προγράμματος
- ✓ Εφαρμογές της μεθόδου σε τεχνικά έργα μεγαλύτερων διαστάσεων, χρησιμοποιώντας κατάλληλο φακό, για τη μέτρηση των παραμορφώσεων που υφίστανται
- ✓ Μέτρηση και μελέτη των παραμορφώσεων στις 3 διαστάσεις, με τη βοήθεια μίας επιπλέον κάμερας

9. Βιβλιογραφία-Πηγές

- Hung P.Ch., Voloshin A.S., *“In-plane Strain Measurement by Digital Image Correlation”*, PhotoMechanics Laboratory, Department of Mechanical Engineering & Mechanics, Lehigh University, Bethlehem, PA 18015
- Cintrón R., Dr. Saouma V., (Summer 2008), *“Strain Measurements with the Digital Image Correlation-System Vic-2D”*, Home Institution: University of Puerto Rico, Mayagüez, Host Institution: University of Colorado, Boulder
- Zhao H., Zhao L., *“Camera Calibration Using Neural Network for Image-Based Soil Deformation Measurement Systems”*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 31, No.2, Paper ID GTJ100729, Ιστοσελίδα στο διαδίκτυο: www.astm.org
- Mc Neil S.R., Schreier H., Lichtenberger R., *“Experimental Considerations for 2D Digital Image Correlation”*
- Vutukuri V. S., Lama R.D., Saluja S.S., *“Handbook on Mechanical Properties of Rocks”*
- Frocht, *“Photoelasticity”*, Vol. II
- Orteu J. J., Robert L., *“2-D Deformation Measurement by Digital Image Correlation (DIC)”*
- Ιστοσελίδα: www.limess.com