



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**«Υπολογιστική ανάλυση κάμψης κατασκευών τύπου sandwich με πυρήνα διαβαθμισμένου (graded) υλικού»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΜΑΝΤΖΑΡΟΥΔΗ**

**Επιβλέπων:**

Ε. Ε. Θεοτόκογλου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



Στο Νίκο και το Χρήστο, για όλο το χρόνο συνύπαρξης  
εντός και εκτός μεταπτυχιακού,  
στην οικογένεια, γιατί ήταν εκεί όταν έπρεπε,  
μα πάνω απ' όλα στη Γιώτα, που...τα πάντα! (ξέρει αυτή)



## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Περίληψη.....</b>	<b>7</b>
<b>Summary.....</b>	<b>9</b>
<b>Ευχαριστίες .....</b>	<b>11</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....</b>	<b>13</b>
1.1 Κατασκευές sandwich – μια σύνοψη.....	13
1.2 Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς sandwich κατασκευών .....	14
1.3 Η ιδέα της «διαβάθμισης» (gradation) σε sandwich κατασκευές.....	15
1.4 Μελέτες βηματικά διαβαθμισμένων sandwich κατασκευών .....	16
<b>Κεφάλαιο 2: Πειραματική διαδικασία.....</b>	<b>19</b>
2.1 Εισαγωγή.....	19
2.2 Ανάλυση πειραματικής διαδικασίας.....	20
2.2.1 Διαμορφώσεις κατασκευών sandwich .....	20
2.2.2 Υλικά κατασκευής δοκιμίων.....	21
2.2.3 Εκτέλεση πειράματος.....	23
2.2.4 Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων .....	24
<b>Κεφάλαιο 3: Ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων .....</b>	<b>33</b>
3.1 Κατανόηση της φύσης του προβλήματος .....	33
3.2 Κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου.....	34
3.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείου .....	34
3.2.2 Κατασκευή γεωμετρίας.....	34
3.2.3 Μοντέλο υλικού ενισχυτικών πλακών – MAT_22 (MAT_COMPOSITE_DAMAGE) .....	37
3.2.4 Μοντέλο υλικού ενισχυτικών πλακών – MAT_54/55 (MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE) .....	42
3.2.5 Μοντέλο υλικού πρηγώνων – MAT_26 (MAT_HONEYCOMB) .....	51
3.2.6 Μοντέλο υλικού κυλίνδρων στήριξης & κυλίνδρου φόρτισης – MAT_20 (MAT_RIGID) .....	74
3.2.7 Διακριτοποίηση.....	75

3.2.8 Συνένωση των επιμέρους συστατικών των <i>sandwich</i> κατασκευών .....	77
3.3 Φόρτιση - Επίλυση.....	77
3.3.1 Φόρτιση μέσω ορισμού επαφών .....	77
3.3.2 Χρονικό βήμα επίλυσης - Ταχύτητα φόρτισης.....	79
<b>Κεφάλαιο 4: Σύγκριση πειραματικών - αριθμητικών</b>	
<b>αποτελεσμάτων .....</b>	<b>81</b>
<b>Κεφάλαιο 5: Παραμετρική ανάλυση.....</b>	<b>107</b>
<b>Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα .....</b>	<b>163</b>
<b>Κεφάλαιο 7: Προτάσεις για επιπλέον έρευνα.....</b>	<b>167</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>169</b>

## Περίληψη

Η ταχύτατη τεχνολογική εξέλιξη σε συνδυασμό με την ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για εξοικονόμηση πόρων έχει οδηγήσει τη βιομηχανία στην αναζήτηση μεθόδων για όσο το δυνατόν ελαφρύτερες και συνάμα ανθεκτικότερες κατασκευές. Μια τέτοια μέθοδος είναι η κατασκευή των δομών τύπου sandwich, όπου υψηλής αντοχής λεπτόπαχες πλάκες (ενισχυτικές πλάκες) συνδυάζονται με παχύτερες στρώσεις υπερελαφρών υλικών (πυρήνας) για να διαμορφώσουν μια σύνθετη δομή με βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά, χωρίς σημαντικό κόστος κατασκευής. Τις τελευταίες δεκαετίες, τέτοιου είδους δομές έχουν αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για μια πληθώρα τομέων της βιομηχανίας.

Μια σχετικά πρόσφατη σχεδιαστική ιδέα, η οποία βρίσκει πρόσφορο έδαφος εφαρμογής και στις sandwich κατασκευές είναι αυτή της «διαβάθμισης» (gradation), όπου στη θέση δομικών συστατικών ομοιογενούς σύστασης επιχειρείται η τοποθέτηση δομικών συστατικών με μεταβαλλόμενες ιδιότητες, σε μικροσκοπικό ή μακροσκοπικό επίπεδο. Στόχος αυτού του είδους επέμβασης είναι η μεταβολή της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών στις οποίες εφαρμόζεται, κατά τρόπο επιθυμητό. Αυτή η μεταβολή μπορεί να αφορά μια πληθώρα παραμέτρων, όπως τα μέγιστα φορτία που μπορεί να φέρει μια κατασκευή στη διάρκεια μιας φόρτισης, τον τρόπο εξέλιξης των φορτίων σε όλο το εύρος καταπόνησης της κατασκευής, τον τρόπο κατανομής των εμφανιζόμενων παραμορφώσεών της, τα είδη αστοχιών που επέρχονται, καταστροφικά ή μη κλπ.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην υπολογιστική ανάλυση, μέσω της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, δοκών τύπου sandwich με ομοιογενείς και διαβαθμισμένους (graded) πυρήνες, υποβαλλόμενες σε κάμψη τριών (3) σημείων. Τα δομικά συστατικά των δοκών sandwich που μελετήθηκαν είναι στρώσεις συνθέτου υλικού τύπου GFRP (συνδυασμός ινών γυαλιού και εποξικής ρητίνης) για τις ενισχυτικές πλάκες, και πολυμερικοί αφροί PVC για τους πυρήνες. Η ανάπτυξη των αριθμητικών μοντέλων στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού LS-DYNA®. Αρχικά προσομοιώθηκαν τρεις (3) περιπτώσεις δοκών sandwich, μία εκ των οποίων με ομοιογενή πυρήνα και δύο με διαβαθμισμένο (graded) πυρήνα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία, με ικανοποιητική συσχέτιση. Η μελέτη στη συνέχεια επεκτάθηκε σε δοκούς με διαφορετική γεωμετρία, και συγκεκριμένα με αυξημένο πάχος πυρήνα σε σχέση με τις αρχικές. Επιπρόσθετα, υποβλήθηκαν σε μελέτη και διαφορετικοί τύποι διαβάθμισης (gradation) του πυρήνα, τόσο για την αρχική γεωμετρία όσο και για τις γεωμετρίες με αυξημένο πάχος. Εξήχθησαν ποιοτικά

συμπεράσματα που αφορούν την επίδραση του πάχους του πυρήνα των υπό εξέταση δοκών σε συνδυασμό με το είδος διαβάθμισης (gradation) του. Η σύνοψη των συμπερασμάτων αυτών κατέδειξε ότι η μέθοδος διαβάθμισης (gradation) του πυρήνα των δοκών sandwich δεν αποτελεί μια ιδανική λύση για την καθολική βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς, αλλά κυρίως ένα μέσο για να οδηγηθεί ο τρόπος παραμόρφωσης της κατασκευής και η εμφάνιση αστοχιών, καταστροφικών και μη, σε συγκεκριμένη κατεύθυνση.



## Summary

The rapid technological evolution in combination with the increasing need for resources saving, has led industry in the search of methods for as more light-weight and simultaneously stiffer structures as possible. One such method is the construction of sandwich structures, where stiff thin plates (skin panels) are combined with thick layers of light-weight materials (cores) to form a composite structure with improved mechanical behavior, with insignificant manufacturing cost. Over the last decades, such structures have been proved an important tool for a variety of industry sectors.

A relatively recent design concept, which has potential for application in sandwich structures as well, is that of «gradation», where in the place of structural components of homogeneous nature the installation of components with varying properties in microscopic or macroscopic level is performed. Intention of this kind of intervention is the modification of the mechanical behavior of the structures where it is applied, in a desirable manner. This modification may regard a wide range of parameters, like the maximum loads a structure is able to bear during a loading case, the way of load evolution in the whole range of loading, the distribution of the deformations developed, the kinds of failure, destructive or not etc.

The present thesis focuses in the computational analysis, through the method of Finite Elements, of sandwich beams with homogeneous or graded cores, under three-point bending. The structural components of the sandwich beams under study were skin panels of the GFRP type (glass fibers – epoxy resin) and polymeric PVC foams for the cores. The development of numerical models in the frame of the present thesis was performed with the commercial software LS-DYNA®. Initially, three (3) cases of sandwich beams were simulated, one with a homogeneous core and two with graded cores. The results that were obtained were compared with experimental results from the literature, with satisfying correlation. The study then expanded in beams with different geometry, and more specifically with increased core thickness. Moreover, different gradation types in the core were studied, not only for the initial geometry, but for the geometries with increased core thickness as well. Qualitative conclusions were reached, regarding the effect the core thickness combined with the gradation type has. The synopsis of these results showed that the method of gradation in the core of sandwich beams is not an ideal solution for the overall improvement of their mechanical behavior, but rather a mean to lead the deformation of the structure and the failure appearance, catastrophic or not, in a specific direction.



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου, Καθηγητή κ. Ευστάθιο Θεοτόκογλου, αφενός για την υπομονή του όλο αυτό το διάστημα, και αφετέρου για την πληθώρα ποιοτικών κατευθύνσεων που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Ιδιαίτερα τον ευχαριστώ και για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να συμμετάσχω, με παρουσίαση αποτελεσμάτων της εργασίας, στο συνέδριο «12<sup>th</sup> International Conference on Sandwich Structures», που διεξήχθη στο Πολυτεχνείο της Λωζάνης το διάστημα 21-23 Αυγούστου 2018. Ευχαριστώ επίσης όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους, που στάθηκαν δίπλα μου με τον οποιονδήποτε τρόπο κατά τη διάρκεια της συμμετοχής μου στο ΔΠΜΣ Υπολογιστική Μηχανική.



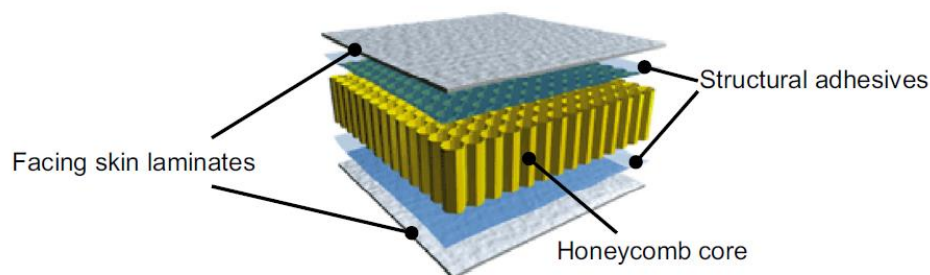
## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Κατασκευές sandwich – μια σύνοψη

Οι κατασκευές τύπου sandwich αποτελούν, εδώ και μερικές δεκαετίες, ένα πολύ βασικό δομικό εργαλείο για μια πλειάδα τομέων της βιομηχανίας, όπως:

- Αεροναυπηγική – αεροδιαστημική
- Ναυπηγική
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ ανεμογεννήτριες)
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Κατασκευή κτιρίων

Η απαίτηση για τη χρήση sandwich κατασκευών προέκυψε από την ανάγκη για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του βάρους των κατασκευών, χωρίς ωστόσο να υποβαθμίζονται οι μηχανικές τους ιδιότητες λόγω του μειωμένου βάρους. Είναι αληθές πως οι sandwich κατασκευές αποτελούν μια πολύ καλή λύση συνδυασμού υψηλών μηχανικών επιδόσεων σε σχέση με ένα ικανοποιητικά μικρό βάρος. Οι τυπικές δομές sandwich αποτελούνται από ένα συνδυασμό λεπτόπαχων, υψηλής αντοχής, ενισχυτικών πλακών (skin panels), και ενός πυρήνα πολύ μεγάλου πάχους και πολύ μικρού βάρους σε σχέση με τις ενισχυτικές πλάκες. Η σύνδεση μεταξύ των δομικών στοιχείων αυτών επιτυγχάνεται κυρίως με συγκόλληση. Αντιπροσωπευτική είναι το Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Τυπικό δείγμα κατασκευής τύπου sandwich.

Οι ενισχυτικές πλάκες των sandwich κατασκευών τυπικά αποτελούνται είτε από μεταλλικά κράματα, είτε από στρώσεις συνθέτου υλικού, είτε από ένα συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων περιπτώσεων (τέτοια περίπτωση είναι τα υλικά FMLs (Fiber Metal Laminates, όπου εναλλάσσονται στρώσεις μετάλλου και συνθέτου υλικού). Όσον αφορά τα μεταλλικά κράματα, το συνηθέστερο μέταλλο του οποίου τα κράματα

χρησιμοποιούνται είναι το αλουμίνιο, λόγω κυρίως του μικρού βάρους που διαθέτει έναντι π.χ. κραμάτων χάλυβα ή τιτανίου. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται στρώσεις συνθέτων υλικών για τη δόμηση των ενισχυτικών πλακών, αυτές αποτελούνται συνήθως από ένα συνδυασμό πολυμερούς ρητίνης και ενισχυτικών ινών κατασκευασμένων από μια πλειάδα υλικών από ίνες άνθρακα, γυαλιού, αραμιδίου, σπανιότερα βορίου κλπ. Συνδυάζοντας κατάλληλα τις στρώσεις αυτές συνθέτου υλικού, με τεχνικές όπως τοποθέτηση των ενισχυτικών ινών σε διάφορες διευθύνσεις, είναι δυνατή η επιλεκτική ενίσχυση των ιδιοτήτων των ενισχυτικών πλακών συνολικά, με τον τρόπο που επιθυμείται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

Όσον αφορά τους πυρήνες των κατασκευών sandwich, επίσης διατίθεται ένα εύρος υλικών τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό. Τα κυριότερα από αυτά είναι οι πολυμερείς αφροί (PE (polyethylene – πολυαιθυλένιο), PUR (polyurethane – πολυουρεθάνη), PVC (polyvinylchloride – πολυβινυλοχλωρίδιο) κλπ.), οι μεταλλικοί αφροί (αφρός αλουμινίου), οι δομές τύπου honeycomb (κατασκευασμένες από συμπιεσμένο χαρτί, φύλλα μετάλλου, φύλλα πλαστικού κλπ.) και τέλος τύποι ξύλου όπως το ευρέως χρησιμοποιούμενο Balsa wood.

Σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι να λάβει ο αναγνώστης λεπτομέρειες που αφορούν τους τρόπους δόμησης και τα χρησιμοποιούμενα υλικά στις sandwich κατασκευές. Πληθώρα πληροφοριών μπορούν να αναζητηθούν στην διαθέσιμη βιβλιογραφία, όπου αρκετά συγγράματα ασχολούνται με το συγκεκριμένο θέμα.

## **1.2 Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς sandwich κατασκευών**

Δεδομένου του τεράστιου ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν οι συγκεκριμένες κατασκευές, αλλά και της ανάγκης που υπάρχει για τη χρήση τους από πολλούς τομείς της βιομηχανίας, δεν θα μπορούσαν παρά να έχουν υποβληθεί σε έναν αρκετά μεγάλο όγκο έρευνας, εδώ και αρκετά χρόνια, μια έρευνα η οποία εκτείνεται σε πειραματικό, αναλυτικό και αριθμητικό επίπεδο. Μεγάλο είναι το εύρος των μηχανικών καταπονήσεων των sandwich κατασκευών οι οποίες έχουν μελετηθεί, και οι οποίες εκτείνονται από στατικά προβλήματα βασικών καταπονήσεων, όπως εφελκυσμός, θλίψη, λυγισμός, κάμψη, στρέψη και συνδυασμοί αυτών, μέχρι δυναμικά προβλήματα κόπωσης και διάδοσης ρωγμών, καθώς και προβλήματα κρούσης διαφόρων ταχυτήτων ή προβλήματα εκρηκτικών φορτίσεων. Βεβαίως, έχουν μελετηθεί και περιπτώσεις πραγματικών δομικών τμημάτων μεγάλων κατασκευών, υποβαλλόμενων στα πραγματικά φορτία που αντιμετωπίζουν στο χώρο εφαρμογής τους.

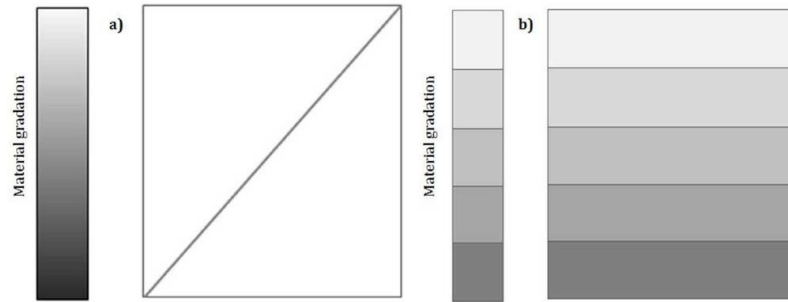
Βασικό εργαλείο στη διάθεση του μηχανικού αποτελούν οι υπολογιστικές μέθοδοι, των οποίων η χρήση αυξάνεται ολοένα και περισσότερο, δεδομένης της ανάπτυξης των δυνατοτήτων για περισσότερη υπολογιστική ισχύ. Από την άλλη μεριά, η χρήση τέτοιων μεθόδων καθίσταται και επιβεβλημένη από ένα σημείο και μετά, καθώς η ανάγκη για ανάλυση συνθετότερων σχεδιαστικά κατασκευών σε συνδυασμό με την ανάγκη για διερεύνηση μη γραμμικών φαινομένων σε όλο και μεγαλύτερη έκταση, καθιστά τις αναλυτικές μεθόδους μη λειτουργικές.

### 1.3 Η ιδέα της «διαβάθμισης» (gradation) σε sandwich κατασκευές

Όπως προαναφέρθηκε, η τυπική μορφή μιας sandwich κατασκευής είναι ένας συνδυασμός λεπτόπαχων ενισχυτικών πλακών με έναν αρκετά παχύτερο πυρήνα από ελαφρύ υλικό. Στην περίπτωση αυτή, ο πυρήνας από μακροσκοπική άποψη είναι απολύτως ομοιογενής, και μόνο σε μικροσκοπικό επίπεδο υπάρχουν πιθανές ανομοιογένειες λόγω τυπικών ελαττωμάτων που εμφανίζονται κατά την παρασκευή των υλικών, χωρίς ωστόσο να καταστρέφουν τη γενική ομοιογένεια του υλικού. Μια ιδέα για την βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των sandwich κατασκευών αποτελεί η εφαρμογή κάποιου είδους «διαβάθμισης» στον πυρήνα τους, κατάσταση η οποία περιγράφεται ικανοποιητικότερα από τον αγγλικό όρο «gradation». Ο όρος «gradation» αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία οι ιδιότητες του πυρήνα (μηχανικές, θερμικές, ακουστικές κλπ.) μεταβάλλονται κατά κάποια διεύθυνση του, με συνηθέστερη την κατά το πάχος του. Για τη μεταβολή αυτή των ιδιοτήτων του πυρήνα, δύο βασικοί τρόποι ακολουθούνται:

- **Συνεχής διαβάθμιση (continuous or functional gradation):** στην περίπτωση αυτή, η μεταβολή των ιδιοτήτων γίνεται με συνεχή τρόπο μέσω κάποιας αναλυτικής συνάρτησης, εξ ου και ο χαρακτηρισμός «functional». Ο πυρήνας μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα υλικό
- **Βηματική διαβάθμιση (step-wise gradation):** στην περίπτωση αυτή, διαφορετικά ομοιογενή υλικά συνδυάζονται ώστε να δημιουργήσουν μια δομή η οποία σε μακροσκοπικό επίπεδο θα είναι με διαβάθμιση, με τη μεταβολή των ιδιοτήτων ωστόσο να γίνεται με βηματικό τρόπο, καθώς κανείς μετακινείται από το ένα υλικό στο άλλο, και όχι με κάποια συνεχή συνάρτηση όπως προηγουμένως.

Ενδεικτικό είναι το παράδειγμα του Σχήματος 1.2.



Σχήμα 1.2: Σχηματική απεικόνιση συνεχούς διαβάθμισης (*continuous or functional gradation*) (αριστερά) και βηματικής διαβάθμισης (*step-wise gradation*) (δεξιά)[1].

Το πεδίο ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας εστιάζεται στην δεύτερη περίπτωση από τις δύο προαναφερθείσες, αυτή της βηματικής διαβάθμισης, και πιο συγκεκριμένα, εφαρμοζόμενης στον πυρήνα sandwich κατασκευών. Η περίπτωση αυτή διαβάθμισης (*gradation*) είναι σχετικά απλή, καθώς πρακτικά πραγματοποιείται με την απλή συνένωση σε ένα συσσωμάτωμα διαφορετικών προϋπαρχόντων υλικών. Παραδείγματος χάριν, σε μια απλή δοκό ή πλάκα τύπου sandwich, ένας τυπικός τρόπος επίτευξης βηματικής διαβάθμισης (*step-wise gradation*) στον πυρήνα είναι η συγκόλληση στρωμάτων αφρού διαφορετικής πυκνότητας, η συγκόλληση στρωμάτων αφρού από διαφορετικό μητρικό υλικό ή η συγκόλληση στρωμάτων honeycomb με διαφορετικά σχήματα κελιών ή με διαφορετική πυκνότητα κελιών ή με διαφορετικό υλικό κατασκευής.

#### 1.4 Μελέτες βηματικά διαβαθμισμένων sandwich κατασκευών

Μετά από έρευνα στη διαθέσιμη βιβλιογραφία, διαπιστώθηκε ότι δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλος ο αριθμός των πειραματικών και υπολογιστικών μελετών που να αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά κατασκευών sandwich με βηματική διαβάθμιση υλικών. Οι Anila et al [2] πραγματοποίησαν πειραματική μελέτη κάμψης τριών σημείων σε δοκούς sandwich με βηματική διαβάθμιση πυρήνα. Χρησιμοποίησαν τέσσερις διαφορετικούς πολυμερικούς αφρούς (πολυστυρένιο), συνδυάζοντάς τους με τρόπο ώστε η πυκνότητά τους και άρα η αντοχή τους να μεταβάλλεται τη μία φορά με φθίνοντα και την άλλη με αύξοντα τρόπο από την μία ενισχυτική πλάκα της δοκού ως την άλλη. Οι μετρήσεις τους, συγκρινόμενες με περίπτωση ομοιογενούς πυρήνα, δείξαν βελτίωση της συμπεριφοράς των δοκών όσον αφορά τα μέγιστα φορτία που μπορεί να αντέξει η κατασκευή, καθώς και επιρροή του είδους διαβάθμισης στον τρόπο παραμόρφωσης της κατασκευής και της συμπεριφοράς της στη μη γραμμική περιοχή. Οι Zhou et al [3]



πραγματοποίησαν πειράματα κρούσης χαμηλής ταχύτητας σε κατασκευές sandwich με πυρήνες αποτελούμενους κάθε φορά από τρία (3) στρώματα πολυμερικού αφρού. Συνολικά εννέα (9) διαφορετικοί πολυμερικοί αφροί PVC συνδυάστηκαν για να σχηματίσουν δώδεκα (12) διαφορετικής βηματικής διαβάθμισης πυρήνες. Το βασικό συμπέρασμά τους αφορούσε την μεταβολή της αντίστασης των κατασκευών σε διάτρηση ανάλογα με τον τύπο της βηματικής διαβάθμισης των πυρήνων, όπου η ύπαρξη του ισχυρότερου αφρού στην επάνω επιφάνεια της κατασκευής (αυτής που έρχεται δηλαδή πρώτη σε επαφή με το βλήμα κρούσης) αύξανε την αντίσταση αυτή. Μελετήθηκε επίσης η σχέση κόστους/ενέργειας διάτρησης ανάλογα με τον τύπο της βηματικής διαβάθμισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν και με αριθμητικά αποτελέσματα από το λογισμικό ABAQUS®, με πολύ ικανοποιητική συσχέτιση. Οι Rajaneesh et al [4] μελέτησαν κυκλικές κατασκευές sandwich με πυρήνες με βηματική διαβάθμιση υπό κρούση χαμηλής ταχύτητας, συνδυάζοντας κάθε φορά δύο στρώματα αφρού για να επιτευχθεί αυτό. Χρησιμοποιήθηκαν δύο πολυμερικοί αφροί PVC, ένας χαμηλής και ένας υψηλής πυκνότητας, καθώς επίσης και ένας αφρός αλουμινίου. Συνδυάζοντας τα τρία ανωτέρω υλικά, κατασκευάστηκαν τρεις (3) διαφορετικοί πυρήνες. Η μελέτη τους εστιάστηκε στην παρακολούθηση μεγεθών όπως η απορροφώμενη ενέργεια και το μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στην κατασκευή κατά τη διάρκεια της διάτρησης, καθώς και στον τρόπο αστοχίας των βηματικά διαβαθμισμένων πυρήνων αφρού ανάλογα με το συνδυασμό των αφρών που χρησιμοποιήθηκε. Το συμπέρασμα τους ήταν ότι το είδος διαβάθμισης στον πυρήνα επηρεάζει όλα τα ανωτέρω μεγέθη. Τα πειραματικά τους αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν επιτυχώς και με αριθμητικά από το λογισμικό LS-DYNA®. Οι Liu et al [5] μελέτησαν με αριθμητικά μοντέλα σε λογισμικό LS-DYNA® την αντίσταση σε εκρηκτικό φορτίο αέρα (air blast loading) κατασκευών sandwich με ενισχυτικές πλάκες χάλυβα και βηματικά διαβαθμισμένους πυρήνες από αφρούς αλουμινίου. Έξι (6) τύποι αφρών διαφορετικής πυκνότητας (άρα και αντοχής) χρησιμοποιήθηκαν συνολικά, για να κατασκευαστούν ομοιογενείς διαμορφώσεις πυρήνα, βηματικά διαβαθμισμένες διαμορφώσεις με δύο (2) στρώματα αφρού, και βηματικά διαβαθμισμένες διαμορφώσεις με έξι (6) στρώματα αφρού. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι η βηματική διαβάθμιση επιδρά στον τρόπο παραμόρφωσης των κατασκευών sandwich κατά το πάχος τους, μειώνοντάς τις μέγιστες παραμορφώσεις και αυξάνοντας την αντίσταση σε εκρηκτικό φορτίο. Ιδιαίτερο σχόλιο έγινε ωστόσο στον τρόπο συγκόλλησης των στρωμάτων αφρού μεταξύ τους στις διαβαθμισμένες διαμορφώσεις, όπου τονίστηκε ότι απαιτείται συγκεκριμένη αντοχή στη συγκόλληση για να ενεργοποιηθούν οι παραπάνω θετικές επιδράσεις της βηματικής διαβάθμισης. Τέλος, οι Kaboglu et al [6] χρησιμοποίησαν τρεις (3) διαφορετικούς τύπους πολυμερικού αφρού PVC για να κατασκευάσουν έναν ομοιογενή και δύο βηματικά διαβαθμισμένους

πυρήνες, τους οποίους συνδύασαν με ενισχυτικές πλάκες από σύνθετο υλικό τύπου GFRP (ίνες γυαλιού – εποξική ρητίνη) για να κατασκευάσουν δοκούς τύπου sandwich. Μελέτησαν τις δομές αυτές σε πειράματα κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων. Μια πλήρης ανάλυση της περίπτωσης αυτής δίνεται στο Κεφάλαιο 2, καθώς η συγκεκριμένη έρευνα αποτέλεσε την αφορμή και την πειραματική βάση της παρούσας εργασίας.

Παρατηρείται λοιπόν ότι είναι αρκετά μικρό το εύρος των περιπτώσεων βηματικής διαβάθμισης πυρήνων σε sandwich κατασκευές που έχει μελετηθεί γενικά στη βιβλιογραφία. Η παρούσα εργασία επιχειρεί την ανάπτυξη επαρκών αριθμητικών μοντέλων που να προσομοιώνουν την κάμψη τριών σημείων των δοκών τύπου sandwich που μελετήθηκαν από τους Kaboglu et al [6], ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία για την μελέτη παρόμοιων περιπτώσεων κατασκευών, χωρίς να απαιτείται η εκτέλεση πειραμάτων.

## Κεφάλαιο 2: Πειραματική διαδικασία

### 2.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, το βασικό κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας υπήρξαν τα πειράματα των Kaboglu et al [6] που εκτελέστηκαν στο Imperial College του Λονδίνου και τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στο συνέδριο 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials στην Κοπεγχάγη (19 – 24 Ιουλίου 2015). Στην ιδανική περίπτωση, θα ήταν επιθυμητό να υπάρξει δυνατότητα εκτέλεσης ξεχωριστής πειραματικής διαδικασίας από τους συγγραφείς της παρούσας εργασίας, στα πρότυπα της προαναφερθείσας. Κάτι τέτοιο θα έδινε τη δυνατότητα για τον πλήρη έλεγχο τόσο της προετοιμασίας και εκτέλεσης των πειραμάτων, όσο και της εξαγωγής ακριβών μετρήσεων και καταγραφής των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν ήταν δυνατό, με αποτέλεσμα η πειραματική βάση επάνω στην οποία δομήθηκε η εργασία να είναι η παρεχόμενη από τους Kaboglu et al [6].

Σκοπός της συγκεκριμένης πειραματικής μελέτης ήταν ο προσδιορισμός και η κατανόηση του αποτελέσματος που έχει η αλλαγή της διαμόρφωσης του πυρήνα μιας sandwich κατασκευής στη μηχανική συμπεριφορά της. Όπως επισημάνθηκε από τους συγγραφείς της, η ανάγκη για κάτι τέτοιο προκύπτει έντονη από την αυξανόμενη χρήση δομών sandwich για την κατασκευή πτερυγίων σε ανεμογεννήτριες, που ωστόσο δεν αποτελεί και τη μόνη χρήση, μιας και οι sandwich κατασκευές αποτελούν βασικό εργαλείο και άλλων κλάδων της βιομηχανίας όπως της ναυπηγικής, της αεροναυπηγικής ή της αυτοκινητοβιομηχανίας. Πιο συγκεκριμένα, δοκοί sandwich κατασκευασμένες από GFRP ενισχυτικές πλάκες (skin panels) και πυρήνα από αφρούς PVC μελετήθηκαν σε στατικά πειράματα κάμψης τριών (3) και τεσσάρων (4) σημείων. Τα δύο συγκεκριμένα πειράματα είναι σημαντικά για τον χαρακτηρισμό των sandwich κατασκευών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πτερυγίων ανεμογεννητριών, καθώς αυτά υπόκεινται σε ένα συνεχές καμπτικό φορτίο καθ' όλη τη διάρκεια της επιχειρησιακής ζωής τους. Επισημαίνεται ότι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μόνο το τμήμα της πειραματικής διαδικασίας που αφορούσε την κάμψη τριών (3) σημείων εξετάστηκε.

## 2.2 Ανάλυση πειραματικής διαδικασίας

### 2.2.1 Διαμορφώσεις κατασκευών sandwich

Όπως επισημάνθηκε ανωτέρω, ο στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι η επίδραση της διαμόρφωσης του πυρήνα στη μηχανική συμπεριφορά σε κάμψη των κατασκευών sandwich που μελετώνται. Σε αυτή την κατεύθυνση, μία ομάδα τριών (3) διαφορετικών διαμορφώσεων μελετήθηκαν, με τις ενισχυτικές πλάκες (skin panels) να διατηρούνται κάθε φορά ίδιες. Οι τρεις (3) διαφορετικές διαμορφώσεις προέκυψαν από τη συνδυαστική χρήση τριών (3) ειδών αφρών PVC, με διαφορετικές πυκνότητες (60, 80 και 100 kg/m<sup>3</sup>). Οι πυκνότητες αυτές θα αναφέρονται ως «ΧΑΜΗΛΗ», «ΜΕΣΑΙΑ» και «ΥΨΗΛΗ» αντίστοιχα (περισσότερες λεπτομέρειες για τους αφρούς δίνονται παρακάτω). Συνδυάζοντας λοιπόν τους τρεις (3) αυτούς αφρούς προκύπτουν οι ακόλουθοι τύποι διαμόρφωσης πυρήνα:

- Πυρήνας με τρία (3) στρώματα αφρού πυκνότητας 80 kg/m<sup>3</sup> (θα αναφέρεται ως [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ]). Αυτή η διαμόρφωση χαρακτηρίζεται ως «ομοιογενής».
- Πυρήνας με δύο (2) εξωτερικά στρώματα αφρού πυκνότητας 100 kg/m<sup>3</sup> και ένα (1) εσωτερικό πυκνότητας 60 kg/m<sup>3</sup> (θα αναφέρεται ως [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ]). Αυτή η διαμόρφωση χαρακτηρίζεται ως «διαβαθμισμένη (graded)».
- Πυρήνας με δύο (2) εξωτερικά στρώματα αφρού πυκνότητας 60 kg/m<sup>3</sup> και ένα (1) εσωτερικό πυκνότητας 100 kg/m<sup>3</sup> (θα αναφέρεται ως [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ]). Αυτή η διαμόρφωση χαρακτηρίζεται ως «διαβαθμισμένη (graded)».

Σημειώσεις:

- Εκτός της ομοιογενούς διαμόρφωσης [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ], χρησιμοποιήθηκε και μία διαμόρφωση [ΜΕΣΑΙΑ], όπου αντί για τρία (3) στρώματα από τον ίδιο τύπο αφρού χρησιμοποιήθηκε ένα με πάχος ίσο με το συνολικό πάχος των τριών. Η διαμόρφωση αυτή υποβλήθηκε μόνο σε κάμψη τεσσάρων (4) σημείων και στόχος της ήταν η ανάδειξη της σημασίας ή μη της συγκόλλησης των επιμέρους στρωμάτων αφρού μεταξύ τους. Το πείραμα έδειξε ότι η συγκόλληση δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά των δοκιμών, μιας και η συγκόλληση δεν αστόχησε πουθενά, οπότε θεωρείται ότι το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να ληφθεί ως έγκυρο και για την περίπτωση της κάμψης τριών (3) σημείων.

- Για την χρήση ενός κοινού σημείου αναφοράς, ενός μεγέθους ως προς το οποίο τα δοκίμια θα εμφάνιζαν τα ίδια χαρακτηριστικά, επιλέχθηκε η πυκνότητα του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, καταβλήθηκε προσπάθεια, δεδομένων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τον πυρήνα, να παραμείνει σχεδόν σταθερή η μακροσκοπική πυκνότητα του πυρήνα κοντά στην τιμή  $80 \text{ kg/m}^3$  (αποτυπώνεται καλύτερα σε παρακάτω Πίνακα 2.1).

### 2.2.2 Υλικά κατασκευής δοκιμών

Οι αφροί PVC που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των τριών (3) διαφορετικών διαμορφώσεων που παρουσιάστηκαν ανωτέρω είναι μέρος μιας σειράς PVC αφρών με την εμπορική ονομασία AIREX C70, κατασκευαζόμενων από την εταιρεία 3A Composites AirexBaltekBanova®. Οι τρεις (3) διαφορετικοί τύποι που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτέλεση των πειραμάτων είναι, κατά αύξουσα σειρά πυκνότητας ( $60, 80$  και  $100 \text{ kg/m}^3$ ), οι αφροί C70.55, C70.75 και C70.90. Μερικά από τα χαρακτηριστικά τους, όπως αναφέρονται στο τεχνικό φυλλάδιο που παρέχεται στο Διαδίκτυο από τον κατασκευαστή τους [7] είναι τα ακόλουθα:

- Εξαιρετικοί λόγοι αντοχών – ακαμψιών σε σχέση με το βάρος του αφρού (strength and stiffness to weight ratio)
- Καλή αντοχή σε κρούση (good impact strength)
- Χαμηλή απορροφητικότητα ρητινών (low resin absorption) (η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική ειδικά για τις εφαρμογές όπου κατασκευάζεται ένας μακροσκοπικά διαβαθμισμένος (graded) πυρήνας συνδυάζοντας διαφορετικά υλικά μεταξύ τους. Η χαμηλή απορροφητικότητα ρητινών μεταφράζεται σε μη επηρεασμό των ιδιοτήτων των υλικών στις επιφάνειες συγκόλλησης, μιας και η ρητίνη συγκόλλησης δεν απορροφάται σε βάθος από τον αφρό).
- Υψηλή αντοχή σε κόπωση (high fatigue resistance)
- Ικανοποιητική συμπεριφορά σε καύση (good fire performance)
- Υψηλή θερμική και ηχητική μονωτική ικανότητα (high sound and thermal insulation)

Το εύρος των εφαρμογών στις οποίες οι συγκεκριμένοι αφροί θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είναι μεγάλο και περιλαμβάνει τους τομείς της ναυπηγικής, αεροναυπηγικής, αιολικής ενέργειας και μεταφορών.

Στο προαναφερθέν τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή [7] παρατίθενται κάποιες από τις σημαντικότερες ιδιότητες των αφρών που εξετάζονται (βλ. Σχήμα 2.1).



Typical properties for AIREX® C70		Unit (metrical)	Value <sup>1)</sup>	C70.40	C70.48	C70.55	C70.75	C70.90	C70.130	C70.200	C70.250
Density	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	Average Typ. range	40	48 43 - 55	60 54 - 69	80 72 - 92	100 90 - 115	130 120 - 150	200 180 - 250	250 225 - 288
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	0.45	0.60 0.50	0.90 0.75	1.45 1.10	2.0 1.7	3.0 2.6	5.2 4.5	6.6 5.3
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	41	48 35	69 55	104 80	130 110	170 145	280 240	350 280
Tensile strength in the plane	ISO 527 1-2	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	0.70	0.95 0.8	1.3 1.0	2.0 1.6	2.7 2.2	4.0 3.0	6.0 4.8	7.5 5.5
Tensile modulus in the plane	ISO 527 1-2	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	28	35 28	45 35	66 50	84 65	115 95	175 140	230 160
Shear strength	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	0.45	0.55 0.50	0.85 0.70	1.2 1.0	1.7 1.4	2.4 2.1	3.5 3.2	4.7 3.8
Shear modulus	ASTM C393	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	13	16 14	22 18	30 24	40 34	54 45	75 68	95 78
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average Minimum	8	10 8	16 10	18 10	23 12	30 20	30 20	30 20
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.031	0.031	0.031	0.033	0.035	0.039	0.048	0.056
Standard sheet	Width	mm ± 5		1330	1270	1150	1020	950	850	750	700
	Length	mm ± 5		2850 <sup>2)</sup>	2730 <sup>2)</sup>	2450 <sup>2)</sup>	2180	2050	1900	1600	1500
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 80	5 to 70	5 to 70	3 to 68	3 to 60	5 to 50	5 to 40	5 to 40
Color				light green	violet	yellow	green	red	blue	brown	green

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

<sup>1)</sup> Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm except tensile properties (10 mm) and compressive modulus (40 mm)

<sup>2)</sup> Half size plane sheets for thickness ≤ 8 mm

The data provided gives approximate values for the nominal density and DNV minimum values according to DNV type approval certificate. The information contained herein is believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information. No statement is intended or should be construed as a recommendation to infringe any existing patent.

Σχήμα 2.1: Απόσπασμα από το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή των αφρών C70.55, C70.75 και C70.90, AirexBaltekBanova@.

Με μια πρώτη παρατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζονται στην Σχήμα 2.1, παρατηρείται ότι ορισμένες εξ' αυτών δίνονται σε συγκεκριμένες διευθύνσεις – επίπεδα. Το γεγονός αυτό αποτελεί έναν πρώτο υπαινιγμό για πιθανή ύπαρξη ανισοτροπικών χαρακτηριστικών στους εν λόγω αφρούς. Εκτενέστερη αναφορά στο συγκεκριμένο θέμα πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 3, στα πλαίσια της ανάπτυξης των αριθμητικών μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων. Εκεί, παρατίθενται πειραματικά αποτελέσματα εκτελεσθέντα σε αφρούς του συγκεκριμένου τύπου όπου διευκρινίζεται η ανισοτροπική ή μη συμπεριφορά τους.

Όσον αφορά τα υλικά κατασκευής των ενισχυτικών πλακών (skin panels), αναφέρεται από τους Kaboglu et al [6] ότι είναι τύπου GFRP (Glass-Fiber Reinforced Polymer – συνδυασμός ενισχυτικών ινών γυαλιού και πολυμερούς ρητίνης). Οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού είναι κατασκευασμένες από την εταιρεία Gurit®, με εμπορική ονομασία ΧΕ603 +/-45° υπό μορφή «υφάσματος» με δύο στρώσεις, εξ ου και ο συμβολισμός «+/-45°». Χρησιμοποιώντας τρεις (3) στρώσεις του συγκεκριμένου υφάσματος κατασκευάστηκαν ενισχυτικές πλάκες (skin panels) με τελική διαμόρφωση [0°/90°/-45°/45°/90°/0°]. Το υλικό της μήτρας είναι ένα μίγμα εποξικής ρητίνης Prime 20 LV

συνδυασμένη με σκληρυντή αργής σκλήρυνσης (slow hardener). Το συνολικό πάχος των ενισχυτικών πλακών είναι 1.5 mm.

### 2.2.3 Εκτέλεση πειράματος

Όπως προαναφέρθηκε, για την εκτέλεση των πειραμάτων κάμψης τριών (3) σημείων, κατασκευάστηκαν τρία (3) διαφορετικά δοκίμια. Οι γεωμετρικές τους ιδιότητες καθώς και η διάταξη του πυρήνα αποτυπώνονται στον Πίνακα 2.1. Σημειώνεται ότι τα χρώματα που έχουν αντιστοιχισθεί στους αφρούς είναι τα εμπορικά τους χρώματα, όπως αναφέρονται στο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή [7].

Πίνακας 2.1: Εποπτική απεικόνιση διαμορφώσεων πυρήνα που δοκιμάστηκαν σε κάμψη τριών σημείων.

Διαμόρφωση	[ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ]	[ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ]	[ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ]
	6 στρώσεις GFRP ([0°/90°/-45°/45°/90°/0°] με πάχος 1.5 mm)		
Διάταξη ενισχυτικών πλακών – πυρήνα	C70.75 (5 mm πάχος)	C70.90 (5 mm πάχος)	C70.55 (5 mm πάχος)
	C70.75 (5 mm πάχος)	C70.55 (5 mm πάχος)	C70.90 (5 mm πάχος)
	C70.75 (5 mm πάχος)	C70.90 (5 mm πάχος)	C70.55 (5 mm πάχος)
	6 στρώσεις GFRP ([0°/90°/-45°/45°/90°/0°] με πάχος 1.5 mm)		
Μέση πυκνότητα πυρήνα (kg/m <sup>3</sup> )	80	86.67	73.33
<b>Ονομαστικές διαστάσεις δοκιμίων</b>			
	<b>Μήκος (mm)</b>	<b>Πλάτος (mm)</b>	<b>Συνολικό πάχος (mm)</b>
	300	75	18

Επιπλέον στοιχεία που αφορούν την πειραματική συσκευή δίνονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Στοιχεία πειραματικής διάταξης εκτέλεση κάμψης τριών σημείων.

Απόσταση κυλίνδρων στήριξης (mm)	200
Διάμετρος κυλίνδρων στήριξης - φόρτισης (mm)	12
Ταχύτητα κατάβασης κυλίνδρου στήριξης (mm/min)	6

Η εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα καθοριζόμενα από το πρότυπο C393 της ASTM (Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions) [8].

Το ενδιαφέρον της ομάδας εκτέλεσης του πειράματος επικεντρώθηκε σε δύο βασικά μεγέθη – αποτελέσματα:

- Τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης στον πυρήνα των δοκιμών (core shear stress), σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C393.
- Την χαρτογράφηση των διατμητικών παραμορφώσεων (shear strains) κατά το πάχος του πυρήνα.

Επισημαίνεται ότι η προαναφερθείσα ως διατμητική τάση στον πυρήνα των δοκιμών υπολογίζεται προσεγγιστικά βάσει της Εξίσωσης 2.1.

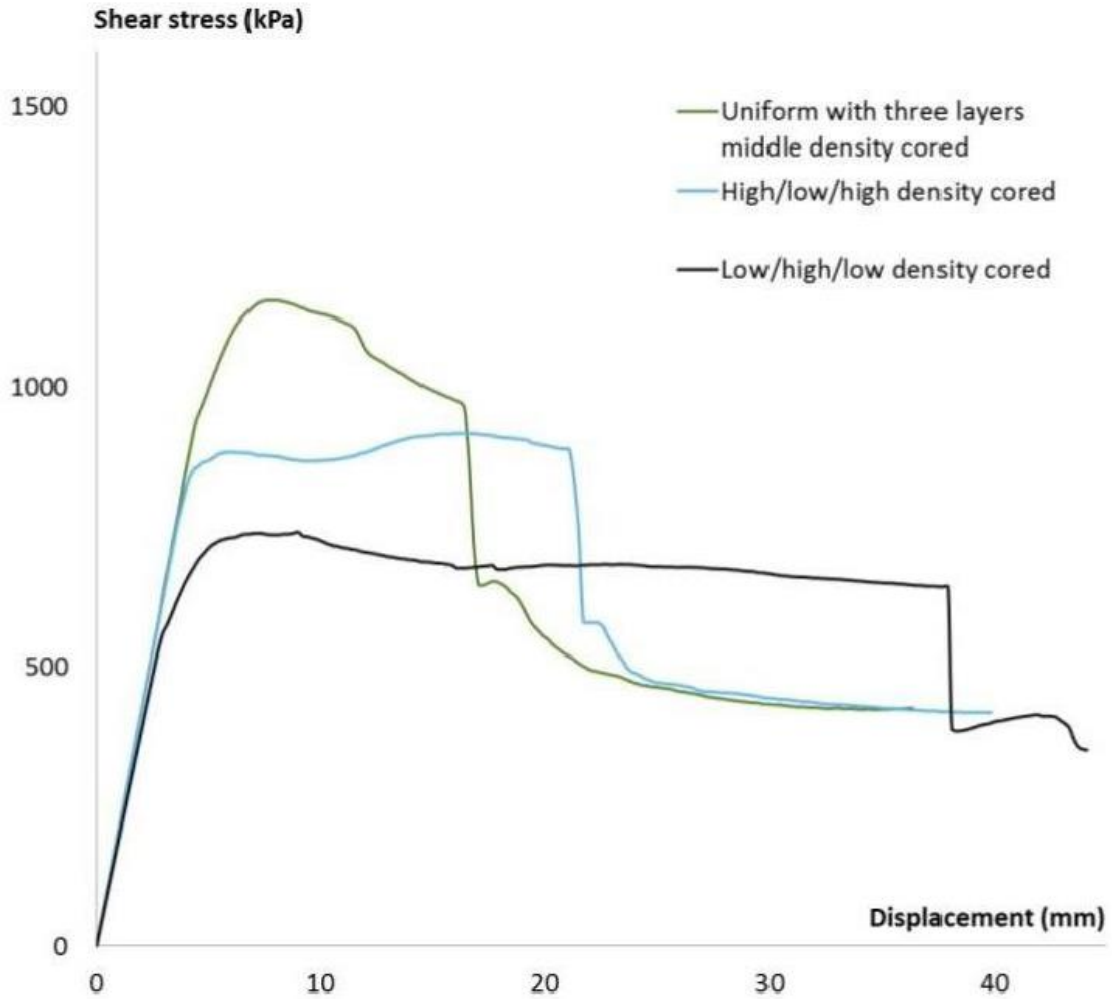
$$t_c = \frac{P}{(d+c)b} \quad (2.1)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση,  $P$  αναφέρεται το φορτίο που ασκείται από την πειραματική συσκευή στο δοκίμιο,  $d$  είναι το συνολικό πάχος το δοκιμίου (πυρήνας + ενισχυτικές πλάκες),  $c$  είναι το πάχος μόνο του πυρήνα και  $b$  είναι το πλάτος του δοκιμίου.

#### 2.2.4 Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων

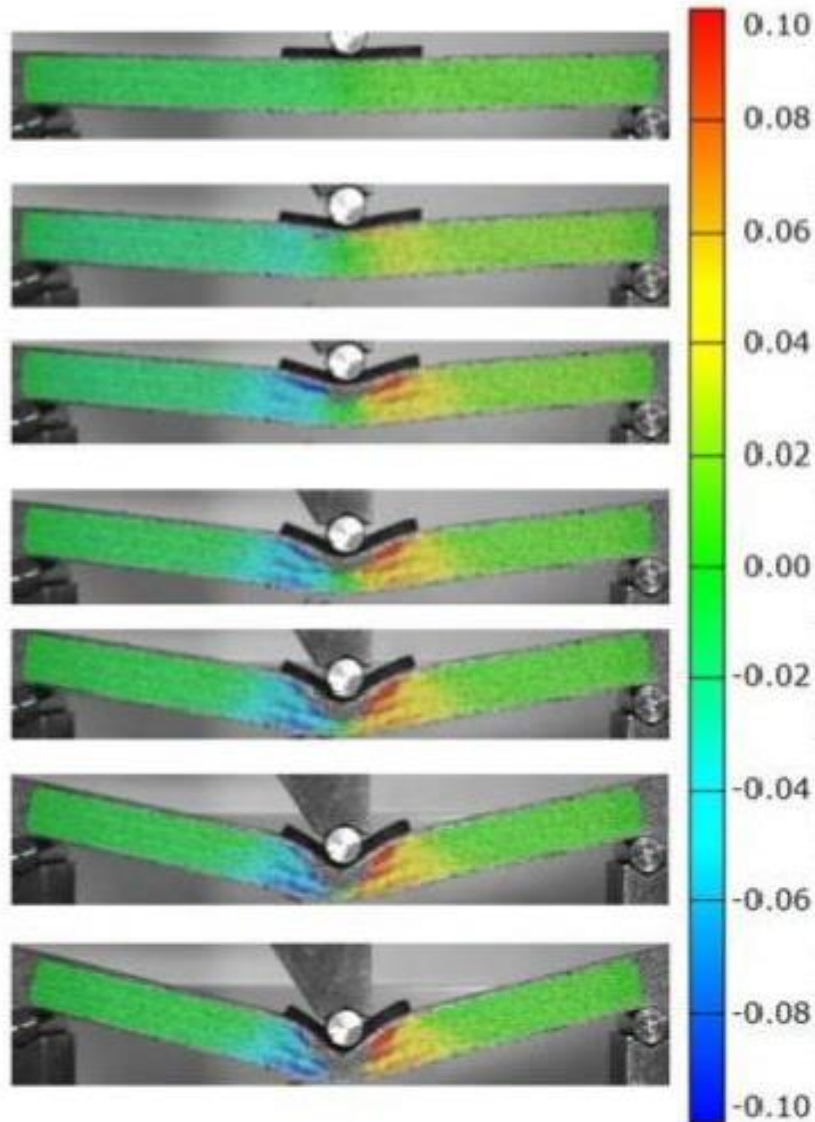
Στο Σχήμα 2.2, διαγράμματα διατμητικής τάσης πυρήνα – μετατόπισης παρουσιάζονται, όπου για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης του πυρήνα χρησιμοποιήθηκε η προαναφερθείσα εξίσωση. Είναι αξιοσημείωτο, ότι βάσει της εξίσωσης αυτής, τα αποτελέσματα μετατρέπονται άμεσα σε διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης. Αυτό, όπως εξηγείται και σε επόμενο κεφάλαιο, πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία για λόγους σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αριθμητικά που θα προκύψουν. Σημειώνεται επίσης, ότι η «μετατόπιση» που αναφέρεται αφορά την κάθετη μετατόπιση του κυλίνδρου φόρτισης του δοκιμίου.





Σχήμα 2.2: Διαγράμματα προσεγγιστικής διατμητικής τάσης πυρήνα συναρτήσει της κάθετης μετατόπισης του κυλίνδρου φόρτισης από τους Kaboglu et al [6]. Ουσιαστικά πρόκειται για έκφραση διαγράμματος δύναμης – μετατόπισης, αν ληφθεί υπόψη η Εξίσωση 2.1.

Στο Σχήμα 2.3, αποτυπώνεται η χαρτογράφηση των διατμητικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα (shear strain) για την ομοιογενή διαμόρφωση [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ].



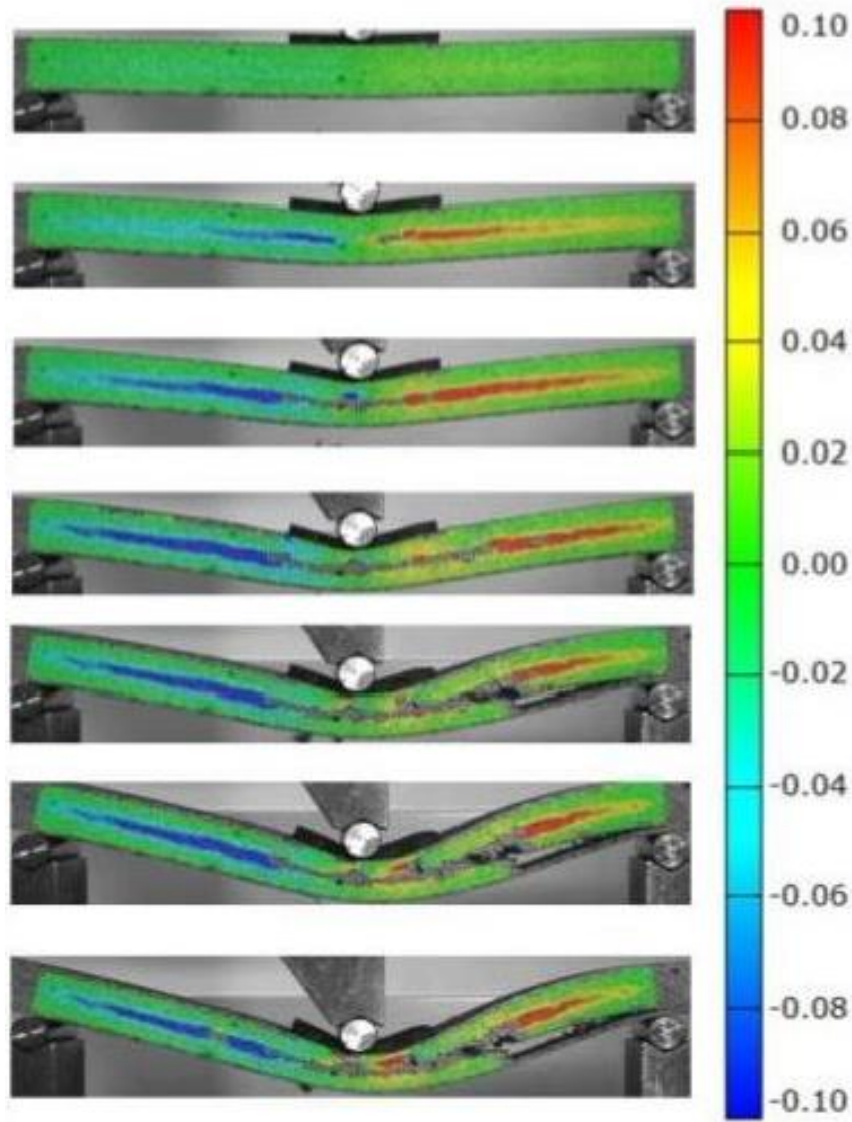
Σχήμα 2.3: Απεικόνιση της εξέλιξης των διατμητικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα για την περίπτωση ομοιογενούς διαμόρφωσης [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] [6].

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα του Σχήματος 2.2 με την οπτικοποίηση των διατμητικών παραμορφώσεων του Σχήματος 2.3, η αλληλουχία φαινομένων μηχανικής συμπεριφοράς που παρατηρούνται στην περίπτωση της ομοιογενούς διαμόρφωσης [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] είναι η ακόλουθη:

- α. Αρχική γραμμική, ελαστική συμπεριφορά (βάσει του νόμου του Hooke).
- β. Έναρξη φαινομένων τοπικής θλίψης (ακριβέστερος ο αγγλικός όρος indentation) στο επάνω στρώμα αφρού C70.75, ακριβώς κάτω από τον κύλινδρο φόρτισης. Ακολουθεί αυξανόμενη κατάρρευση του αφρού λόγω θλίψης (compressive damage). Το διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης (που ουσιαστικά

- εκφράζει δύναμη – μετατόπιση) αρχίζει να εισέρχεται σταδιακά στη μη γραμμική περιοχή του.
- γ. Έναρξη φαινομένων διατμητικής αστοχίας (shear damage) στην περιοχή κάτω από τον κύλινδρο φόρτισης, επεκτεινόμενα από το επάνω στρώμα αφρού C70.75 προς το μεσαίο και το κατώτερο (τα φαινόμενα αυτά εκφράζονται από τις υψηλές τιμές διατμητικών παραμορφώσεων που παρατηρούνται στο Σχήμα 2.3.
  - δ. Συνδυαστική διάδοση της θλιπτικής κατάρρευσης και της διατμητικής αστοχίας των στρωμάτων αφρού με κατεύθυνση από το κέντρο του δοκιμίου προς τους κυλίνδρους στήριξης.
  - ε. Τελική καταστροφική αστοχία του δοκιμίου και συνακόλουθη πτώση φορτίου λόγω αστοχίας στην επάνω ενισχυτική πλάκα (skin panel).

Στο Σχήμα 2.4 αποτυπώνεται η χαρτογράφηση των διατμητικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα (shear strain) για την πρώτη εκ των διαβαθμισμένων (graded) διαμορφώσεων, την [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ].



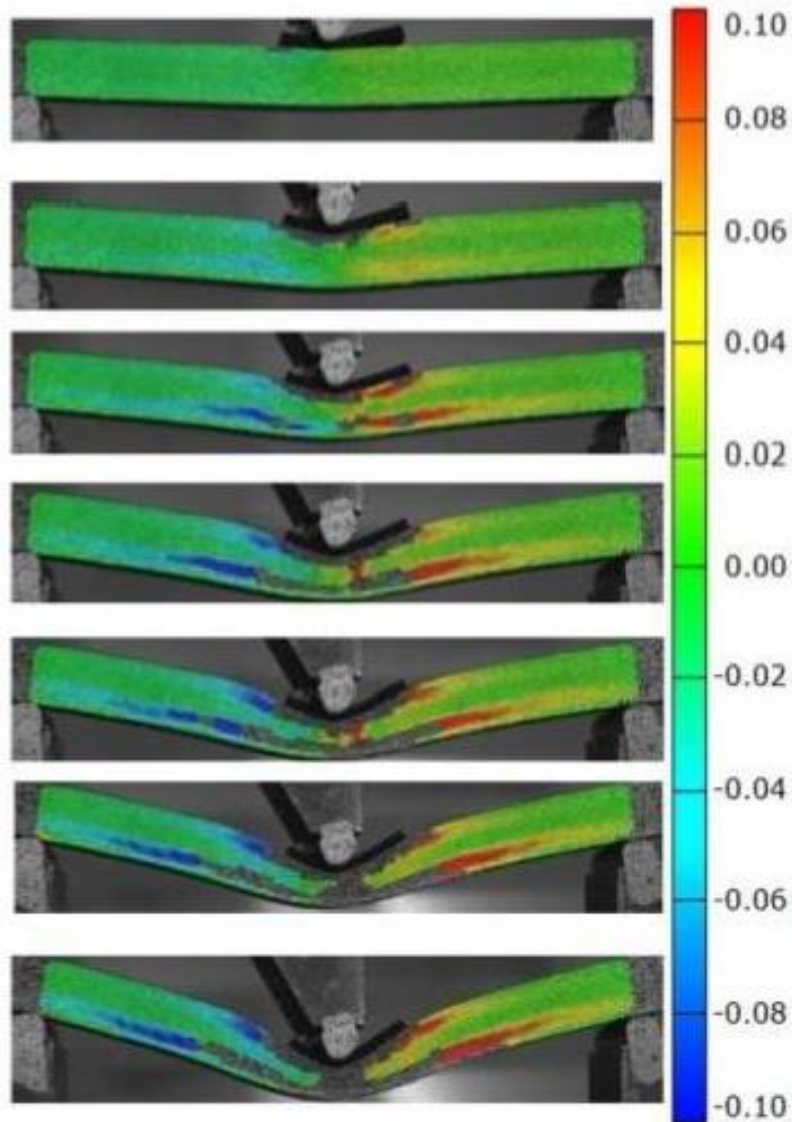
Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της εξέλιξης των διατμητικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα για την περίπτωση διαβαθμισμένης (graded) διαμόρφωσης [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] [6].

Η αντίστοιχη αλληλουχία φαινομένων μηχανικής συμπεριφοράς στην περίπτωση της διαβαθμισμένης διαμόρφωσης πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] είναι η ακόλουθη:

- α. Αρχική γραμμική, ελαστική συμπεριφορά (βάσει του νόμου του Hooke).
- β. Έναρξη φαινομένων τοπικής θλίψης (ακριβέστερος ο αγγλικός όρος indentation) στο ενδιάμεσο στρώμα αφρού C70.55, ακριβώς κάτω από τον κύλινδρο φόρτισης. Ακολουθεί αυξανόμενη κατάρρευση του αφρού λόγω θλίψης (compressive damage). Ωστόσο, λόγω του γεγονότος ότι παρεμβάλλεται ένα στρώμα αφρού υψηλής πυκνότητας ανάμεσα στον κύλινδρο φόρτισης και στο ενδιάμεσο στρώμα αφρού χαμηλής πυκνότητας, καθιστά την αυξανόμενη

- κατάρρευση του πυρήνα υπό θλιπτικά φορτία λιγότερο έντονη και εστιασμένη σε σχέση με την ομοιογενή διαμόρφωση. Για το λόγο αυτό, στο διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης (που εκφράζει, όπως έχει τονιστεί, το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης ουσιαστικά, η μετάβαση στη μη γραμμικότητα γίνεται πολύ πιο αργά σε σχέση με την ομοιογενή διαμόρφωση και τη διαβαθμισμένη διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ]).
- γ. Έναρξη φαινομένων διατμητικής αστοχίας (shear damage) στην περιοχή κάτω από τον κύλινδρο φόρτισης, εστιασμένα στο ενδιάμεσο στρώμα αφρού C70.55 χαμηλής πυκνότητας, χωρίς να επηρεάζονται το επάνω και κάτω στρώμα αφρού C70.90 υψηλής πυκνότητας.
  - δ. Συνδυαστική διάδοση της θλιπτικής κατάρρευσης και της διατμητικής αστοχίας του ενδιάμεσου στρώματος αφρού C70.55 με κατεύθυνση από το κέντρο του δοκιμίου προς τους κυλίνδρους στήριξης, με έντονη επίδραση της διατμητικής αστοχίας.
  - ε. Τελική καταστροφική αστοχία του δοκιμίου και συνακόλουθη πτώση φορτίου εξαιτίας ρωγμής από διάτμηση (shear crack), με σημείο έναρξης στο ενδιάμεσο στρώμα αφρού C70.55, δεξιά του κυλίνδρου φόρτισης και κοντά στη διεπιφάνεια με το επάνω στρώμα αφρού C70.90. Η διάδοση της ρωγμής ήταν ασύμμετρη προς τα δεξιά, όπως φαίνεται και στην εικόνα.

Στο Σχήμα 2.5 αποτυπώνεται η χαρτογράφηση των διατμητικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα (shear strain) για την πρώτη εκ των διαβαθμισμένων (graded) διαμορφώσεων, την [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ].



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση της εξέλιξης των διατμητικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα για την περίπτωση διαβαθμισμένης (graded) διαμόρφωσης [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] [6].

Η αντίστοιχη εξέλιξη της συμπεριφοράς του δοκιμίου στην περίπτωση της διαβαθμισμένης διαμόρφωσης πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] είναι η εξής:

- α. Αρχική γραμμική, ελαστική συμπεριφορά (βάσει του νόμου του Hooke)
- β. Έναρξη φαινομένων τοπικής θλίψης (ακριβέστερος ο αγγλικός όρος indentation) κυρίως στο επάνω στρώμα αφρού C70.55 χαμηλής πυκνότητας και λιγότερο στο κατώτερο στρώμα αφρού C70.55, κάτω από τον κύλινδρο φόρτισης. Ακολουθεί αυξανόμενη κατάρρευση του αφρού λόγω θλίψης (compressive damage), εστιασμένη κυρίως στο επάνω στρώμα αφρού C70.55, και λιγότερο στο κατώτερο, μιας και η ύπαρξη του ενδιάμεσου στρώματος αφρού C70.90

- εξομαλύνει την κατανομή των θλιπτικών φορτίων στο κατώτερο στρώμα αφρού, χωρίς παρ' όλ' αυτά να την εξαλείφει τελείως. Το διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης εισέρχεται στη μη γραμμική περιοχή του σταδιακά, με ομαλότερο τρόπο από την διαβαθμισμένη διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ], παρόμοι με αυτόν της ομοιογενούς διαμόρφωσης [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ].
- γ. Έναρξη φαινομένων διατμητικής αστοχίας (shear damage) στην περιοχή κάτω από τον κύλινδρο φόρτισης, εστιασμένα στο επάνω και κάτω στρώμα αφρού C70.55, χωρίς να υπάρχει σημαντικός επηρεασμός του ενδιάμεσου στρώματος C70.90.
- δ. Συνδυαστική διάδοση της θλιπτικής κατάρρευσης και της διατμητικής αστοχίας των επάνω και κάτω στρωμάτων αφρού C70.55, με κατεύθυνση από το κέντρο του δοκιμίου προς τους κυλίνδρους στήριξης.
- ε. Τελική καταστροφική αστοχία του δοκιμίου και συνακόλουθη πτώση φορτίου εξαιτίας αστοχίας της επάνω ενισχυτικής πλάκας (skin panel).

**Συνοπτικά, αποδεικνύεται πειραματικά ότι η διαβάθμιση ή μη του πυρήνα μιας sandwich κατασκευής επηρεάζει σημαντικά τα ακόλουθα:**

- Την περιοχή εμφάνισης των θλιπτικών – διατμητικών αστοχιών, που αναγνωρίστηκαν ως τα κύρια φαινόμενα διαμόρφωσης της μηχανικής συμπεριφοράς των sandwich κατασκευών που εξετάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι το πιο «αδύναμο» στρώμα αφρού του πυρήνα είναι αυτό που καθορίζει την εμφάνιση των ανωτέρω αστοχιών.
- Την εξέλιξη του διαγράμματος δύναμης – μετατόπισης, ανάλογα με την αλληλεπίδραση των φαινομένων θλίψης και διάτμησης που κυριαρχούν, και συγκεκριμένα τα εξής:
  - Το εύρος της περιοχής γραμμικής – ελαστικής συμπεριφοράς.
  - Τη μορφή και την έκταση της μη γραμμικής συμπεριφοράς (πόσο ομαλά ή όχι γίνεται η μετάβαση από την γραμμική στη μη γραμμική περιοχή, το εάν εμφανίζονται περιοχές σχεδόν σταθερής φόρτισης (plateaus) κλπ.).
  - Το μέγιστο φορτίο της κατασκευής.
- Το είδος της τελικής καταστροφικής αστοχίας και την τιμή μετατόπισης στην οποία αυτή συμβαίνει.





## Κεφάλαιο 3: Ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη των αριθμητικών μοντέλων στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων LS-DYNA®. Ο στόχος των αριθμητικών μοντέλων που αναπτύσσονται εδώ είναι η αποτελεσματική προσομοίωση των πειραμάτων κάμψης τριών σημείων που παρουσιάστηκαν και συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Για την επίτευξη αυτού, μια σειρά παραμέτρων που αφορούν την ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία με το λογισμικό του LS-DYNA® απαιτείται να διευκρινιστούν. Οι παράμετροι αυτές αφορούν τα εξής:

- Την κατανόηση της φύσης του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί
- Την ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου
- Την επιβολή φορτίσεων και την επίλυση του τελικού προβλήματος

### 3.1 Κατανόηση της φύσης του προβλήματος

Τα βασικά χαρακτηριστικά της πειραματικής διαδικασίας που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 είναι τα εξής (συνοπτικά):

- Δοκίμια τύπου *sandwich* αποτελούμενα από ενισχυτικές πλάκες (*skin panels*) GFRP και πυρήνες από αφρούς PVC
- Στατική φόρτιση δοκιμίων για την εκτέλεση πειραμάτων κάμψης 3 σημείων μέσω ενός συστήματος τριών κυλίνδρων – δύο σταθεροί για την στήριξη του δοκιμίου και ένας κινούμενος κατακόρυφα για τη φόρτιση του
- Παραμόρφωση έως την εμφάνιση καταστροφικής αστοχίας στα δοκίμια, είτε στις ενισχυτικές πλάκες GFRP είτε στους πυρήνες από αφρό PVC

Τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως οδηγούν σε μια σειρά από στοιχεία που αφορούν τα αριθμητικά μοντέλα, ως εξής:

- α. Επιλογή του κατάλληλου τύπου πεπερασμένου στοιχείου δεδομένης της φόρτισης
- β. Κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου
- γ. Επιλογή του κατάλληλου μοντέλου υλικού για την προσομοίωση των ενισχυτικών πλακών τύπου GFRP – απαιτείται και προσομοίωση φαινομένων καταστροφικής αστοχίας

- δ. Επιλογή του κατάλληλου μοντέλου υλικού για την προσομοίωση των πυρήνων από αφρό PVC – απαιτείται και προσομοίωση φαινομένων καταστροφικής αστοχίας
- ε. Διακριτοποίηση (meshing) των επιμέρους συστατικών των δοκιμών sandwich
- στ. Συνένωση των επιμέρους συστατικών των δοκιμών sandwich σε ένα συσσωμάτωμα (π.χ. μέσω ορισμού επαφής, μέσω κοινών κόμβων σε διεπιφάνειες κλπ.)
- ζ. Επιλογή του τρόπου φόρτισης μέσω του συστήματος κυλίνδρων, δεδομένης της στατικής φύσης του προβλήματος (ταχύτητα φόρτισης, ορισμοί επαφών μεταξύ κυλίνδρων και δοκιμίου κλπ.)

## 3.2 Κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου

### 3.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείου

Το λογισμικό του LS-DYNA© διαθέτει μια πληθώρα διαθέσιμων τύπων πεπερασμένων στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την μοντελοποίηση. Γενικά, το είδος των στοιχείων καθορίζει μεταξύ άλλων:

- Το βαθμό ελευθερίας
- Το χώρο στον οποίο κείται το στοιχείο (2D ή 3D)

Για τα αριθμητικά μοντέλα που αναπτύσσονται εδώ επιλέγεται η χρήση στερεού στοιχείου εξαεδρικής μορφής (hexahedron solid element) «μειωμένης ολοκλήρωσης» (αναφέρεται στο περιβάλλον του LS-DYNA© ως «reduced integration»). Λέγοντας μειωμένη ολοκλήρωση εννοείται ότι ο αριθμός των σημείων που λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της παραμόρφωσης των στοιχείων είναι μικρότερος από τον αριθμό που απαιτείται για την ακριβή ολοκλήρωση. Αυτού του είδους το στοιχείο εμφανίζει γραμμική συνάρτηση μετατόπισης και σε συνδυασμό με την ενός σημείου ολοκλήρωση θεωρείται κατάλληλο για μη γραμμικές εφαρμογές με μεγάλες παραμορφώσεις και αστοχίες υλικών [9][10][11], όπως είναι αυτές που πραγματεύεται η παρούσα μελέτη.

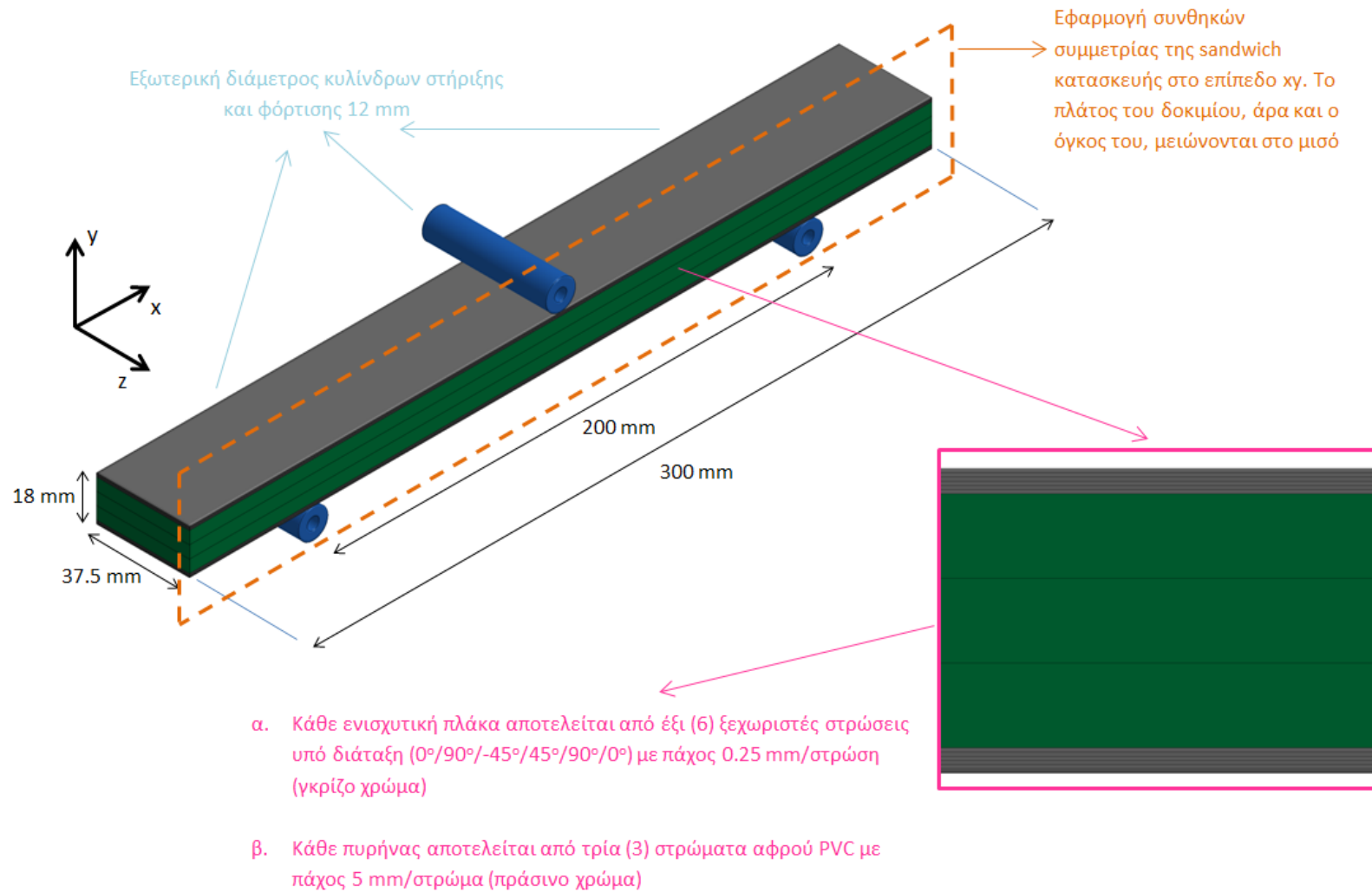
### 3.2.2 Κατασκευή γεωμετρίας

Στο σημείο αυτό της κατασκευής του αριθμητικού μοντέλου, απαιτείται η σχεδίαση της γεωμετρίας των κατασκευών sandwich που μελετώνται. Εξαιτίας του γεγονότος ότι το λογισμικό LS-DYNA© δεν διαθέτει γραφικό περιβάλλον που να περιλαμβάνει κάποιον

προ-επεξεργαστή, οι αντίστοιχες δυνατότητες του περιβάλλοντος του λογισμικού ANSYS© χρησιμοποιήθηκαν, δεδομένης της δυνατότητας εύκολης συνεργασίας μεταξύ των λογισμικών ANSYS© και LS-DYNA©. Είναι σημαντικό κατά τη σχεδίαση της γεωμετρίας να ανιχνευθούν πιθανές συνθήκες (π.χ. συμμετρίες) που επιτρέπουν την απλοποίηση – ελάττωση του όγκου του μοντέλου, δημιουργώντας ένα ισοδύναμο μικρότερο, με στόχο τη μείωση όσο το δυνατόν του υπολογιστικού κόστους. Στην παρούσα εργασία οι γεωμετρίες που απαιτείται να σχεδιαστούν περιλαμβάνουν τις κατασκευές sandwich και τους κύλινδρους στήριξης – φόρτισης. Τα επιμέρους στοιχεία που πρέπει να σχεδιαστούν είναι τα εξής:

- Οι ενισχυτικές πλάκες
- Τα στρώματα αφρού των πυρήνων
- Οι κύλινδροι στήριξης
- Ο κύλινδρος φόρτισης

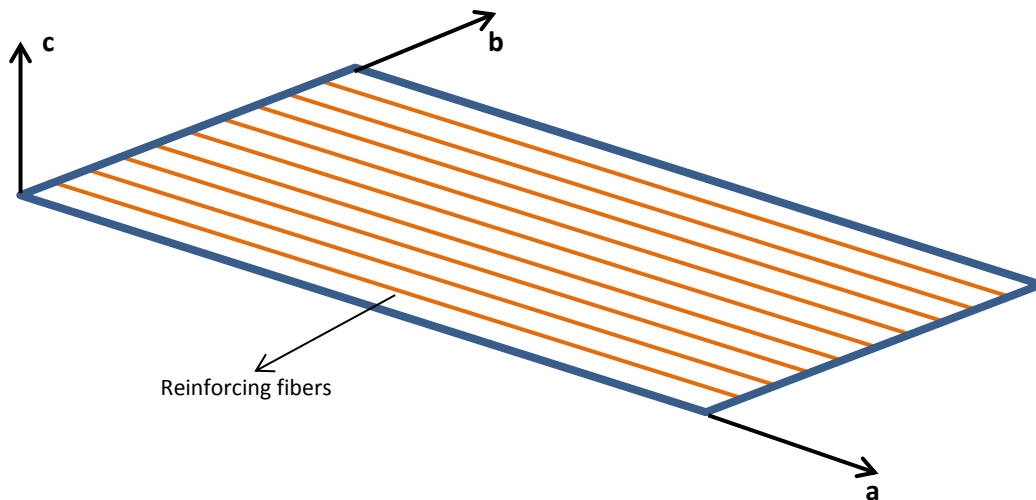
Υπενθυμίζεται ότι στο Κεφάλαιο 2, οι Πίνακες 2.1 και 2.2 περιλαμβάνουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανωτέρω στοιχείων. Στο Σχήμα 3.1, μια τυπική σχεδίαση γεωμετρίας απεικονίζεται (αφορά την ομοιογενή διάταξη πυρήνα [C70.75/C70.75/C70.75] – [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ]. Στα στρώματα αφρού έχει αποδοθεί το χρώμα πράσινο, κατ' αντιστοιχία με εμπορικό χρώμα του αφρού C70.75. Αντίστοιχες είναι οι γεωμετρίες και για τις περιπτώσεις διαβαθμισμένων (graded) διαμορφώσεων που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.



Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας των αριθμητικών μοντέλων των κατασκευών sandwich που μελετώνται.

### 3.2.3 Μοντέλο υλικού ενισχυτικών πλακών – MAT\_22 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE)

Το μοντέλο υλικού MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE (MAT\_22) του λογισμικού LS-DYNA είναι ένα ορθοτροπικό μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει επιλογές για ψαθυρή θραύση συνθέτων υλικών και προορίζεται κυρίως για τη μοντελοποίηση στρώσεων συνθέτου υλικού με ενίσχυση σε μία διεύθυνση (unidirectional laminates). Το μοντέλο αυτό είναι βασισμένο στις εργασίες των Chang et al [12][13] και είναι το πρώτο μοντέλο συνθέτου υλικού που ενσωματώθηκε στο λογισμικό του LS-DYNA. Για καλύτερη κατανόηση του μοντέλου, μία στρώση συνθέτου υλικού με ενίσχυση σε μία διεύθυνση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2 (συμπεριλαμβάνονται οι άξονες ανισοτροπίας).



Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση μιας στρώσης συνθέτου υλικού με ενισχυτικές ίνες σε μία διεύθυνση.

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο LS-DYNA Theory Manual [14], τρία (3) κριτήρια αστοχίας συμπεριλαμβάνονται στο υλικό MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE, τα οποία είναι ένα κριτήριο ρωγμάτων της μήτρας (matrix cracking), ένα κριτήριο θλιπτικής αστοχίας της μήτρας (matrix compression) και ένα κριτήριο θραύσης των ινών (fiber breakage). Για τον ορισμό αυτών των κριτηρίων, πέντε (5) σταθερές του υλικού απαιτούνται:

- $X_t$ , διαμήκης αντοχή σε εφελκυσμό (κατά τον άξονα a του ανωτέρω σχήματος)
- $Y_t$ , εγκάρσια αντοχή σε εφελκυσμό (κατά τον άξονα b του ανωτέρω σχήματος)
- $S_c$ , αντοχή σε διάτμηση στο επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες ab του ανωτέρω σχήματος
- $Y_c$ , εγκάρσια αντοχή σε θλίψη (κατά τον άξονα b του ανωτέρω σχήματος)
- $\alpha$ , μη γραμμικός όρος διατμητικής τάσης

Οι τιμές των  $X_t$ ,  $Y_t$ ,  $S_c$ ,  $Y_c$  και  $\alpha$  υπολογίζονται από πειραματικές μετρήσεις αντοχής του συνθέτου ενώ η παράμετρος  $\alpha$  από μετρήσεις διατμητικής τάσεις παραμόρφωσης. Ο υπολογισμός του  $\alpha$  πραγματοποιείται μέσω της Εξίσωσης 3.3.

Στην ελαστική περιοχή, το μοντέλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE βασίζεται στην υπόθεση της επίπεδης έντασης για τα υλικά στα οποία χρησιμοποιείται, επομένως οι ακόλουθες εξισώσεις είναι σε ισχύ:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E_a}(\sigma_a + \nu_{ab}\sigma_b) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_b = \frac{1}{E_b}(\sigma_b + \nu_{ba}\sigma_a) \quad (3.2)$$

$$2\varepsilon_{ab} = \frac{1}{G_{ab}}\tau_{ab} + \alpha\tau_{ab} \quad (3.3)$$

Σε όλα τα κριτήρια αστοχίας εμπεριέχεται ο όρος  $\bar{\tau}$ , ο οποίος εκφράζει το λόγο της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στο σύνθετο υλικό προς την αντοχή του σε διάτμηση. Η έκφραση του δίνεται στην Εξίσωση 3.4.

$$\bar{\tau} = \frac{\frac{\tau_{ab}^2}{2G_{ab}} + \frac{3}{4}a\tau_{ab}^4}{\frac{S_{ab}^2}{2G_{ab}} + \frac{3}{4}aS_{ab}^4} \quad (3.4)$$

Τα τρία (3) κριτήρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως αναλύονται ως εξής:

#### **α. Κριτήριο αστοχίας λόγω ρωγμάτωσης της μήτρας (matrix cracking)**

Το κριτήριο αυτό καθορίζεται από τις Εξισώσεις 3.5 και 3.6.

$$F_{matrix} = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \bar{\tau} < 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο παραμένει ελαστικό} \quad (3.5)$$

$$F_{matrix} = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \bar{\tau} \geq 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο αστοχεί} \quad (3.6)$$

Όταν η Εξίσωση 3.6 ικανοποιείται για ένα στοιχείο, τότε οι σταθερές του υλικού  $E_b$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα b),  $G_{ab}$  (μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab),  $\nu_{ab}$  και  $\nu_{ba}$  (λόγοι Poisson στο επίπεδο ab) μηδενίζονται.

#### **β. Κριτήριο αστοχίας λόγω θλίψης της μήτρας (matrix compression)**

Το κριτήριο αυτό καθορίζεται από τις Εξισώσεις 3.7 και 3.8.

$$F_{compr} = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \bar{\tau} < 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο παραμένει ελαστικό} \quad (3.7)$$

$$F_{compr} = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \bar{\tau} \geq 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο αστοχεί} \quad (3.8)$$

Όταν η Εξίσωση 3.8 ικανοποιείται για ένα στοιχείο, τότε οι σταθερές του υλικού  $E_b$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα b),  $G_{ab}$  (μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab),  $\nu_{ab}$  και  $\nu_{ba}$  (λόγοι Poisson στο επίπεδο ab) μηδενίζονται.

### γ. Κριτήριο αστοχίας λόγω θραύσης των ινών (fiber breakage)

Το κριτήριο αυτό καθορίζεται από τις Εξισώσεις 3.9 και 3.10.

$$F_{fiber} = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2 + \bar{\tau} < 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο παραμένει ελαστικό} \quad (3.9)$$

$$F_{fiber} = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2 + \bar{\tau} \geq 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο αστοχεί} \quad (3.10)$$

Όταν η Εξίσωση 3.10 ικανοποιείται για ένα στοιχείο, τότε οι σταθερές του υλικού  $E_a$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα a),  $E_b$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα b),  $G_{ab}$  (μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab),  $\nu_{ab}$  και  $\nu_{ba}$  (λόγοι Poisson στο επίπεδο ab) μηδενίζονται.

Τέλος, μερικές λεπτομέρειες όσον αφορά το χειρισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων σε ένα στοιχείο απαιτείται να διευκρινιστούν. Όταν οποιοδήποτε από τα ανωτέρω κριτήρια ικανοποιείται, τότε εκτός από το μηδενισμό των σταθερών του υλικού που περιγράφεται σε κάθε κριτήριο, μηδενίζονται και οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο στοιχείο, εξ ου και η αναφορά σε «ψαθυρή θραύση» στην αρχή της ενότητας. Το στοιχείο εξακολουθεί να παραμορφώνεται, και αναλόγως με το αν απαιτείται από την προσομοίωση που πραγματοποιείται, μπορούν να υιοθετηθούν τεχνικές στο περιβάλλον του LS-DYNA© για τη διαγραφή του στοιχείου (π.χ. στη μοντελοποίηση ενός φαινομένου διάτρησης).

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του LS-DYNA©, LS-DYNA Manual Vol II [15], οι παράμετροι που απαιτούνται για τον ορισμό του MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE μοντέλου υλικού είναι οι εξής:

- Η πυκνότητα του υλικού (RO)
- Τα μέτρα ελαστικότητας σε όλους του άξονες ανισοτροπίας και τα μέτρα διάτμησης σε όλα τα επίπεδα (EA, EB, EC, GAB, GBC, GCA)

- Οι λόγοι Poisson σε όλα τα επίπεδα (PRBA, PRCA, PRCB)
- Η διατμητική αντοχή στο επίπεδο ab (SC)
- Η διαμήκης αντοχή σε εφελκυσμό (XT)
- Η εγκάρσια αντοχή σε εφελκυσμό (YT)
- Η εγκάρσια αντοχή σε θλίψη (YC) (οριζόμενη ως θετική τιμή)
- Ο μη γραμμικός όρος διατμητικής τάσης ( $\alpha$ ), με ένα προτεινόμενο εύρος από 0 έως 0.5

Εκτός από τα ανωτέρω, απαιτείται και ο καθορισμός του συστήματος συντεταγμένων ώστε να αναδειχθούν οι άξονες ανισοτροπίας. Αυτό πραγματοποιείται μέσω του καθορισμού των διανυσμάτων που αντιστοιχούν στους άξονες a, b και c του Σχήματος 3.2.

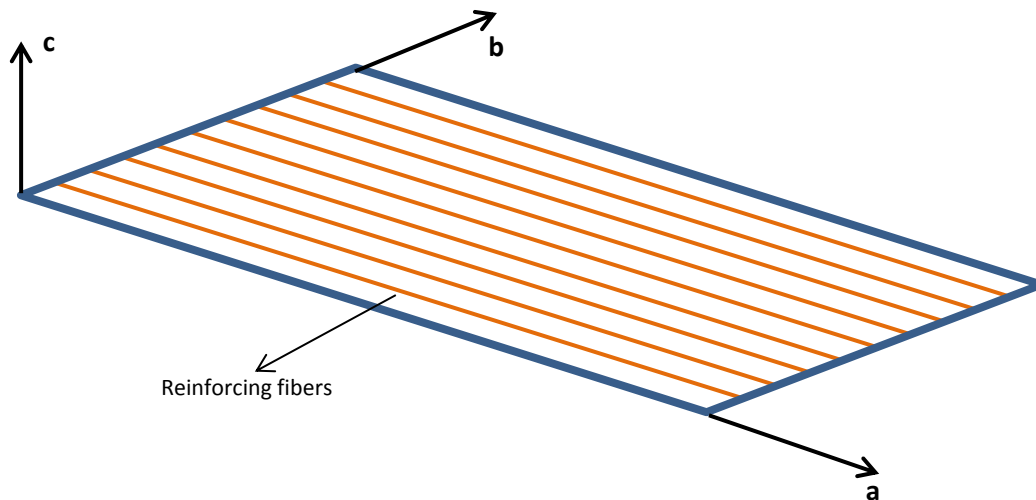
Η απλότητα του ορισμού του μοντέλου υλικού MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE το έχει κάνει να χρησιμοποιηθεί σε πλειάδα δημοσιευμένων εργασιών, πραγματευόμενες διάφορα προβλήματα, από περιπτώσεις στατικής φόρτισης έως κρούσεις υψηλής ταχύτητας. Στο πεδίο των στατικών αναλύσεων, όπως είναι και τα προβλήματα της παρούσας εργασίας, χαρακτηριστική είναι η μελέτη των Styles et al [9], όπου το μοντέλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά των ενισχυτικών πλακών (skin panels) sandwich κατασκευών υποβαλλόμενων σε κάμψη 4 σημείων (4-point bending). Ο στόχος τους ήταν να μελετηθούν οι διαφορές στην καμπτική συμπεριφορά των δοκιμών όταν το πάχος του πυρήνα τους (κατασκευασμένος από αφρό αλουμινίου) άλλαζε. Δύο διαφορετικά πάχη μελετήθηκαν, με τιμές τέτοιες ώστε τη μία φορά ο ρυθμιστής της καμπτικής συμπεριφοράς της sandwich κατασκευής να είναι ο πυρήνας και την άλλη οι ενισχυτικές πλάκες (skin panels). Το μοντέλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE που χρησιμοποιήθηκε για τις ενισχυτικές πλάκες αποδείχτηκε ικανοποιητικό για την προσομοίωση των φαινομένων αστοχίας που παρατηρήθηκαν και στις δύο περιπτώσεις. Διαφορές που επισημάνθηκαν από τους συγγραφείς στις καμπύλες δύναμης – μετατόπισης αποδόθηκαν στις εκτιμήσεις – υποθέσεις που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και όχι στη λειτουργικότητα του ίδιου του μοντέλου υλικού. Σε μια άλλη περίπτωση στατικής φόρτισης, οι Mamalis et al [16] μελέτησαν περίπτωση στατικής θλίψης (compressive crushing) sandwich κατασκευών. Οι κατασκευές που μελετήθηκαν δεν ήταν ο κλασικός συνδυασμός ενισχυτικών πλακών (skin panels) και πυρήνα. Αντί αυτού, ο «πυρήνας» αυτών των κατασκευών ήταν ένας συνδυασμός εγκάρσιων (εκτεινόμενων δηλαδή από ενισχυτική πλάκα σε ενισχυτική πλάκα) και διαμήκων (παράλληλα με τις ενισχυτικές πλάκες) λεπτόπαχων σωλήνων από σύνθετο υλικό. Ο στόχος αυτής της τεχνικής ήταν να προσδώσει στον πυρήνα της κατασκευής ανισοτροπικά



χαρακτηριστικά. Το μοντέλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση των ενισχυτικών πλακών (skin panels) καθώς και των διαμήκων σωλήνων του πυρήνα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποδείχτηκαν ικανοποιητικά, όχι μόνο όσον αφορά την παρατηρούμενη παραμόρφωση των επιμέρους στοιχείων της sandwich κατασκευής αλλά επίσης και στα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, καθώς και σε χαρακτηριστικά που αφορούν την κατάρρευση της κατασκευής (μέγιστο φορτίο, απορροφούμενη ενέργεια κλπ.). Σε μια άλλη περίπτωση στατικής θλίψης κυλίνδρων από σκυρόδεμα περιτυλιγμένων με ενίσχυση από σύνθετο υλικό CFRP (ανθρακόνημα – εποξική ρητίνη), οι Elsanadedy et al [17] χρησιμοποίησαν το μοντέλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE για να μοντελοποιήσουν τα σύνθετα υλικά περιτύλιξης των τσιμεντένιων κυλίνδρων. Σύγκριση των διαγραμμάτων θλιπτικής τάσης – θλιπτικής ανηγμένης παραμόρφωσης έδειξε πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης. Σε μια παρόμοια περίπτωση θλιπτικής φόρτισης, οι Mamalis et al [10] μελέτησαν την θλιπτική συμπεριφορά κάθετα προς τις ενισχυτικές πλάκες sandwich κατασκευών από ενισχυτικές πλάκες GFRP (υαλόνημα – εποξική ρητίνη) και πυρήνες από αφρό PVC ή PMI, με στόχο να εξετάσουν τον διαφορετικό τρόπο παραμόρφωσης και αστοχίας καθενός εκ των αφρών, και έπειτα να επεκτείνουν τα εξαγόμενα αποτελέσματα μεταβάλλοντας βασικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Το μοντέλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των ενισχυτικών πλακών GFRP, και συγκρίνοντας αφενός τον τρόπο παραμόρφωσης – κατάρρευσης και αφετέρου τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, οι επιδόσεις του κρίθηκαν ικανοποιητικές. Εκτός από στατικές προσομοιώσεις, το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί και σε ποικιλία περιπτώσεων κρούσης. Οι Sevkat et al [18] το χρησιμοποίησαν για τη μοντελοποίηση πλακών συνθέτου υλικού κατασκευασμένων από ένα υβριδικό ενισχυτικό ύφασμα ινών γυαλιού και άνθρακα και εποξικής ρητίνης, υπό καταπόνηση κρούσης χαμηλής ταχύτητας. Το ένα σκέλος της μελέτης αφορούσε στην επίδραση του σχήματος των μηχανισμών καταπόνησης (impactor shape) και το άλλο στην διάδοση των αστοχιών κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων κρούσεων. Η συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων σε όρους δύναμης, εξέλιξης των παραμορφώσεων και μοτίβα αστοχιών κρίθηκε πολύ καλή. Οι Ghalami-Chooobar et al [19] μελέτησαν την κρούση υψηλής ταχύτητας sandwich κατασκευών με υβριδικές ενισχυτικές πλάκες (στρώσεις συνθέτου υλικού και μετάλλου συνδυαστικά) και πυρήνα από αφρό πολυουρεθάνης. Για τις στρώσεις συνθέτου υλικού στις υβριδικές ενισχυτικές πλάκες, οι οποίες ήταν συνδυασμός ινών γυαλιού και εποξικής ρητίνης, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE. Σύγκριση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης όσον αφορά βαλλιστικά όρια και μοτίβα αστοχιών έδειξε ικανοποιητική σύγκλιση.

### 3.2.4 Μοντέλο υλικού ενισχυτικών πλακών – MAT\_54/55 (MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE)

Το μοντέλο υλικού MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE (MAT\_54 & MAT\_55) είναι διαφοροποιημένες εκδοχές του μοντέλου υλικού MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE (MAT\_22) που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Τα δύο μοντέλα, 54 και 55, είναι πολύ κοντά στη διαμόρφωσή τους, και το μόνο σημείο διαφοράς τους αφορά τα κριτήρια αστοχίας της μήτρας, όπως εξηγείται παρακάτω. Ειδική μνεία γίνεται παρακάτω και στον τρόπο χειρισμού της αστοχίας και της μετά την αστοχία φάσης, καθώς υπάρχουν μερικές ουσιώδεις διαφορές με το μοντέλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE. Υπενθυμίζεται ότι για το μοντέλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE τη στιγμή της αστοχίας ενός στοιχείου υπάρχει ακαριαίος μηδενισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των στοιχείου και των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτό. Δεν συμβαίνει ακριβώς αυτό στην περίπτωση των μοντέλων MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE, βασικά όσον αφορά τον χειρισμό των τάσεων τη στιγμή της αστοχίας κι έπειτα (περισσότερες εξηγήσεις δίνονται παρακάτω). Το Σχήμα 3.2 αναπαράγεται και εδώ, για την ευχερέστερη κατανόηση των συγκεκριμένων μοντέλων υλικού.



Σχήμα 3.3: Επανάληψη του Σχήματος 3.2.

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο LS-DYNA Theory Manual [14], τέσσερα (4) κριτήρια αστοχίας περιλαμβάνονται στα μοντέλα 54 και 55, για τα οποία μια σειρά παραμέτρων απαιτείται:

- $X_t$ , διαμήκης αντοχή σε εφελκυσμό (κατά τον άξονα a του ανωτέρω σχήματος)
- $X_c$ , διαμήκης αντοχή σε θλίψη (κατά τον άξονα a του ανωτέρω σχήματος)
- $Y_t$ , εγκάρσια αντοχή σε εφελκυσμό (κατά τον άξονα b του ανωτέρω σχήματος)

- $S_c$ , αντοχή σε διάτμηση στο επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες ab του ανωτέρω σχήματος
- $Y_t$ , εγκάρσια αντοχή σε θλίψη (κατά τον άξονα b του ανωτέρω σχήματος)
- $\alpha$ , μη γραμμικός όρος διατμητικής τάσης

Στην ελαστική περιοχή, τα μοντέλα MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE βασίζονται στην υπόθεση επίπεδης έντασης, επομένως οι ακόλουθες εξισώσεις ισχύουν:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E_a} (\sigma_a + \nu_{ab} \sigma_b) \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_b = \frac{1}{E_b} (\sigma_b + \nu_{ba} \sigma_a) \quad (3.12)$$

$$2\varepsilon_{ab} = \frac{1}{G_{ab}} \tau_{ab} + \alpha \tau_{ab} \quad (3.13)$$

Τα τέσσερα (4) κριτήρια αστοχίας αναλύονται ως ακολούθως:

**α. Κριτήριο αστοχίας ενισχυτικών ινών σε εφελκυσμό (ισχύει όταν  $\sigma_{aa} > 0$ )**

Το κριτήριο αυτό βασίζεται στις Εξισώσεις 3.14 και 3.15.

$$\left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right) < 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο παραμένει ελαστικό} \quad (3.14)$$

$$\left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right) \geq 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο αστοχεί} \quad (3.15)$$

Όταν η Εξίσωση 3.15 ικανοποιείται, οι σταθερές του υλικού  $E_a$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα a),  $E_b$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα b),  $G_{ab}$  (μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab),  $\nu_{ba}$ ,  $\nu_{ab}$  (λόγοι Poisson στο επίπεδο ab) μηδενίζονται. Η παράμετρος  $\beta$  στις ανωτέρω εξισώσεις επιτρέπει στον χρήστη να καθορίσει την επιρροή της διάτμησης στο κριτήριο αστοχίας των ινών σε εφελκυσμό. Για  $\beta = 1$ , το κριτήριο του Hashin [20] ενεργοποιείται, ενώ για  $\beta = 0$  το κριτήριο μέγιστης τάσης (maximum stress). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $\beta = 0$ , χωρίς να εξεταστεί η περίπτωση του  $\beta = 1$ .

**β. Κριτήριο αστοχίας ενισχυτικών ινών σε θλίψη (ισχύει όταν  $\sigma_{bb} \geq 0$ )**

Οι εξισώσεις στις οποίες βασίζεται το συγκεκριμένο κριτήριο είναι οι 3.16 και 3.17.

$$\left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 < 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο παραμένει ελαστικό} \quad (3.16)$$

$$\left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 \geq 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο αστοχεί} \quad (3.17)$$

Όταν η Εξίσωση 3.17 ικανοποιείται, οι σταθερές  $E_\alpha$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα a),  $G_{ab}$  (μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab),  $\nu_{ba}$ ,  $\nu_{ab}$  (λόγοι Poisson στο επίπεδο ab) μηδενίζονται.

Τα δύο κριτήρια που παρουσιάστηκαν ανωτέρω είναι πανομοιότυπα για τα μοντέλα υλικού 54 και 55. Οι διαφορές τους αφορούν τα δύο κριτήρια που ακολουθούν.

### γ. Κριτήριο αστοχίας μήτρας σε εφελκυσμό (ισχύει όταν $\sigma_{bb} \geq 0$ )

Οι Εξισώσεις στις οποίες βασίζεται το κριτήριο αυτό είναι οι 3.18 και 3.19 για την περίπτωση του μοντέλου 54 και οι 3.20 και 3.21 για την περίπτωση του μοντέλου 55.

Για το μοντέλο 54:

$$\left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 < 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο παραμένει ελαστικό} \quad (3.18)$$

$$\left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 \geq 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο αστοχεί} \quad (3.19)$$

Όταν η Εξίσωση 3.19 ικανοποιείται, τότε οι σταθερές του υλικού  $E_b$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα b),  $G_{ab}$  (μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab),  $\nu_{ba}$ ,  $\nu_{ab}$  (λόγοι Poisson στο επίπεδο ab) μηδενίζονται.

Για το μοντέλο 55:

$$\frac{\sigma_{bb}^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t)\sigma_{bb}}{Y_c Y_t} < 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο παραμένει ελαστικό} \quad (3.20)$$

$$\frac{\sigma_{bb}^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t)\sigma_{bb}}{Y_c Y_t} \geq 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο αστοχεί} \quad (3.21)$$

Όταν η Εξίσωση 3.21 ικανοποιείται για ένα στοιχείο, οι σταθερές του υλικού  $E_b$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα b),  $G_{ab}$  (μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab),  $\nu_{ba}$ ,  $\nu_{ab}$  (λόγοι Poisson στο επίπεδο ab) μηδενίζονται.

### δ. Κριτήριο αστοχίας μήτρας σε θλίψη (ισχύει όταν $\sigma_{bb} \leq 0$ )

Οι Εξισώσεις στις οποίες βασίζεται το κριτήριο αυτό είναι οι 3.22 και 3.23 για την περίπτωση του μοντέλου 54 και οι 3.24 και 3.25 για την περίπτωση του μοντέλου 55.

Για το μοντέλο 54:

$$\left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 < 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο παραμένει ελαστικό} \quad (3.22)$$

$$\left(\frac{\sigma_{bb}}{2s_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2s_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{s_c}\right)^2 \geq 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο αστοχεί} \quad (3.23)$$

Όταν η Εξίσωση 3.23 ικανοποιείται για ένα στοιχείο, οι σταθερές  $E_b$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα b),  $G_{ab}$  (μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab),  $\nu_{ba}$ ,  $\nu_{ab}$  (λόγοι Poisson στο επίπεδο ab) μηδενίζονται.

Για το μοντέλο 55:

$$\frac{\sigma_{bb}^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{s_c}\right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t)\sigma_{bb}}{Y_c Y_t} < 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο παραμένει ελαστικό} \quad (3.24)$$

$$\frac{\sigma_{bb}^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{s_c}\right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t)\sigma_{bb}}{Y_c Y_t} \geq 1 \rightarrow \text{Το στοιχείο αστοχεί} \quad (3.25)$$

Όταν η Εξίσωση 3.25 ικανοποιείται για ένα στοιχείο, οι σταθερές  $E_b$  (μέτρο ελαστικότητας στον άξονα b),  $G_{ab}$  (μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab),  $\nu_{ba}$ ,  $\nu_{ab}$  (λόγοι Poisson στο επίπεδο ab) μηδενίζονται.

Όπως παρατηρείται, οι εξισώσεις που καθορίζουν την αστοχία της μήτρας σε εφελκυσμό και θλίψη είναι οι ίδιες για το μοντέλο 55.

Στην παρούσα εργασία, το μοντέλο υλικού 54 επιλέχθηκε ως εναλλακτικό του μοντέλου 22. Είναι σημαντικό να πραγματοποιηθούν στο σημείο αυτό μερικά σχόλια σχετικά με τον τρόπο που οι αναπτυσσόμενες στα στοιχεία τάσεις αντιμετωπίζονται κατά την αστοχία τους, όπως έγινε προηγουμένως και για το μοντέλο 22. Υπενθυμίζεται ότι όταν ένα στοιχείο αστοχήσει στην περίπτωση του μοντέλου 22, τότε οι τάσεις του στιγμιαία μηδενίζονται. Το στοιχείο συνεχίζει να παραμορφώνεται, χωρίς να διαγράφεται και είναι απόφαση του χρήστη να υιοθετήσει κάποια τεχνική διαγραφής στοιχείων αν απαιτείται από την προσομοίωσή του. Στην περίπτωση του μοντέλου 54, όταν ένα στοιχείο αστοχεί, οι κατάλληλες ελαστικές σταθερές, αναλόγως του κριτηρίου, μηδενίζονται, όμως η εξέλιξη των τάσεων είναι διαφορετική από την περίπτωση του μοντέλου 22. Μια ακόμη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι για το μοντέλο 54 υπάρχουν επιλογές για διαγραφή στοιχείων που έχουν αστοχήσει στον ίδιο τον ορισμό του μοντέλου. Ο χειρισμός των στοιχείων μετά την αστοχία στο μοντέλο 54 είναι βασισμένος σε ένα συνδυασμό των τιμών αντοχής του υλικού και μια σειράς παραμορφώσεων αστοχίας καθοριζόμενων από τον χρήστη (μέθοδοι για άλλους τρόπους αστοχίας υποστηρίζονται, ωστόσο δεν εφαρμόζονται εδώ. Για περισσότερες λεπτομέρειες, ο αναγνώστης παραπεμπεται στο εγχειρίδιο LS-DYNA Theory Manual [14]). Πιο συγκεκριμένα, τέσσερις (4) ανηγμένες παραμορφώσεις αστοχίας μπορούν να οριστούν, ως ακολούθως:

- DFAILT, που εκφράζει τη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σε εφελκυσμό των ινών (μέγιστη τιμή ίση με 1, που αντιστοιχεί σε 100% παραμόρφωση)
- DFAILC, που εκφράζει τη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σε θλίψη των ινών (μέγιστη τιμή ίση με -1, που αντιστοιχεί σε 100% παραμόρφωση)
- DFAILM, που εκφράζει τη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σε εφελκυσμό και θλίψη της μήτρας (πάντα θετική τιμή, μέγιστη τιμή ίση με 1, που αντιστοιχεί σε 100% παραμόρφωση)
- DFAILS, που εκφράζει τη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σε διάτμηση (πάντα θετική τιμή)

Ο τρόπος με τον οποίο οι ανωτέρω ανηγμένες παραμορφώσεις χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις αντοχές του υλικού εξαρτάται από την τιμή που έχει η παράμετρος DFAILT, που εκφράζει την παραμόρφωση των ινών σε εφελκυσμό.

- Εάν  $DFAILT = 0$ , τότε οι τάσεις του στοιχείου που έχει αστοχήσει θα μηδενιστούν μόνο όταν υπάρξει αστοχία βάσει του κριτηρίου αστοχίας σε εφελκυσμό των ινών, δηλαδή η εφελκυστική τάση στις ίνες γίνει ίση με την αντοχή τους σε εφελκυσμό. Επιπλέον, το στοιχείο θα διαγραφεί από την προσομοίωση. Για τις άλλες τάσεις, δύο περιπτώσεις μπορεί να ισχύουν:
  - Εάν φτάσουν τη μέγιστη τιμή τους (τιμή αντοχής) πριν φτάσουν την αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας, τότε κρατούνται σταθερές στην τιμή αντοχής μέχρι να συμβεί η αστοχία λόγω εφελκυσμού των ινών.
  - Εάν φτάσουν την μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση τους πριν φτάσουν τις αντίστοιχες τιμές αντοχής τους, τότε οι τάσεις κρατούνται στο επίπεδο που έχουν τη στιγμή που φτάνουν τη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση και μηδενίζονται μόνο όταν συμβεί η αστοχία των ινών σε εφελκυσμό.
- Εάν  $DFAILT > 0$ , τότε η κατάσταση είναι λίγο διαφορετική, και ο μηδενισμός τάσεων με τη συνακόλουθη διαγραφή στοιχείων θα μπορούσε να συμβεί και στα υπόλοιπα κριτήρια αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα:
  - Εάν κάποια από τις τάσεις του στοιχείου φτάσει τη μέγιστη τιμή της (τιμή αντοχής) πριν φτάσει την αντίστοιχη μέγιστη τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης, τότε οι τάσεις κρατούνται σταθερές μέχρι την τιμή της μέγιστης ανηγμένης παραμόρφωσης (DFAILT, DFAILC, DFAILM, DFAILS). Σε αυτό το σημείο, οι τάσεις του στοιχείου μηδενίζονται και το στοιχείο διαγράφεται από την προσομοίωση.
  - Εάν κάποια από τις μέγιστες τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης συμβεί πριν την αντίστοιχη μέγιστη τάση (τιμής αντοχής), τότε οι τάσεις του

στοιχείου μηδενίζονται και το στοιχείο διαγράφεται από την προσομοίωση.

Στην παρούσα μελέτη ακολουθήθηκε η μέθοδος του  $DFAILT = 0$ , η οποία οδηγεί σε μηδενισμό των τάσεων και συνακόλουθη διαγραφή των στοιχείων μόνο βάσει του κριτηρίου θραύσης των ινών λόγω εφελκυσμού. Η μέθοδος αυτή ακολουθήθηκε από τους Dhaliwal et al [21] σε παρόμοιας φύσης καμπτική φόρτιση υβριδικών συνθέτων υλικών από στρώσεις CFRP (ανθρακόνημα – εποξική ρητίνη) και αλουμινίου.

Για μια αντίληψη του τρόπου με τον οποίο τα μοντέλα υλικού `MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE` (`MAT_54/55`) έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία, ένας αριθμός δημοσιευμένων εργασιών συζητώνται εδώ. Επισημαίνεται ότι η χρήση τους έχει πραγματοποιηθεί σε περιπτώσεις τόσο στατικών όσο και δυναμικών προβλημάτων. Σε μια περίπτωση στατικής κάμψης τεσσάρων σημείων δοκών σκυροδέματος ενισχυμένων με διαμήκεις δοκούς συνθέτου υλικού, οι Tavaréz et al [22] χρησιμοποίησαν την εκδοχή `MAT_54` για τη μοντελοποίηση των δοκών συνθέτου υλικού. Δόθηκε έμφαση στη μελέτη των τάσεων που αναπτύσσονται στις δοκούς αυτές, και εξάχθηκαν συμπεράσματα περί του τρόπου σχεδίασης των δομών που μελετήθηκαν. Στην περίπτωση των Mamalis et al [10] που προαναφέρθηκε και στο μοντέλο `MAT_COMPOSITE_DAMAGE`, η εκδοχή `MAT_55` του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση των εγκάρσιων κυλίνδρων από σύνθετο υλικό που τοποθετήθηκαν ως ενισχύσεις στον πυρήνα των δομών sandwich, με ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης και τα μοτίβα παραμόρφωσης – αστοχιών. Οι Feraboli et al [2010 Predictive modeling] μελέτησαν μια sandwich κατασκευή για απορρόφηση ενέργειας, όπου δομικά στοιχεία ήταν ένας μεταλλικός πυρήνας από honeycomb και οι ενισχυτικές πλάκες από σύνθετο υλικό (ίνες άνθρακα – εποξική ρητίνη). Η εκδοχή `MAT_54` του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση των τελευταίων. Η κατασκευή μελετήθηκε σε διάτρηση με χρήση κυλινδρικού διεισδύτη (impactor). Η συμφωνία μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης σε όρους δύναμης – μετατόπισης, απορρόφησης ενέργειας και μορφολογίας του δοκιμίου κρίθηκε ως ικανοποιητική. Τέλος, οι Dhaliwal et al [2016 Experimental and numerical investigation of flexural behavior] μελέτησαν περίπτωση κάμψης τριών σημείων σε υβριδικά σύνθετα υλικά με στρώσεις CFRP (ίνες άνθρακα – εποξική ρητίνη) και κράματος αλουμινίου (FML – Fiber Metal Laminate). Για τη μοντελοποίηση των CFRP στρώσεων χρησιμοποίησαν την εκδοχή `MAT_54` και η συσχέτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα όσον αφορά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης και μοτίβα παραμόρφωσης – αστοχιών ήταν πολύ καλή.

Από τον τρόπο ορισμού των μοντέλων υλικών MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE και MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE, είναι σαφές ότι απαιτείται μια σειρά από μηχανικές ιδιότητες, ως ελάχιστο δεδομένο για την ενσωμάτωση των μοντέλων αυτών στον κώδικα του LS-DYNA. Όπως φαίνεται και από τον ορισμό τους, βασικές ιδιότητες που απαιτούνται για τον ορισμό τους αφορούν μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης καθώς και αντοχές σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση. Σημειώνεται ότι οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας δεν είχαν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν δικά τους πειράματα ώστε να εξαγάγουν τα απαιτούμενα αποτελέσματα, και έτσι μια σειρά από δημοσιευμένα αποτελέσματα πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, μαζί με κάποιες υποθέσεις, όπου αυτό απαιτείται. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, οι ενισχυτικές πλάκες (skin panels) που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία συνδυασμός έξι (6) στρώσεων GFRP συνθέτου υλικού (δηλαδή ίνες γυαλιού σε μήτρα εποξικής ρητίνης).

Όσον αφορά τις ενισχυτικές ίνες, αναφέρεται ότι είναι της εταιρίας Gurit©, με εμπορική ονομασία ΧΕ603. Οι συγκεκριμένες ίνες γυαλιού είναι τύπου E-glass, εμπορευόμενες σε ύφασμα με αραιή ύφανση με διάταξη  $+45^\circ/-45^\circ$ . Το ύφασμα αυτό αναφέρεται ότι έχει μια επιφανειακή πυκνότητα  $0.6 \text{ kg/m}^2$ , χωρίς να υπάρχουν περισσότερες λεπτομέρειες για τις ιδιότητες του παρεχόμενες από τον κατασκευαστή του. Επίσης, δεν εντοπίστηκε χρήση του συγκεκριμένου τύπου υφάσματος σε άλλη δημοσιευμένη εργασία. Ως εκ τούτου, κάποιες υποθέσεις είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν ώστε να εξαχθούν οι απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες των ινών γυαλιού. Αρχικά, ως θεωρηθεί ένα κομμάτι του υφάσματος με εμβαδόν  $A$ , με μία μάζα  $m$ , ένα πάχος  $t$  και πυκνότητα μάζας  $\rho$ . Επισημαίνεται ότι βάσει των προηγούμενων συμβολισμών, το κλάσμα  $m/A$  είναι η επιφανειακή πυκνότητα του υφάσματος ινών γυαλιού, η οποία ισούται με  $0.6 \text{ kg/m}^2$ . Ένα τυπικό εύρος τιμών πυκνότητας μάζας για ίνες γυαλιού τύπου E είναι  $2540 - 2620 \text{ kg/m}^3$  [24], του οποίου εύρους η μέση τιμή είναι  $2580 \text{ kg/m}^3$ . Η Εξίσωση 3.26 δίνει τη μάζα του κομματιού υφάσματος που θεωρήθηκε. Αναδιατάσσοντας την εξίσωση και θέτοντας  $m/A = 0.6 \text{ kg/m}^2$ , καθώς και  $\rho = 2580 \text{ kg/m}^3$ , προκύπτει ένα πάχος  $t_{fabric} = 0.23 \text{ mm}$  για το ύφασμα δύο στρώσεων ινών γυαλιού, άρα η κάθε στρώση γυαλιού έχει πάχος  $t_{fiberglass} = t_{fabric}/2 = 0.115 \text{ mm}$ .

$$m = \rho \cdot A \cdot t \quad (3.26)$$

Το πάχος ίνας γυαλιού που προκύπτει είναι αποδεκτό σύμφωνα με την αναφορά [25].

Με έξι στρώσεις ινών γυαλιού συνολικά σε κάθε ενισχυτική πλάκα, και δεδομένου του γεγονότος ότι κάθε ενισχυτική πλάκα έχει πάχος ίσο με  $1.5 \text{ mm}$ , όπως τέθηκε στο Κεφάλαιο 2, το πάχος κάθε στρώσης εκ των έξι είναι  $0.25 \text{ mm}$ . Υποθέτοντας ότι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ινών είναι αμελητέα, το πάχος της ρητίνης σε κάθε



στρώση είναι ίσο με  $0.25 - 0.115 = 0.135$  mm. Έχοντας το πάχος της ίνας και της ρητίνης σε κάθε στρώση, είναι εύκολο να εξαχθούν απευθείας τα αντίστοιχα κλάσματα όγκου ινών και ρητίνης. Το πάχος της ίνας αναφέρεται ως  $t_f$  και το αντίστοιχο της ρητίνης ως  $t_m$ . Οι Εξισώσεις 3.27 και 3.28 εκφράζουν τα κλάσματα όγκου ινών και ρητίνης (μήτρας).

$$V_f = \frac{t_f}{t_{lam}} = 0.46 \quad (3.27)$$

$$V_m = \frac{t_m}{t_{lam}} = 0.54 \quad (3.28)$$

Ακολούθως, πραγματοποιείται ένας υπολογισμός των μηχανικών ιδιοτήτων για μία στρώση έκ των έξι (6) που συνθέτουν κάθε μία εκ των ενισχυτικών πλακών του πειράματος. Οι μηχανικές αυτές ιδιότητες αφορούν τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης, τους λόγους Poisson και τις τιμές αντοχών σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση. Για τον υπολογισμό αυτό, χρησιμοποιείται η εφαρμογή The Laminator©, λειτουργικός σκοπός της οποίας είναι η εκτέλεση και τέτοιου είδους υπολογισμών, μεταξύ άλλων, που αφορούν σύνθετα υλικά.

Οι ίνες γυαλιού E-glass θεωρούνται ως ιστροπικές, με ένα τυπικό εύρος τιμών μέτρων ελαστικότητάς τους να είναι 71-81 GPa [24], [25]. Η κατώτερη τιμή των 71 GPa χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς. Ο λόγος Poisson σύμφωνα με τις ίδιες πηγές εκτιμάται σε 0.2, και το μέτρο διάτμησης σε 30 GPa. Η αντοχή σε εφελκυσμό των ινών είναι της τάξης των 2000 MPa [25], και σε θλίψη της τάξης των 4000 MPa [25].

Για την εποξική ρητίνη Prime 20 LV της εταιρίας Gurit© επίσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως μήτρα στη συγκεκριμένη περίπτωση, διατίθεται ένα τεχνικό φυλλάδιο στο Διαδίκτυο [26] από το οποίο μπορούν να αντληθούν κάποιες πληροφορίες. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας την ρητίνη ιστροπική, θεωρείται, βάσει τεχνικού φυλλαδίου ένα μέτρο ελαστικότητας 3.5 GPa. Για το λόγο Poisson έγινε μια εκτίμηση τιμής 0.3. Συνεπώς, το μέτρο διάτμησης προκύπτει να είναι 1.46 GPa. Από το τεχνικό φυλλάδιο προκύπτει επίσης η τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό 73 MPa.

Στον παρακάτω Πίνακα συγκεντρώνονται όλες οι ιδιότητες που εκτιμήθηκαν – ανευρέθησαν στη βιβλιογραφία για τις ίνες γυαλιού τύπου E και τη ρητίνη που χρησιμοποιείται ως μήτρα.

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες των συστατικών των στρώσεων συνθέτου υλικού των ενισχυτικών πλακών.

Πυκνότητα ινών γυαλιού ( $\rho_f$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	2580
Μέτρο ελαστικότητας ινών γυαλιού ( $E_f$ ) (GPa)	71
Μέτρο διάτμησης ινών γυαλιού ( $G_f$ ) (GPa)	30
Λόγος Poisson ινών γυαλιού	0.2
Αντοχή εφελκυσμού ινών γυαλιού ( $X_{tf}$ ) (MPa)	2000
Αντοχή θλίψης ινών γυαλιού ( $X_{cf}$ ) (MPa)	4000
Πυκνότητα μήτρας ( $\rho_m$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	1440
Μέτρο ελαστικότητας μήτρας ( $E_m$ ) (GPa)	3.5
Μέτρο διάτμησης μήτρας ( $G_m$ ) (GPa)	1.46
Λόγος Poisson μήτρας	0.3
Αντοχή εφελκυσμού μήτρας ( $X_{tm}$ ) (MPa)	73
Αντοχή θλίψης μήτρας ( $X_{cm}$ ) (MPa)	114
Αντοχή διάτμησης μήτρας ( $S_m$ ) (MPa)	59

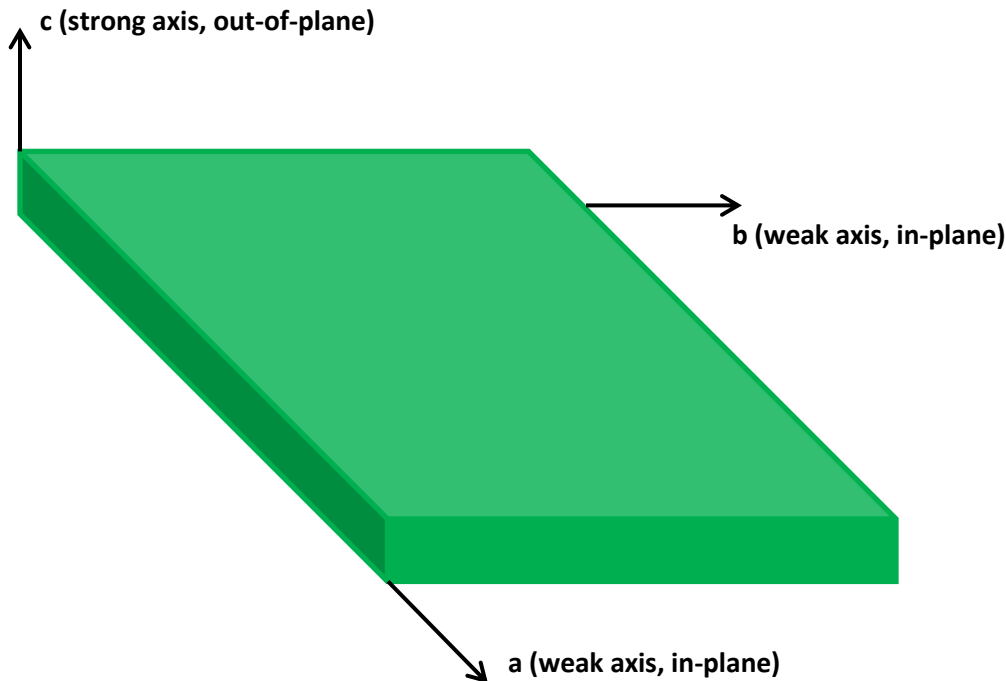
Εισάγοντας τα παραπάνω δεδομένα στο λογισμικό The Laminator©, προκύπτουν για την κάθε στρώση των ενισχυτικών πλακών (λαμβάνοντας υπόψη τις διευκρινίσεις σχετικά με τους άξονες που δόθηκαν στον ορισμό των μοντέλων MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE και MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) οι μηχανικές ιδιότητες του Πίνακα που ακολουθεί. Οι ιδιότητες αυτές χρησιμοποιούνται και στον ορισμό των δύο προαναφερθέντων μοντέλων υλικών στο λογισμικό του LS-DYNA© (σε παρενθέσεις αναφέρονται οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό του LS-DYNA©).

Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες των στρώσεων συνθέτου υλικού των ενισχυτικών πλακών.

Πυκνότητα (RO) ( $\text{kg/m}^3$ )	1964.4
Μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση των ινών (a) (EA) (GPa)	32
Μέτρο ελαστικότητας κάθετα στις ίνες (διεύθ. b) (EB) (GPa)	10.6
Μέτρο ελαστικότητας κάθετα στις ίνες (διεύθ. c) (EC) (GPa)	10.6
Λόγος Poisson στο επίπεδο ba (PRBA)	0.072
Λόγος Poisson στο επίπεδο ca (PRCA)	0.072
Λόγος Poisson στο επίπεδο cb (PRCB)	0.254
Μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ab (GAB)	3.55
Μέτρο διάτμησης στο επίπεδο bc (GBC)	3.55
Μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ca (GCA)	3.55
Αντοχή σε εφελκυσμό στη διεύθυνση των ινών (a) (XT) (MPa)	920
Αντοχή σε θλίψη στη διεύθυνση των ινών (a) (XC) (MPa)	1215
Αντοχή σε εφελκυσμό κάθετα στις ίνες (διεύθ. b) (YT) (MPa)	57.8
Αντοχή σε θλίψη κάθετα στις ίνες (διεύθ. b) (YC) (MPa)	90.25
Αντοχή σε διάτμηση στο επίπεδο ab (SC) (MPa)	46.75

### 3.2.5 Μοντέλο υλικού πυρήνων – MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB)

Το μοντέλο υλικού MAT\_HONEYCOMB είναι ένα από τα λίγα μοντέλα υλικού διαθέσιμα στο λογισμικό του LS-DYNA για την ανάλυση αφρών με ανισοτροπική συμπεριφορά (πιο συγκεκριμένα, εγκάρσιως ισοτροπική), όπως οι PVC αφροί που μελετώνται στην παρούσα εργασία. Όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο LS-DYNA Manual Vol II [15], μια μη γραμμική ελαστο-πλαστική συμπεριφορά μπορεί να καθοριστεί ξεχωριστά για όλες τις ορθές και διατμητικές τάσεις (στους τρεις άξονες ανισοτροπίας δηλαδή και στα αντίστοιχα επίπεδα που αυτοί σχηματίζουν). Πρόκειται δηλαδή περί έξι (6) συνολικά διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης, που αφορούν εφελκυσμό-θλίψη (σε κοινό διάγραμμα) και διάτμηση. Επισημαίνεται ότι αυτά τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης αντιμετωπίζονται ως μη συζευγμένα, όπως εξηγείται παρακάτω. Στο Σχήμα 3.4 αποτυπώνεται ένα στρώμα αφρού, με επισημασμένους τους άξονες ανισοτροπίας. Παρατηρείται ότι ο ισχυρός άξονας είναι ο κάθετος στο επίπεδο του στρώματος αφρού.



Σχήμα 3.4: Σχηματική απεικόνιση ενός στρώματος αφρού PVC.

Κατά τη διαμόρφωση του συγκεκριμένου μοντέλου, υπάρχουν δύο διακριτές περιοχές, η περιοχή πριν την «συμπύκνωση» του αφρού και την περιοχή μετά τη «συμπύκνωση». Στην περιοχή πριν τη συμπύκνωση, θεωρείται ότι το υλικό συμπεριφέρεται σαν αφρός, υπό την έννοια ότι τα κελιά – φυσαλίδες του αφρού υπάρχουν ακόμη και δεν έχουν καταρρεύσει πλήρως. Στην περιοχή μετά τη συμπύκνωση, τα κελιά – φυσαλίδες αέρα

θεωρείται ότι έχουν καταρρεύσει πλήρως, ο παγιδευμένος αέρας έχει απελευθερωθεί και αρχικός αφρός συμπεριφέρεται πλέον σαν το μητρικό υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος (στην περίπτωση αυτή, PVC). Η μετάβαση από τη μία περιοχή στην άλλη πραγματοποιείται σε μια τιμή σχετικού όγκου (τρέχων όγκος προς αρχικό όγκο δηλαδή), που αναφέρεται ως «όγκος συμπύκνωσης», και σημειώνεται ως VF. Η συμπεριφορά του υλικού πριν τη συμπύκνωση είναι ορθοτροπική, όπου οι συνιστώσες του τανυστή των τάσεων αντιμετωπίζονται ως μη συζευγμένες, δηλαδή μια ανηγμένη παραμόρφωση σε έναν άξονα ανισοτροπίας αναπτύσσει αντίσταση μόνο σε αυτόν τον άξονα και σε κανέναν άλλο. Τα μέτρα ελαστικότητας μεταβάλλονται, από την αρχική τιμή τους ( $E_{aa}$ ,  $E_{bb}$ ,  $E_{cc}$ ,  $G_{ab}$ ,  $G_{bc}$ ,  $G_{ca}$ ) μέχρι μια τιμή τη στιγμή της συμπύκνωσης ( $E$ ,  $G$ ). Η μεταβολή αυτή είναι γραμμική συναρτήσει του σχετικού όγκου VF, σύμφωνα με τις Εξισώσεις 3.29 έως 3.34.

$$E_{aa} = E_{aa} + \beta(E - E_{aa}) \quad (3.29)$$

$$E_{bb} = E_{bb} + \beta(E - E_{bb}) \quad (3.30)$$

$$E_{cc} = E_{cc} + \beta(E - E_{cc}) \quad (3.31)$$

$$G_{ab} = G_{ab} + \beta(G - G_{ab}) \quad (3.32)$$

$$G_{bc} = G_{bc} + \beta(G - G_{bc}) \quad (3.33)$$

$$G_{ca} = G_{ca} + \beta(G - G_{ca}) \quad (3.34)$$

Στις ανωτέρω εξισώσεις, ο όρος  $\beta$  προσδιορίζεται βάσει της Εξίσωσης 3.35.

$$\beta = \max \left[ \min \left( \frac{1-V}{1-VF}, 1 \right), 0 \right] \quad (3.35)$$

Κατά τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων, κάθε συνιστώσα της στάσης σε κάθε στοιχείο μετατρέπεται ώστε να εκφραστεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου. Στην περιοχή πριν τη συμπύκνωση, οι συνιστώσες της τάσης μεταβάλλονται σύμφωνα με τις Εξισώσεις 3.36 έως 3.41.

$$\sigma_{aa}^{n+1^{trial}} = \sigma_{aa}^n + E_{aa} \Delta \varepsilon_{aa} \quad (3.36)$$

$$\sigma_{bb}^{n+1^{trial}} = \sigma_{bb}^n + E_{bb} \Delta \varepsilon_{bb} \quad (3.37)$$

$$\sigma_{cc}^{n+1^{trial}} = \sigma_{cc}^n + E_{cc} \Delta \varepsilon_{cc} \quad (3.38)$$

$$\sigma_{ab}^{n+1^{trial}} = \sigma_{ab}^n + 2G_{ab} \Delta \varepsilon_{ab} \quad (3.39)$$

$$\sigma_{bc}^{n+1^{trial}} = \sigma_{bc}^n + 2G_{bc}\Delta\varepsilon_{bc} \quad (3.40)$$

$$\sigma_{ca}^{n+1^{trial}} = \sigma_{bc}^n + 2G_{ca}\Delta\varepsilon_{ca} \quad (3.41)$$

Κάθε μία από τις συνιστώσες της τάσης τότε ελέγχεται ανεξάρτητα ώστε να ελεγχθεί αν παραβιάζει τις μέγιστες τιμές που υπαγορεύονται από το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης, δηλαδή εάν  $|\sigma_{ij}^{n+1^{trial}}| > \sigma_{ij}(e_v)$ , (όπου  $e_v$  είναι η ανηγμένη ογκομετρική παραμόρφωση – volumetric strain), τότε η τάση καθορίζεται από το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης.

Τέλος, δύναται να καθοριστούν και κριτήρια αστοχίας για το συγκεκριμένο μοντέλο υλικού, τα οποία αφορούν την αστοχία σε εφελκυσμό και διάτμηση. Συγκεκριμένα, δύναται να ενεργοποιηθεί ένα εκ των δύο ή και τα δύο κριτήρια, θέτοντας ως τιμές τις ανηγμένες παραμορφώσεις στις οποίες επιθυμείται να συμβεί η αστοχία του εκάστοτε στοιχείου το οποίο έχει φτάσει τη συγκεκριμένη τιμή παραμόρφωσης. Η αστοχία του στοιχείου εκφράζεται μέσω της διαγραφής του από την προσομοίωση, μοντελοποιώντας έτσι την καταστροφική αστοχία του υλικού. Ωστόσο, υφίσταται επίσης και η επιλογή MAT\_ADD\_EROSION στο λογισμικό του LS-DYNA®, η οποία δύναται να εφαρμόσει κριτήρια διαγραφής στοιχείων ασχέτως του αν συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο του υλικού που επιλέγεται ή όχι. Ένα από τα κριτήρια που συμπεριλαμβάνονται είναι και το κριτήριο μέγιστης κύριας ανηγμένης παραμόρφωσης (maximum principal strain criterion). Το κριτήριο αυτό εφαρμόζεται και εδώ. Ωστόσο, όπως έχουν αναφέρει αρκετές μελέτες στις οποίες χρησιμοποιήθηκε το εν λόγω κριτήριο σε συνδυασμό με κάποιο μοντέλο αφρού [10] [11] [27], πρόκειται περί μιας εικονικής τεχνικής για τη μοντελοποίηση καταστροφικών φαινομένων που συμβαίνουν, και δεν μπορεί να καθοριστεί εκ των προτέρων η κρίσιμη τιμή που πρέπει να χρησιμοποιηθεί στο κριτήριο αστοχίας. Αντί αυτού, η τιμή αυτή προσαρμόζεται ώστε να ταιριάζει με τα πειραματικά αποτελέσματα, παρατηρώντας κάθε φορά τον τρόπο με τον οποίο επέρχεται η αστοχία μέχρι να καταλήξει μια τιμή αντιπροσωπευτική της κάθε περίπτωσης φόρτισης.

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο LS-DYNA Manual Vol II [16], για τον ορισμό του υλικού απαιτούνται μια σειρά από παράμετροι καθώς και διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης, όπως προαναφέρθηκε:

- Η πυκνότητα του υλικού (RO). Για τους αφρούς που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, αφορά την αρχική πυκνότητα του αφρού, πριν από οποιαδήποτε παραμόρφωση.

- Το μέτρο ελαστικότητας (E) για τον αφρό στην περιοχή της συμπύκνωσης. Στην εδώ περίπτωση, είναι το μέτρο ελαστικότητας του μητρικού υλικού PVC.
- Ο λόγος Poisson (PR) του μητρικού υλικού PVC.
- Η τάση διαρροής (SIGY) του μητρικού υλικού PVC.
- Ο σχετικός όγκος (VF) στον οποίο συμβαίνει η συμπύκνωση του αφρού.
- Τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης που περιγράφουν τη συμπεριφορά σε εφελκυσμό – θλίψη και διάτμηση στις διευθύνσεις των αξόνων ανισοτροπίας και τα αντίστοιχα επίπεδα που σχηματίζονται (αναφέρονται ως LCA, LCB, LCC, LCAB, LCBC, LCCA), ως συνάρτηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης.
- Τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης του αφρού στην αρχική κατάσταση, πριν από κάθε παραμόρφωση (EAAU, EBBU, ECCU, GABU, GBCU, GCAU).
- Σε περίπτωση που επιθυμείται να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα καταστροφικής αστοχίας του υλικού, οι τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης σε εφελκυσμό (TSEF) ή/και διάτμηση (SSEF) (στη συγκεκριμένη περίπτωση η επιλογή αυτή αντικαθίσταται από τη χρήση του MAT\_ADD\_EROSION με χρήση του κριτηρίου μέγιστης κύριας ανηγμένης παραμόρφωσης (maximum principal strain)).

Εκτός από τα ανωτέρω, απαιτείται και ο καθορισμός των αξόνων ανισοτροπίας μέσω του ορισμού των αντίστοιχων διανυσμάτων.

Αρκετές είναι οι δημοσιευμένες εργασίες στις οποίες το μοντέλο MAT\_HONEYCOMB έχει χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση αφρών. Ωστόσο, εκτός από αφρούς, σε αρκετές μελέτες έχει χρησιμοποιηθεί και για τη μοντελοποίηση δομών honeycomb, μεταλλικών, χάρτινων κλπ. Αναφορές σε περιπτώσεις όπου το μοντελοποιούμενο υλικό ήταν αφρός θα γίνουν εδώ, καθώς τέτοιες περιπτώσεις πραγματεύεται η παρούσα μελέτη.

Οι Hanssen et al [28] χρησιμοποίησαν το μοντέλο MAT\_HONEYCOMB για την προσομοίωση της συμπεριφοράς αφρού αλουμινίου χρησιμοποιούμενου ως ενισχυτικού αλουμινένιων σωλήνων τετράγωνης διατομής υποβαλλόμενων σε στατική θλίψη. Επισημαίνεται ότι οι αφροί αλουμινίου λογίζονται συνήθως ως ισοτροπικά υλικά, και μια «τροποποίηση» του μοντέλου του υλικού απαιτήθηκε, εφαρμόζοντας τις ίδιες τιμές ελαστικών σταθερών και τα ίδια διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης σε όλες τις διευθύνσεις – επίπεδα ανισοτροπίας. Η σύγκριση των μοτίβων παραμόρφωσης και των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης ανάμεσα σε πείραμα και αριθμητικό μοντέλο έδειξε καλή σύγκλιση. Ωστόσο, τονίζεται από τους συγγραφείς ότι η πειραματικά παρατηρούμενη θραύση – σχίσσιμο του αφρού (σε μικροσκοπικό επίπεδο κυρίως) πιθανόν ήταν ένας λόγος ασυμφωνίας μεταξύ πειράματος – προσομοίωσης καθώς συμπεριλήφθηκε στο αριθμητικό μοντέλο με κάποιον τρόπο. Σε μια μελέτη

παρόμοιας φύσεως, οι Toksoy et al [29] χρησιμοποίησαν το μοντέλο MAT\_HONEYCOMB για την προσομοίωση αφρού αλουμινίου ως ενισχυτικού σε παρόμοιες με τις ανωτέρω σωλήνες αλουμινίου τετράγωνης διατομής. Πραγματοποιήθηκαν τόσο στατικά όσο και δυναμικά πειράματα θλίψης και οι αντίστοιχες προσομοιώσεις. Τα ισοτροπικά χαρακτηριστικά του αφρού αλουμινίου αντιμετωπίστηκαν ξανά με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγουμένως, και η εξέλιξη των αναπτυσσόμενων φορτίων και παραμορφώσεων – μοτίβων αστοχίας των κατασκευών κρίθηκε ικανοποιητική. Οι Rajaneesh et al [30] εξέτασαν κρούσεις χαμηλής ταχύτητας σε πλάκες sandwich. Οι πλάκες αποτελούνταν είτε από σύνθετο υλικό (CFRP) είτε από μέταλλο (αλουμίνιο) και από πυρήνα αφρού αλουμινίου. Ο αφρός αλουμινίου μοντελοποιήθηκε με το MAT\_HONEYCOMB μοντέλο, ενώ εφαρμόστηκαν και κριτήρια διαγραφής των στοιχείων για να προσομοιωθούν τα καταστροφικά φαινόμενα στον αφρό κατά τη διάρκεια της διάρρηξής του. Κι εδώ, τα αποτελέσματα που αφορούσαν φορτία, απορροφούμενη ενέργεια, και μοτίβα παραμορφώσεων – αστοχιών έδειξαν καλή συσχέτιση μεταξύ πειράματος και μοντέλου, δεδομένων και των υψηλών διασπορών που εμφανίζονται σε τέτοιες περιπτώσεις φορτίσεων στα αποτελέσματα. Οι ίδιοι συγγραφείς πραγματοποίησαν άλλη μία μελέτη [4] επάνω σε κρούση χαμηλών ταχυτήτων sandwich πλακών με φύλλα αλουμινίου και πυρήνα από αφρό αλουμινίου ή PVC. Και τα δύο είδη αφρών προσομοιώθηκαν με το μοντέλο MAT\_HONEYCOMB. Μοντελοποιήθηκε και η διαγραφή στοιχείων με στόχο την αναπαράσταση των καταστροφικών αστοχιών του πειράματος, χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του LS-DYNA σχετικά με διαγραφή στοιχείων, και προσαρμοζόμενοι στα πειραματικά αποτελέσματα. Ξανά, οι πειραματικές μετρήσεις και τα αριθμητικά αποτελέσματα σε όρους φορτίων, απορρόφησης ενέργειας, και μοτίβων παραμορφώσεων – αστοχίας ήταν σε καλή συμφωνία μεταξύ τους. Και πάλι η ίδια ομάδα χρησιμοποίησε το συγκεκριμένο μοντέλο για αφρούς PVC χρησιμοποιούμενους ως πυρήνες σε sandwich κατασκευές κυκλικού σχήματος υπό καμπτικά φορτία [31]. Στόχος τους ήταν να συγκρίνουν πειραματικά αποτελέσματα, αναλυτικές εξισώσεις και αριθμητικά αποτελέσματα, με τα συμπεράσματα να είναι πολύ θετικά ως προς τη χρήση του μοντέλου MAT\_HONEYCOMB. Οι Tay et al [32] χρησιμοποίησαν το μοντέλο MAT\_HONEYCOMB για την προσομοίωση φελλώδους κυψελοειδούς υλικού, χρησιμοποιούμενο ως ενίσχυση σε πόρτες αυτοκινήτων ώστε να ενισχύσει την αξιοπιστία του οχήματος σε σύγκρουση, απορροφώντας ενέργεια κρούσης και απομακρύνοντας την από τους επιβάτες. Οι Meguid et al [2016 Crush behavior from HONEYCOMB] μοντελοποίησαν με το MAT\_HONEYCOMB αφρό αλουμινίου χρησιμοποιούμενο ως ενίσχυση σε κωνικές λεπτόπαχες κατασκευές ώστε να μελετήσουν την επίδραση που αυτό έχει στην συμπεριφορά τους σε κατάρρευση υπό αξονικά στατικά θλιπτικά φορτία. Όπως έγινε και με άλλους συγγραφείς που

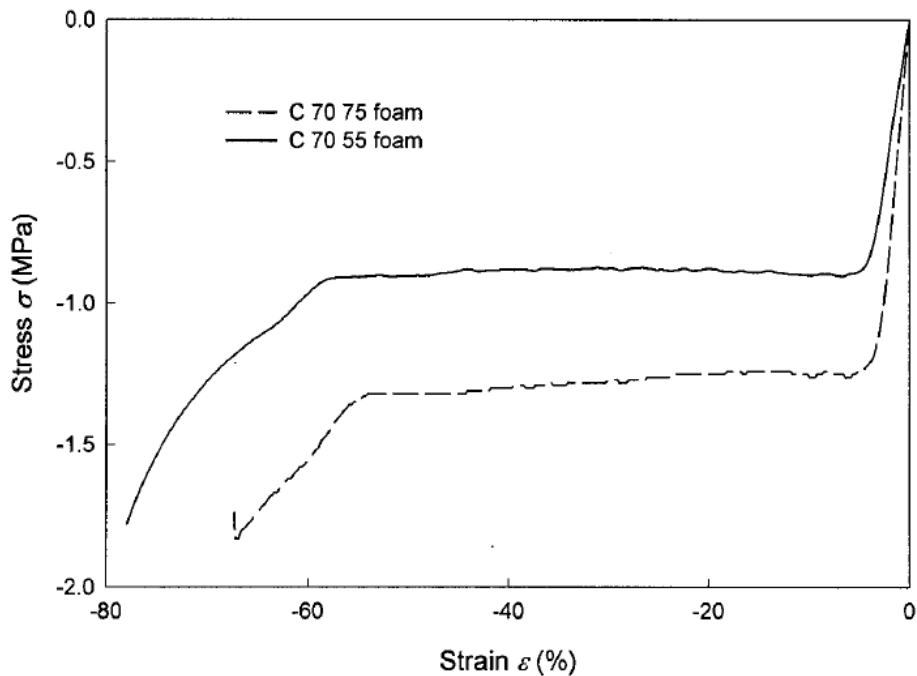
προαναφέρθηκαν, η αποτελεσματικότητα του ανισοτροπικού αυτού μοντέλου να προσομοιώσει τον ιστροπικό αφρό αλουμινίου αποδείχθηκε ξανά. Τέλος, το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε από τους Elnasri et al [33] για τη μελέτη δοκών sandwich με πυρήνα αφρού αλουμινίου υπό κρούσεις μεσαίας και υψηλής ταχύτητας. Η δυνατότητα του LS-DYNA για διαγραφή στοιχείων χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της καταστροφικής αστοχίας στον αφρό, και μια διαδικασία ρύθμισης (calibration) ακολουθήθηκε με βάση το πείραμα ώστε να επιλεγούν κατάλληλες τιμές για τα κριτήρια αστοχίας που εφαρμόστηκαν. Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης έδειξε πολύ καλή συσχέτιση ανάμεσα σε πείραμα και αριθμητικά αποτελέσματα. Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι η κύρια χρήση του μοντέλου MAT\_HONEYCOMB στη δημοσιευμένη έρευνα είναι η προσομοίωση πολυμερικών και μεταλλικών αφρών (ανισοτροπικοί και ιστροπικοί αντίστοιχα), σε περιπτώσεις στατικών και δυναμικών φορτίων, κυρίως αξονικών θλιπτικών, καθώς και κρούσεων χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων. Η δυνατότητα του ως μοντέλο υλικού για τις προσομοιώσεις των αφρών PVC των sandwich κατασκευών που μελετώνται εδώ θα εξεταστεί στα επόμενα κεφάλαια.

Από τον τρόπο ορισμού του μοντέλου MAT\_HONEYCOMB που περιγράφηκε ανωτέρω, αναδεικνύεται η σημασία ύπαρξης ενός ικανά μεγάλου αριθμού πειραματικών αποτελεσμάτων, έτσι ώστε να μπορούν να κατασκευαστούν τα απαιτούμενα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για τις περιπτώσεις εφελκυσμού – θλίψης και διάτμησης, για τους τρεις (3) άξονες ανισοτροπίας και τα αντίστοιχα επίπεδα που αυτοί σχηματίζουν. Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας δεν είχαν τη δυνατότητα να εκτελέσουν τα απαιτούμενα πειράματα με ίδια μέσα. Ως εκ τούτου, η λύση που επιλέχθηκε ήταν να μελετηθούν σχετικά πειράματα από εργασίες άλλων συγγραφέων, σε συνδυασμό με τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών των αφρών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, και με κάποιες υποθέσεις τεχνικής φύσεως που πραγματοποιήθηκαν. Οι τρεις βασικές δημοσιευμένες εργασίες που αναλύθηκαν προέρχονται από τους Berthelot et al [34], Lim et al [35] και Kelly [36]. Στο σημείο αυτό, και πριν ξεκινήσει η ανάλυση αποτελεσμάτων από τους προαναφερθέντες, τονίζεται η σημασία του σχήματος του Σχήματος 3.4, όπου αναδεικνύεται η ανισοτροπική συμπεριφορά των αφρών υπό εξέταση, η οποία, πιο συγκεκριμένα, είναι εγκάρσιως ιστροπική, με τον ισχυρό άξονα να είναι ο κατά το πάχος του στρώματος αφρού.

Οι Berthelot et al [34] διεξήγαν πειράματα αξονικής θλίψης, αξονικού εφελκυσμού και διάτμησης σε αφρούς PVC C70.55 και C70.75, που είναι δύο από τους αφρούς που εξετάζονται και στην παρούσα εργασία. Τα πειράματα αξονικής θλίψης διεξήχθησαν τόσο κατά το πάχος (through-thickness) όσο και στο επίπεδο (in-plane) των στρωμάτων



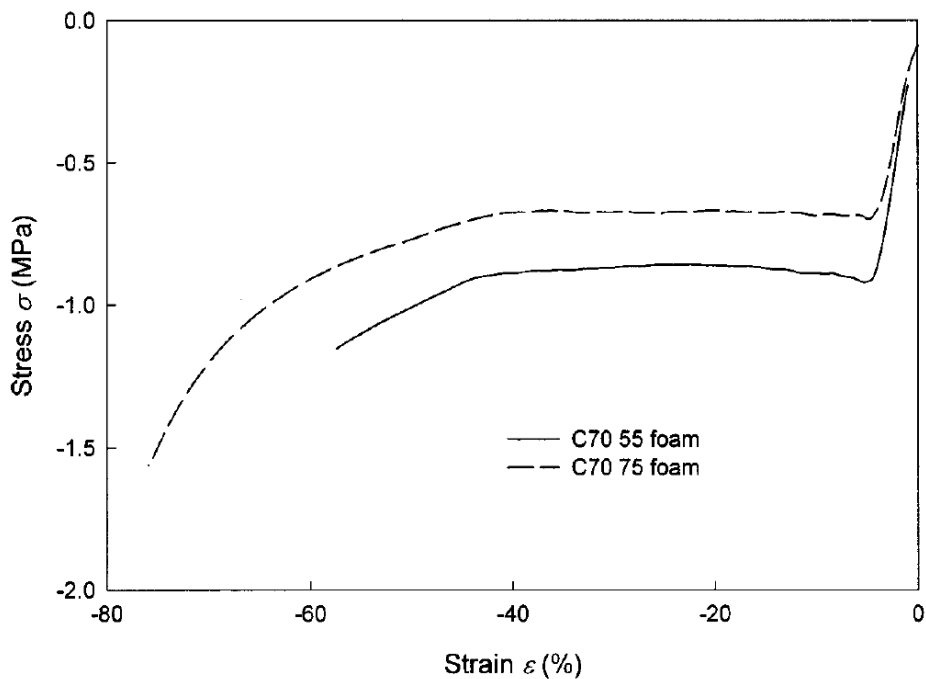
αφρού. Αντίθετα, τα πειράματα αξονικού εφελκυσμού διεξήχθησαν μόνο στο επίπεδο των στρωμάτων αφρού, διότι οι εφελκυστικές ιδιότητες των συγκεκριμένων αφρών κατά το πάχος τους (through-thickness) δεν κρίθηκαν ως σημαντικές για μελέτη, δεδομένων των εφαρμογών για τις οποίες προορίζονται. Αυτό είναι αληθές και στο πλαίσιο του ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας, διότι οι εφελκυστικές ιδιότητες του αφρού κατά το πάχος, αμελητέο ρόλο παίζουν στην καμπτική του συμπεριφορά στις κατασκευές sandwich στις οποίες χρησιμοποιείται ως πυρήνας. Τα πειράματα διάτμησης των Berthelot et al εκτελέστηκαν με τρόπο ώστε να μετρώνται οι διατμητικές ιδιότητες των αφρών στο επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες a και c του Σχήματος 3.4. Στο Σχήμα 3.5 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων αξονικής θλίψης κατά το πάχος των στρωμάτων για τους αφρούς C70.55 και C70.75.



Σχήμα 3.5: Διαγράμματα θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης κατά το πάχος των αφρών C70.55 και C70.75 [34].

Παρατηρώντας τα διαγράμματα του Σχήματος 3.5, συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς των αφρών PVC υπό θλίψη παρατηρούνται, κοινά και για τους δύο αφρούς. Πιο συγκεκριμένα, τα διαγράμματα εμφανίζουν μια αρχική γραμμική περιοχή, που αντιστοιχεί στην οριζόμενη από το νόμο του Hooke ελαστική συμπεριφορά του υλικού, μέχρι μια τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης η οποία καθορίζεται ως «αντοχή σε θλίψη» (compressive strength). Σε αυτό το επίπεδο τάσης, μια πλαστικότητα εμφανίζεται στη συμπεριφορά του αφρού, μιας και η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή με αυξανόμενη ανηγμένη παραμόρφωση, και μάλιστα για ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών παραμόρφωσης. Αυτή η πλαστική συμπεριφορά είναι

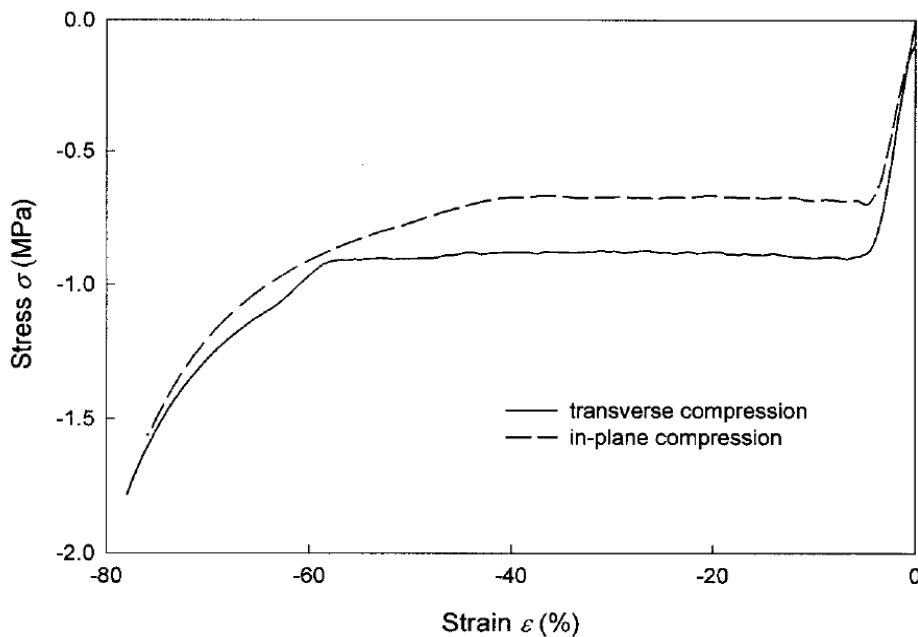
αποτέλεσμα της κατάρρευσης των κελιών αέρα (φουσαλίδων) του αφρού, υπό την καταπόνηση σε θλίψη. Σε ένα επίπεδο ανηγμένης παραμόρφωσης της τάξης του 55-60%, μια ξαφνική αύξηση στα επίπεδα αναπτυσσόμενης τάσης εμφανίζεται, η οποία μπορεί να ερμηνευθεί ως η έναρξη των φαινομένων «συμπύκνωσης» στον αφρό, που προκύπτουν από την πλήρη κατάρρευση σταδιακά των κελιών, με συνακόλουθη απελευθέρωση του αέρα τους. Ο αφρός αρχίζει να πραγματοποιεί βαθμιαία μια μετάβαση προς συμπεριφορά που αντιστοιχεί στο μητρικό υλικό PVC. Είναι σαφές ότι το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη, όπως και η αντοχή σε θλίψη (compressive strength, η τιμή τάσης στην οποία αρχίζει η πλαστική συμπεριφορά του αφρού) είναι μεγαλύτερα για τον αφρό μεγαλύτερης πυκνότητας C70.75. Στη μελέτη των Berthelot et al, μετρήθηκε και ένας λόγος Poisson στην ελαστική περιοχή της τάξης του 0.42. Ωστόσο, μόλις εμφανίστηκε η πλαστικότητα στους αφρούς, η θλίψη στη μία διεύθυνση δεν παρήγαγε ματατοπίσεις και στις άλλες διευθύνσεις, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο λόγος Poisson στην πλαστική περιοχή είναι πρακτικά μηδενικός. Το αποτέλεσμα αυτό έχει επιβεβαιωθεί και από άλλες μελέτες, όπως αυτή των Gdoutos et al [37], οι οποίοι πραγματοποίησαν αντίστοιχα πειράματα σε παρόμοιας φύσεως αφρούς PVC.



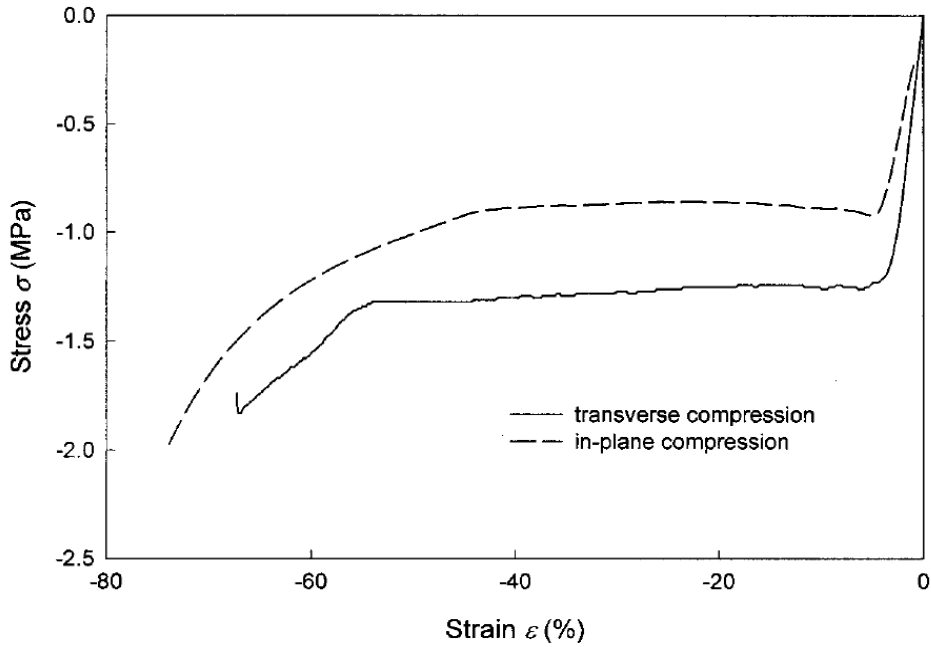
Σχήμα 3.6: Διαγράμματα θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης στο επίπεδο των αφρών C70.55 και C70.75 [34].

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από τη θλίψη των αφρών στο επίπεδο των στρωμάτων τους (in-plane) (διευθύνσεις a και b σύμφωνα με το Σχήμα 3.4). Επισημαίνεται, όπως έγινε και από τους συγγραφείς της μελέτης, ότι στην περίπτωση αυτή, δεν έχει σημασία ποιος από τους άξονες θα επιλεγεί για τη διεξαγωγή

των πειραμάτων, μιας και το επίπεδο ab είναι επίπεδο ισοτροπικής συμπεριφοράς. Όπως και προηγουμένως, μια ελαστο-πλαστική συμπεριφορά παρατηρείται, ακολουθούμενη από μια περιοχή συμπίκνωσης του αφρού. Και πάλι ο αφρός μεγαλύτερης πυκνότητας C70.75 εμφάνισε μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και αντοχή σε θλίψη από τον C70.55. Ωστόσο, διαπιστώνονται κάποιες μικρές διαφορές σε σχέση με τα πρώτα πειράματα θλίψης, κατά το πάχος του αφρού. Αρχικά, παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας του αφρού κατά το πάχος του είναι μεγαλύτερο, όπως το ίδιο ισχύει και για την αντοχή σε θλίψη (compressive strength). Επιπρόσθετα, το εύρος ανηγμένων παραμορφώσεων στις οποίες η τάση παραμένει σταθερή (πλαστική περιοχή) είναι μικρότερο στην δεύτερη περίπτωση, μιας και φθάνει περίπου το 40% αντί 55-60% που ήταν προηγουμένως. Ακόμη, στην περιοχή συμπίκνωσης του αφρού που ακολουθεί την πλαστική περιοχή, η κλίση του διαγράμματος είναι σημαντικά μεγαλύτερη κατά το πάχος του αφρού. Για λόγους καλύτερης εποπτικής σύγκρισης, παρατίθενται και τα αποτελέσματα των πειραμάτων θλίψης για κάθε αφρό ξεχωριστά στους δύο άξονες που πραγματοποιήθηκαν (Σχήματα 3.7 και 3.8).

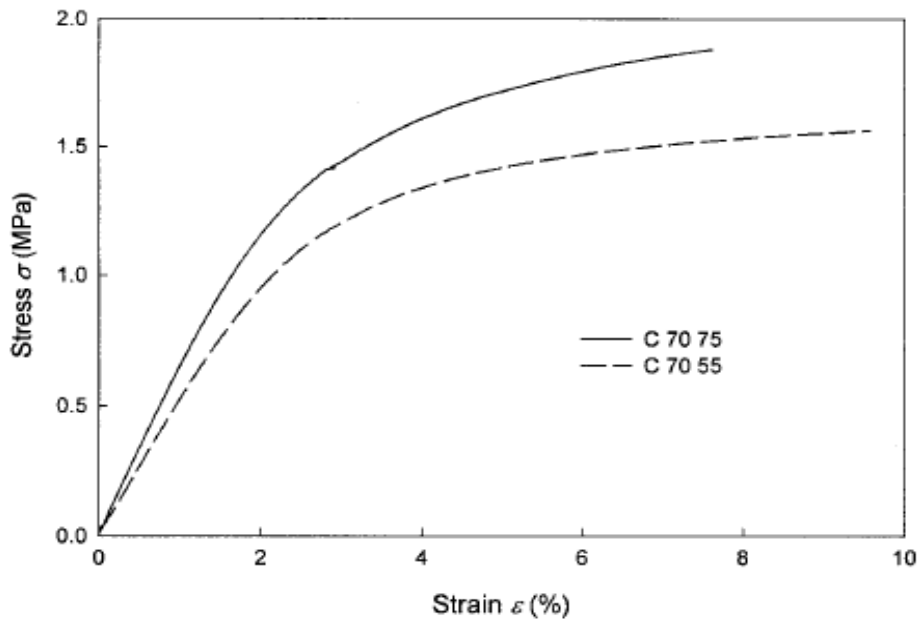


Σχήμα 3.7: Συγκριτικά διαγράμματα θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για τον αφρό C70.55 [34].



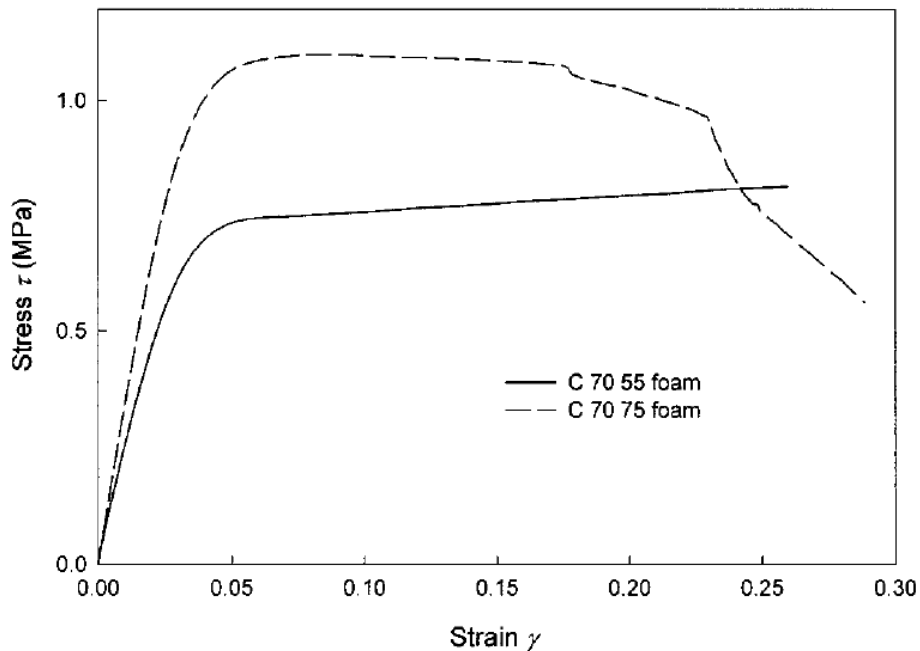
Σχήμα 3.8: Συγκριτικά διαγράμματα θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για τον αφρό C70.75 [34].

Στο Σχήμα 3.9 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα από τον αξονικό εφελκυσμό που πραγματοποιήθηκε στους δύο αφρούς στο επίπεδο των στρωμάτων (a και b άξονες). Υπενθυμίζεται ότι δεν πραγματοποιήθηκαν πειράματα στην περίπτωση αυτή κατά το πάχος των αφρών.



Σχήμα 3.9: Διαγράμματα εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης των αφρών C70.55 και C70.75 [34].

Μια πολύ διαφορετική συμπεριφορά προκύπτει σε εφελκυσμό σε σχέση με τη θλίψη. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει μια αρχική γραμμική περιοχή, που αντιστοιχεί στην ελαστική συμπεριφορά των αφρών, βάσει του νόμου του Hooke. Μετά την αρχική γραμμική περιοχή λοιπόν, ακολουθεί μια μη γραμμική περιοχή, με την κλίση του διαγράμματος τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης να μειώνεται συνεχώς, μέχρι ένα επίπεδο παραμόρφωσης στο οποίο επέρχεται μια ακαριαία, ψαθυρή θραύση. Είναι σαφές από το ανωτέρω διάγραμμα ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένο σημείο μετάβασης από την γραμμική στη μη γραμμική περιοχή, όπως συνέβαινε στην περίπτωση των πειραμάτων θλίψης, και η μετάβαση γίνεται ομαλά. Επίσης, δεν υπάρχει επ' ουδενί η πλαστική συμπεριφορά που παρατηρήθηκε στην περίπτωση της θλίψης. Το μέγιστο επίπεδο τάσης, το οποίο αντιστοιχεί στη στιγμή της θραύσης μπορεί να χαρακτηριστεί ως «αντοχή σε εφελκυσμό» (tensile strength). Όπως και πριν, μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας αλλά και αντοχή σε εφελκυσμό εμφανίζει ο πυκνότερος αφρός C70.75. Ωστόσο, ο αφρός αυτός εμφάνισε μικρότερη ανηγμένη παραμόρφωση κατά την αστοχία.

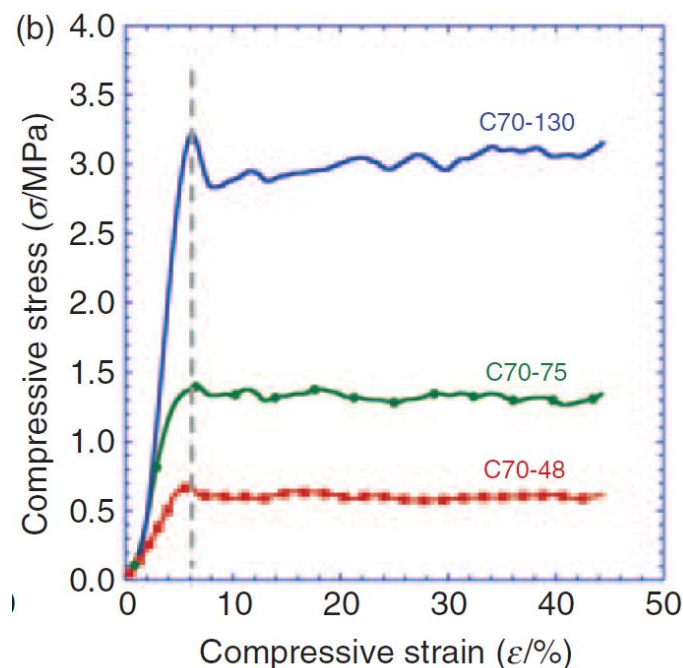


Σχήμα 3.10: Διαγράμματα διατμητικής τάσης – παραμόρφωσης των αφρών C70.55 και C70.75 [34].

Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν στους δύο αφρούς. Η συμπεριφορά των αφρών είναι αρχικά ελαστική, που αντιστοιχεί στο γραμμικό τμήμα του διαγράμματος, μέχρι μια τιμή της τάσης, οριζόμενη ως «αντοχή σε διάτμηση» (shear strength). Από το σημείο αυτό κι έπειτα, η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή, εμφανίζοντας πλαστική συμπεριφορά

παρόμοια με αυτή των πειραμάτων θλίψης. Στο τέλος αυτής της πλαστικής περιοχής, επέρχεται ψαθυρή θραύση των αφρών. Για μια ακόμη φορά, ισχυρότερος αφρός σε όρους μέτρου διάτμησης και αντοχής σε διάτμηση αποδείχτηκε ο υψηλότερης πυκνότητας C70.75.

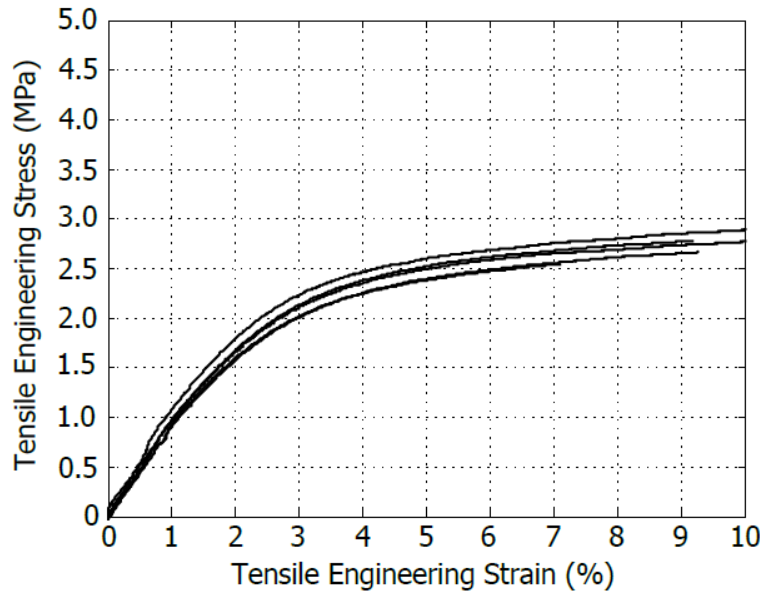
Στη δεύτερη πειραματική εργασία από τους Lim et al [35], μια σειρά πειραμάτων αξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε αφρούς PVC. Ανάμεσα στους αφρούς που εξετάστηκαν, υπήρχαν και οι C70.48, C70.75 και C70.130. Παρόλο που μόνο ο C70.75 αφορά την μελέτη της παρούσας εργασίας, εντούτοις οι άλλες δύο περιπτώσεις μπορούν να βοηθήσουν στην επιβεβαίωση κάποιων συμπερασμάτων. Στο Σχήμα 3.11 παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων θλίψης.



Σχήμα 3.11: Διαγράμματα θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης αφρών C70.48, C70.75 και C70.130 [35].

Είναι προφανές από τα ανωτέρω διαγράμματα ότι η συμπεριφορά σε θλίψη των αφρών που εξετάζονται συμφωνεί, όσον αφορά τη μορφή των διαγραμμάτων και την αντίστοιχη εξέλιξη των φαινομένων, με τα όσα παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Τα διαγράμματα ξεκινούν με μια αρχική γραμμική – ελαστική συμπεριφορά, μέχρι μια τιμή τάσης (αντοχή σε θλίψη) στην οποία ξεκινά ένα «plateau» τάσης (πλαστική συμπεριφορά). Η πλαστική αυτή συμπεριφορά συνεχίζεται με αυξανόμενη ανηγμένη παραμόρφωση, μέχρι το τέλος του πειράματος, το οποίο τερματίζεται πριν την έναρξη της περιοχής συμπύκνωσης του αφρού.

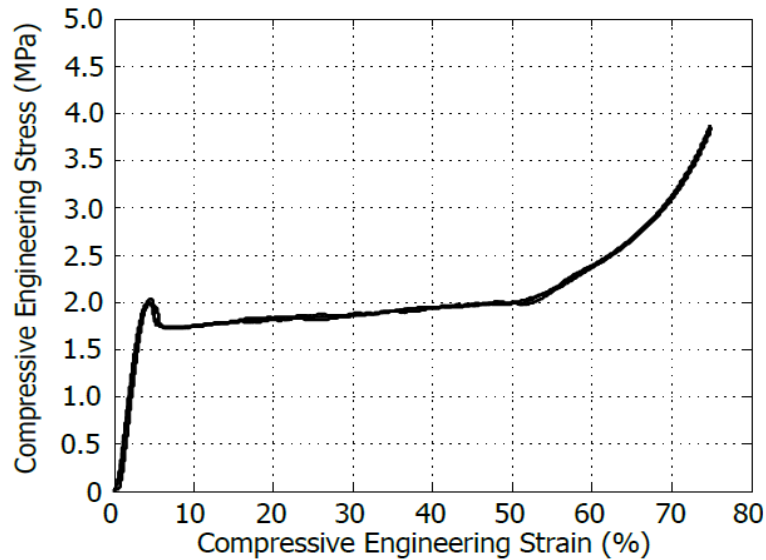
Τέλος, ο M. Kelly [36] στην διδακτορική του διατριβή μελέτησε, μεταξύ άλλων και τον αφρό C70.90, ο οποίος αφορά την παρούσα εργασία, διεξάγοντας πειράματα αξονικού εφελκυσμού και αξονικής θλίψης. Σημειωτέον ότι τα πειράματα αξονικού εφελκυσμού διεξήχθησαν μόνο κατά το επίπεδο των στρωμάτων αφρού (διευθύνσεις a και b του Σχήματος 3.4) και τα πειράματα θλίψης μόνο κατά το πάχος, δηλαδή στη διεύθυνση του άξονα c του Σχήματος 3.4. Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αξονικού εφελκυσμού.



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης για τον αφρό C70.90 [36].

Είναι σαφές ότι η συμπεριφορά του αφρού C70.90 δεν αποκλίνει από τη γενική συμπεριφορά που παρουσιάστηκε από τους Berthelot et al [34]. Υπάρχει μια αρχική γραμμική περιοχή, καθοριζόμενη από την ελαστική συμπεριφορά του αφρού, με μια ομαλή μετάβαση σε μη γραμμική περιοχή, μέχρι την ψαθυρή θραύση του αφρού σε σημείο το οποίο χαρακτηρίζει και την αντοχή του αφρού σε εφελκυσμό (tensile strength).

Στο Σχήμα 3.13 παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων θλίψης στη διεύθυνση του άξονα c του Σχήματος 3.4 (κατά το πάχος του στρώματος αφρού δηλαδή).



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για τον αφρό C70.90 [36].

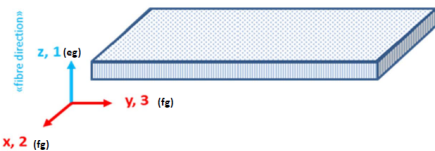
Και πάλι, η τυπική μηχανική συμπεριφορά των αφρών PVC σε θλίψη, όπως προσδιορίστηκε από τους Berthelot et al [34], παρατηρείται εδώ. Ο αφρός C70.90, ως υψηλότερης πυκνότητας από τους C70.55 και C70.75, σωστά εμφανίζει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη και αντοχής σε θλίψη.

Ωστόσο, πέρα από τα πειραματικά αποτελέσματα που προαναφέρθηκαν, είναι σημαντικό να αναζητηθούν πληροφορίες και από τον κατασκευαστή των τριών αφρών C70.55, C70.75 και C70.90 που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Στόχος είναι, συνδυάζοντας τις πληροφορίες που μπορούν να αντληθούν από τα ανωτέρω πειράματα και από στοιχεία του κατασκευαστή, να δημιουργηθούν τεχνητά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για τους εν λόγω αφρούς ώστε να μπορούν να εισαχθούν στον κώδικα του LS-DYNA στα πλαίσια του μοντέλου υλικού MAT\_HONEYCOMB. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Σχήμα 2.1 του Κεφαλαίου 2, όπου το δημοσιευμένο στο Διαδίκτυο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή των αφρών Airex© παρουσιάστηκε. Ωστόσο, λόγω του γεγονότος ότι στο συγκεκριμένο τεχνικό φυλλάδιο δεν αναφέρονται όλες οι ιδιότητες των αφρών, μετά από επικοινωνία με την εταιρία αποκτήθηκαν πληρέστερες μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες παρατίθενται στο Σχήμα 3.13. Υπενθυμίζεται ότι στο Κεφάλαιο 2, το φυλλάδιο του κατασκευαστή έδινε τις μέσες και τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των αφρών, ενώ στον παρακάτω Πίνακα αναφέρονται μόνο μέσες τιμές.



Πίνακας 3.3: Λεπτομερέστερες μηχανικές ιδιότητες των αφρών C70, που αποκτήθηκαν μετά από επικοινωνία με την κατασκευάστρια εταιρεία.

Direction Definition



	Standard	Unit	Direction xyz	Direction 123	Direction xyz	Direction 123	Relative to TDS value	Typical values						
								C70.40	C70.48	C70.55	C70.75	C70.90	C70.130	C70.200
Density	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>						40	48	60	80	100	130	200
Tensile Strength, eg	ASTM C297	MPa	z	1	$\sigma_z$	$\sigma_1$	131%	0.9	1.0	1.9	3.1	3.5	5.2	7.5
Tensile Strength, fg	ISO 527 1-2	MPa	x = y	2 = 3	$\sigma_{x=y}$	$\sigma_{2=3}$	100%	0.7	0.95	1.3	2	2.7	4	6
Tensile Modulus, eg	ASTM C297	MPa	z	1	$E_z$	$E_1$	190%	60	65	90	125	145	210	320
Tensile Modulus, fg	ISO 527 1-2	MPa	x = y	2 = 3	$\sigma_{x=y}$	$\sigma_{2=3}$	100%	28	35	45	66	84	115	175
Compression Strength, eg	ISO 844	MPa	z	1	$\sigma_z$	$\sigma_1$	100%	0.45	0.6	0.9	1.45	2	3	5.2
Compression Strength, fg	ISO 844	MPa	x = y	2 = 3	$\sigma_{x=y}$	$\sigma_{2=3}$	57%	0.3	0.3	0.5	0.8	1.1	1.7	3.0
Compression Modulus, eg	DIN 53421	MPa	z	1	$E_z$	$E_1$	100%	41	48	69	104	130	170	280
Compression modulus, fg	DIN 53421	MPa	x = y	2 = 3	$E_{x=y}$	$E_{2=3}$	75%	31	36	52	78	98	128	210
Shear strength, eg	ISO 1922	MPa	zy = zx	13 = 12	$\tau_{zy}=\tau_{zx}$	$\tau_{13}=\tau_{12}$	100%	0.5	0.6	0.9	1.2	1.7	2.4	3.5
Shear strength, fg, parallel	ISO 1922	MPa	yz = xz	31 = 21	$\tau_{yz}=\tau_{xz}$	$\tau_{31}=\tau_{21}$	72%	0.3	0.4	0.6	0.9	1.2	1.7	2.5
Shear strength, fg, transverse	ISO 1922	MPa	yx = xy	32 = 23	$\tau_{yx}=\tau_{xy}$	$\tau_{32}=\tau_{23}$	72%	0.3	0.4	0.6	0.9	1.2	1.7	2.5
Shear modulus, eg	ASTM C393	MPa	zy = zx	13 = 12	$G_{zy}=G_{zx}$	$G_{13}=G_{12}$	100%	13	16	22	30	40	54	75
Shear modulus, fg, parallel	ASTM C393	MPa	yz = xz	31 = 21	$G_{yz}=G_{xz}$	$G_{31}=G_{21}$	62%	8	10	14	19	25	33	47
Shear modulus, fg, transverse	ASTM C393	MPa	yx = xy	32 = 23	$G_{yx}=G_{xy}$	$G_{32}=G_{23}$	62%	8	10	14	19	25	33	47

eg: endgrain (out-of-plane)  
fg: flatgrain (in-plane)

Τα δεδομένα που δίνονται ανωτέρω συγκρίνονται παρακάτω με τα πειραματικά από τις εργασίες που μελετήθηκαν. Ωστόσο, πριν από αυτό, απαιτείται η διευκρίνιση ορισμένων σημείων:

- α. Τα δεδομένα του κατασκευαστή δίνουν μια τιμή την οποία ορίζουν ως «αντοχή σε θλίψη» (compressive strength), τόσο κατά το πάχος των στρωμάτων αφρού όσο και στο επίπεδό τους. Από τη μελέτη των εργασιών [34], [35] και [36], προέκυψε ότι ο κάθε συγγραφέας όριζε με διαφορετικό τρόπο την αντοχή σε θλίψη. Παραδείγματος χάριν, οι Berthelot et al [34] όρισαν ως αντοχή σε θλίψη την τιμή της τάσης τη στιγμή έναρξης του «plateau» τάσης, της περιοχής δηλαδή πλαστικής συμπεριφοράς του αφρού. Από την άλλη, οι Lim et al [35] επεσήμαναν την αντίστοιχη τιμή ως «τάση διαρροής». Τέλος, ο M. Kelly [36], όρισε ως «αντοχή κατάρρευσης» (crushing strength) την τιμή της τάσης στην έναρξη της πλαστικής περιοχής και ως «plateau stress» την τάση στο τέλος της πλαστικής περιοχής, μη ορίζοντας μόνο μια τιμή ως «αντοχή σε θλίψη». Ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι διαφοροποιήσεις χειρίζονται στην παρούσα εργασία αναλύεται αργότερα.
- β. Όσον αφορά τη διατμητική συμπεριφορά, ο όρος «αντοχή σε διάτμηση» μπορεί να αναφέρεται είτε στην τιμή της τάσης στην έναρξη της πλαστικής περιοχής της διάτμησης, είτε στη συνολικά μέγιστη τιμή της τάσης σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Κι αυτό το σημείο διευκρινίζεται παρακάτω.

γ. Όσον αφορά τα πειράματα εφελκυσμού, ο κατασκευαστής δε δίνει κάποιο στοιχείο όσον αφορά τα επίπεδα παραμόρφωσης στα οποία επέρχεται η καταστροφική ψαθυρή αστοχία του αφρού. Περισσότερα θα αναλυθούν παρακάτω.

Στους Πίνακες που ακολουθούν πραγματοποιείται μια συνοπτική σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα παρεχόμενα από τον κατασκευαστή των αφρών C70.55, C70.75 και C70.90.

Πίνακας 3.4: Συγκριτικές ιδιότητες αφρού C70.55.

<b>C70.55 PVC foam</b>	<b>Berthelot [34]</b>	<b>[7]</b>
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	27	69
Αντοχή σε θλίψη (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	-	0.9
Θλιπτική τάση στην έναρξη της πλαστικής περιοχής (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	0.87	-
Θλιπτική τάση στο τέλος της πλαστικής περιοχής (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	0.92	-
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	20	52
Αντοχή σε θλίψη (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	-	0.5
Θλιπτική τάση στην έναρξη της πλαστικής περιοχής (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	0.68	-
Θλιπτική τάση στο τέλος της πλαστικής περιοχής (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	0.70	-
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	45	45
Αντοχή σε εφελκυσμό (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	1.55	1.3
Μέτρο διάτμησης (επίπεδα ca, cb) (MPa)	22	22
Αντοχή σε διάτμηση (επίπεδα ca, cb) (MPa)	0.8	0.9

Πίνακας 3.5: Συγκριτικές ιδιότητες αφρού C70.75.

<b>C70.75 PVC foam</b>	<b>Berthelot [34]</b>	<b>[7]</b>
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	42	104
Αντοχή σε θλίψη (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	-	1.45
Θλιπτική τάση στην έναρξη της πλαστικής περιοχής (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	1.23	-
Θλιπτική τάση στο τέλος της πλαστικής περιοχής (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	1.30	-
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	23	78
Αντοχή σε θλίψη (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	-	0.8
Θλιπτική τάση στην έναρξη της πλαστικής περιοχής (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	0.88	-
Θλιπτική τάση στο τέλος της πλαστικής περιοχής (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	0.9	-
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	63	66
Αντοχή σε εφελκυσμό (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	1.99	2
Μέτρο διάτμησης (επίπεδα ca, cb) (MPa)	30	30
Αντοχή σε διάτμηση (επίπεδα ca, cb) (MPa)	1.1	1.2

Πίνακας 3.6: Συγκριτικές ιδιότητες αφρού C70.90.

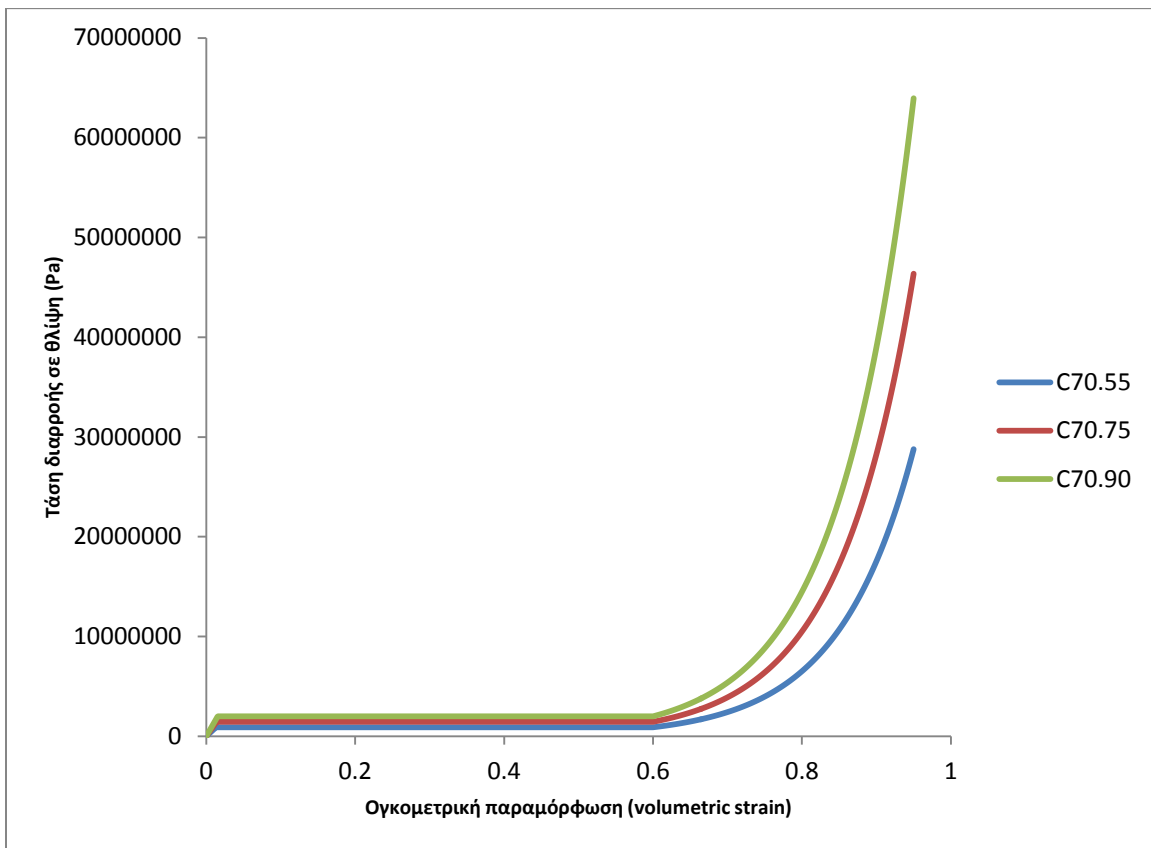
<b>C70.90 foam</b>	<b>Kelly [36]</b>	<b>[7]</b>
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	88	130
Αντοχή σε θλίψη (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	-	2
Αντοχή κατάρρευσης σε θλίψη (crushing strength) (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	2.01	-
Αντοχή σε θλίψη στο τέλος της πλαστικής περιοχής (plateau stress) (κατά το πάχος – c άξονας) (MPa)	2.41	-
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	71	84
Αντοχή σε εφελκυσμό (στο επίπεδο – a, b άξονες) (MPa)	2	2.7

Ακολούθως κατασκευάζονται τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων που εισάγονται στον κώδικα του LS-DYNA® στα πλαίσια ορισμού του μοντέλου υλικού MAT\_HONEYCOMB.

**α. Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης σε θλίψη κατά τον άξονα c (κατά το πάχος των στρωμάτων αφρού – through thickness)**

Τα διαγράμματα θα αποτελούνται από τρία τμήματα:

- Αρχικό γραμμικό τμήμα, με μέτρο ελαστικότητας αυτό που δίνεται από τον κατασκευαστή, μέχρι την τιμή της τάσης που ορίζεται από τον κατασκευαστή ως «αντοχή σε θλίψη» (compressive strength).
- Πλαστικό τμήμα, αμέσως μετά το γραμμικό, με την τάση να παραμένει σταθερή στην τιμή της αντοχής σε θλίψη, μέχρι μια τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης 60%, η οποία καθορίζει το τέλος της πλαστικής περιοχής.
- Τμήμα «συμπύκνωσης» του αφρού, όπου η τάση αυξάνεται απότομα συναρτήσει της παραμόρφωσης μέχρι πολύ μεγάλες παραμορφώσεις της τάξης του 95%+.

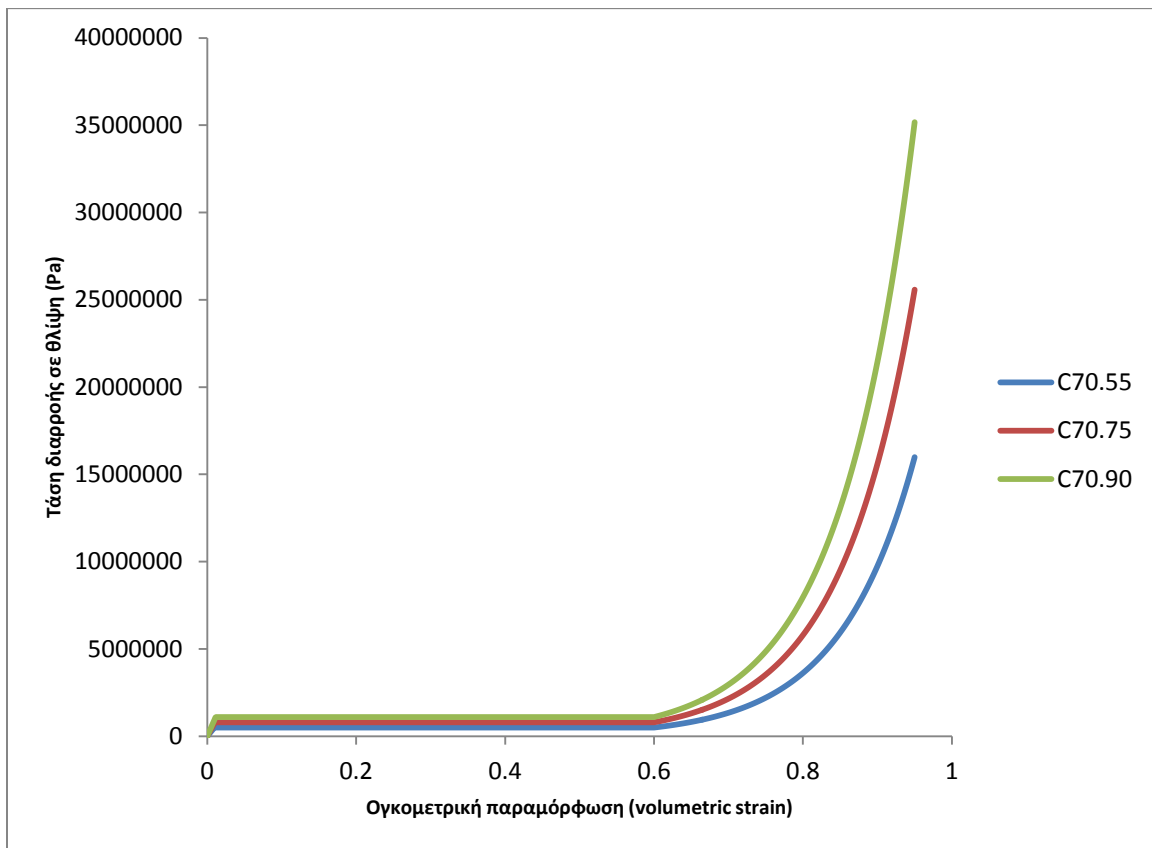


Σχήμα 3.14: Διαγράμματα θλιπτικής τάσης διαρροής κατά τον άξονα c των αφρών.

**β. Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης σε θλίψη κατά τους άξονες a και b (στο επίπεδο των στρωμάτων αφρού – in plane)**

Τα διαγράμματα θα αποτελούνται από τρία τμήματα:

- Αρχικό γραμμικό τμήμα, με μέτρο ελαστικότητας αυτό που δίνεται από τον κατασκευαστή, μέχρι την τιμή της τάσης που ορίζεται από τον κατασκευαστή ως «αντοχή σε θλίψη» (compressive strength).
- Πλαστικό τμήμα, αμέσως μετά το γραμμικό, με την τάση να παραμένει σταθερή στην τιμή της αντοχής σε θλίψη, μέχρι μια τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης 45%, η οποία καθορίζει το τέλος της πλαστικής περιοχής.
- Τμήμα «συμπύκνωσης» του αφρού, όπου η τάση αυξάνεται απότομα συναρτήσει της παραμόρφωσης μέχρι πολύ μεγάλες παραμορφώσεις της τάξης του 95%+.

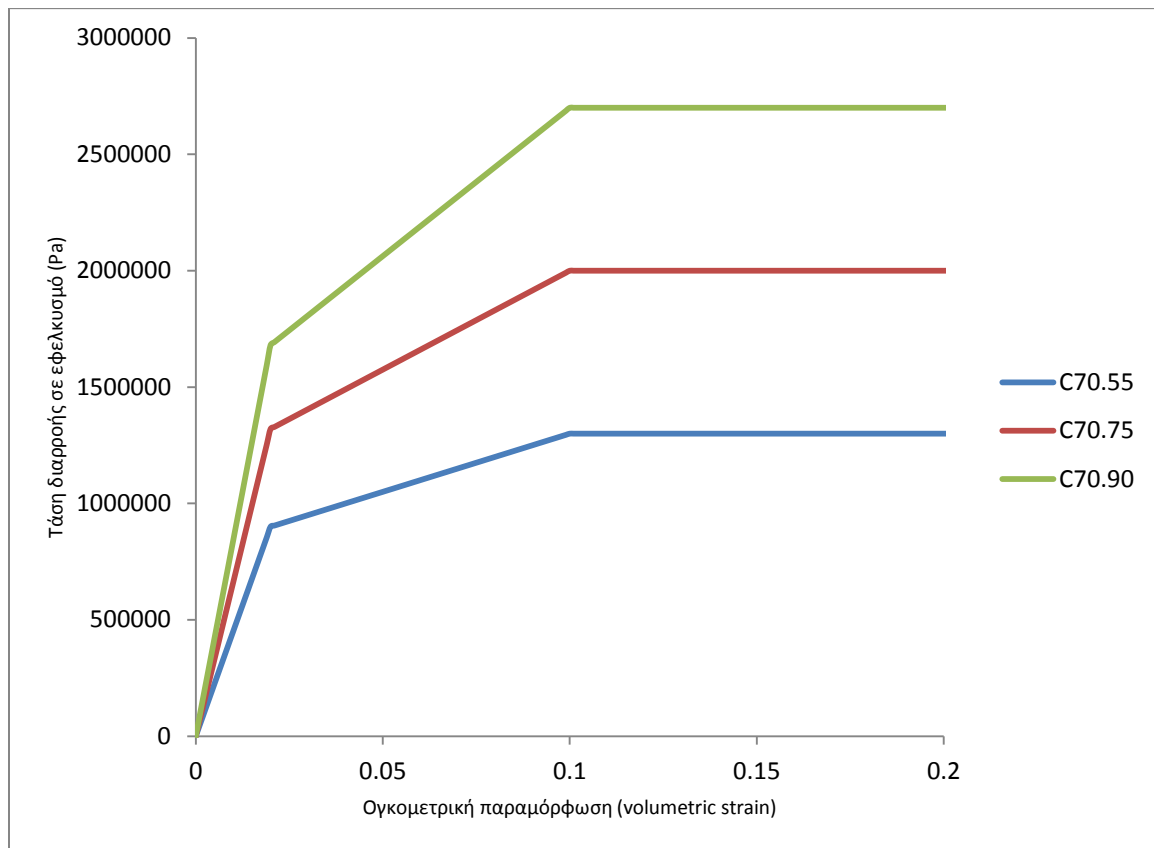


Σχήμα 3.15: Διαγράμματα θλιπτικής τάσης διαρροής των αφρών κατά τους άξονες a, b.

**γ. Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης σε εφελκυσμό κατά τον άξονα c (κατά το πάχος των στρωμάτων αφρού – through thickness)**

Τα διαγράμματα θα αποτελούνται από τρία τμήματα:

- Αρχικό γραμμικό τμήμα, με μέτρο ελαστικότητας αυτό που δίνεται από τον κατασκευαστή, μέχρι μια τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης 2%.
- Δεύτερο γραμμικό τμήμα, μέχρι ένα σημείο που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 10% και εφελκυστική τάση ίση με την τιμή εφελκυστικής αντοχής που δίδεται από τον κατασκευαστή.
- Τρίτο γραμμικό τμήμα, απολύτως πλαστικό μέχρι παραμόρφωση 100%. Παρ' όλο που τα επίπεδα αστοχίας σε εφελκυσμό είναι της τάξης του 10%, αν απαιτηθεί, θα μοντελοποιηθεί αστοχία σε εφελκυσμό με την υιοθέτηση κριτηρίου αστοχίας.

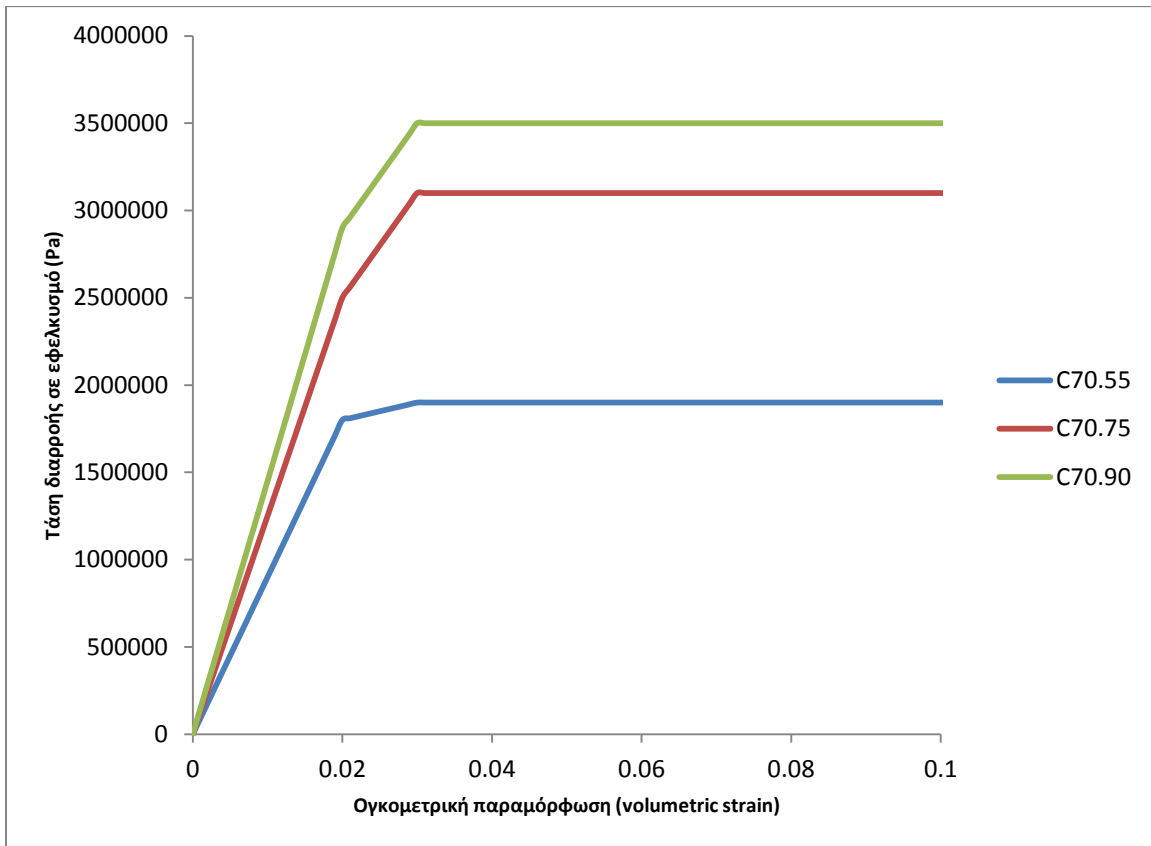


Σχήμα 3.16: Διαγράμματα εφελκυστικής τάσης διαρροής των αφρών κατά τον άξονα c.

**δ. Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης σε εφελκυσμό κατά τους άξονες a και b (στο επίπεδο των στρωμάτων αφρού – in plane)**

Τα διαγράμματα θα αποτελούνται από τρία τμήματα:

- Αρχικό γραμμικό τμήμα, με μέτρο ελαστικότητας αυτό που δίνεται από τον κατασκευαστή, μέχρι μια τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης 2%.
- Δεύτερο γραμμικό τμήμα, μέχρι ένα σημείο που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 2% και εφελκυστική τάση ίση με την τιμή εφελκυστικής αντοχής που δίδεται από τον κατασκευαστή.
- Τρίτο γραμμικό τμήμα, απολύτως πλαστικό μέχρι παραμόρφωση 100%. Παρ' όλο που τα επίπεδα αστοχίας σε εφελκυσμό είναι της τάξης του 2%, αν απαιτηθεί, θα μοντελοποιηθεί αστοχία σε εφελκυσμό με την υιοθέτηση κριτηρίου αστοχίας.

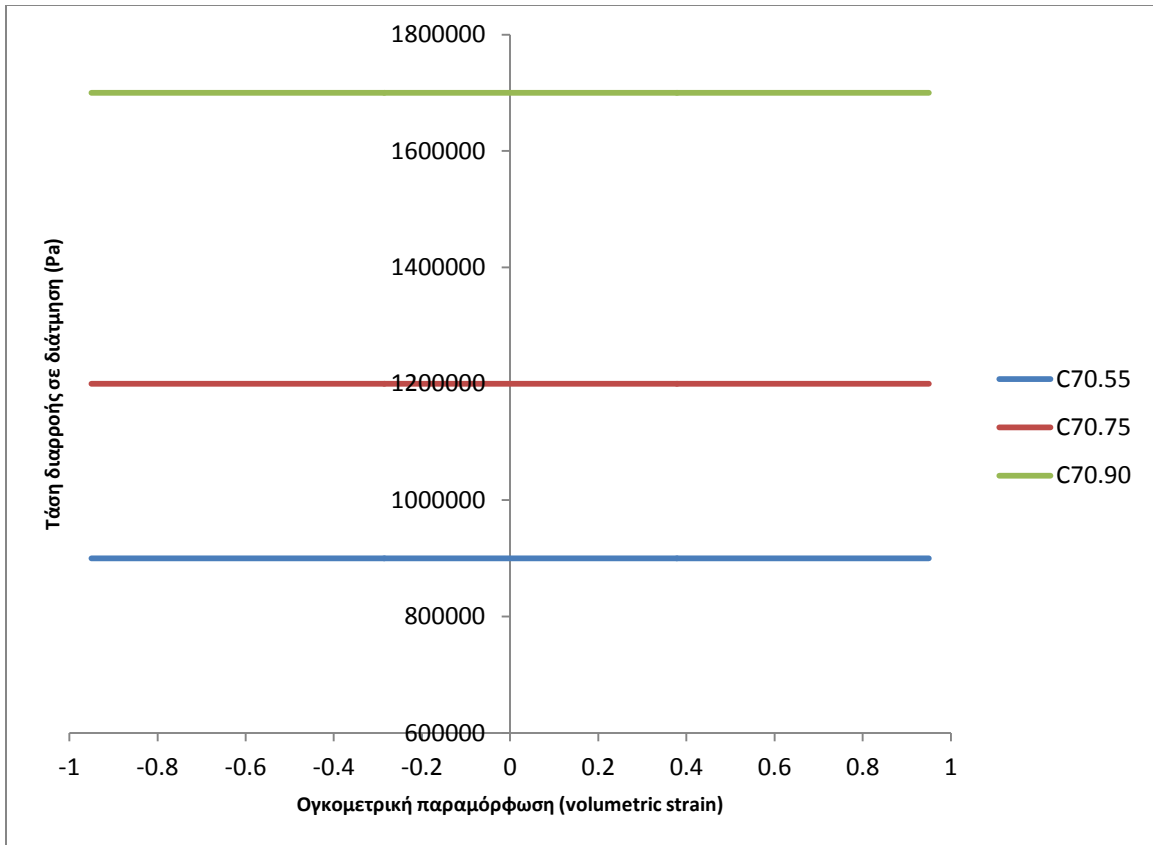


Σχήμα 3.17: Διαγράμματα εφελκυστικής τάσης διαρροής των αφρών κατά τους άξονες a, b.

**ε. Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης σε διάτμηση στο επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες  $c - a$  και  $c - b$**

Στην περίπτωση του πειράματος διάτμησης, είναι αληθές ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις δεν παράγουν παρά μόνο αμελητέες ογκομετρικές παραμορφώσεις, οπότε θα μπορούσε να υπάρχει μια κάποια δυσχέρεια στην ενσωμάτωση των συγκεκριμένων διαγραμμάτων στον κώδικα του LS-DYNA. Αν ωστόσο χωριστεί το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης στην περίπτωση της διάτμησης σε δύο τμήματα, ένα αρχικό γραμμικό και ένα πλαστικό, το οποίο θα ξεκινά σε τάση ίση με την αντοχή σε διάτμηση, τότε ουσιαστικά σημαίνει ότι τα ανώτατα επίπεδα τάσης που μπορεί να φτάσει το διάγραμμα σε κάθε στιγμή ισούνται με την αντοχή σε θλίψη. Επομένως, το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης θα εισαχθεί στον κώδικα του LS-DYNA ως τελείως πλαστικό (ουσιαστικά μια ευθεία γραμμή σε όλο το εύρος τιμών). Επίσης, υπενθυμίζεται ότι στα πειραματικά αποτελέσματα, υπήρχε ένα επίπεδο διατμητικής παραμόρφωσης στο οποίο επερχόταν θραύση του αφρού. Ωστόσο, η διατμητική αυτή παραμόρφωση αφορά πολύ συγκεκριμένη περίπτωση φόρτισης. Εδώ, που μελετώνται καμπτικές φορτίσεις που παράγουν πολύ πιο σύνθετους συνδυασμούς τάσεων, δεν είναι δόκιμο να κόπτεται το διάγραμμα στην τιμή διατμητικής παραμόρφωσης του πειράματος, γιατί δεν θα ανταποκρίνεται στα πειραματικά αποτελέσματα της κάμψης. Η καταστροφική αστοχία λόγω διάτμησης θα δειχθεί αργότερα πώς θα αντιμετωπιστεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Για το λόγο αυτό, το διάγραμμα που εισάγεται στο LS-DYNA© θα διατηρεί την τάση σταθερή από 0% μέχρι την τιμή ογκομετρικής μεταβολής 100%.

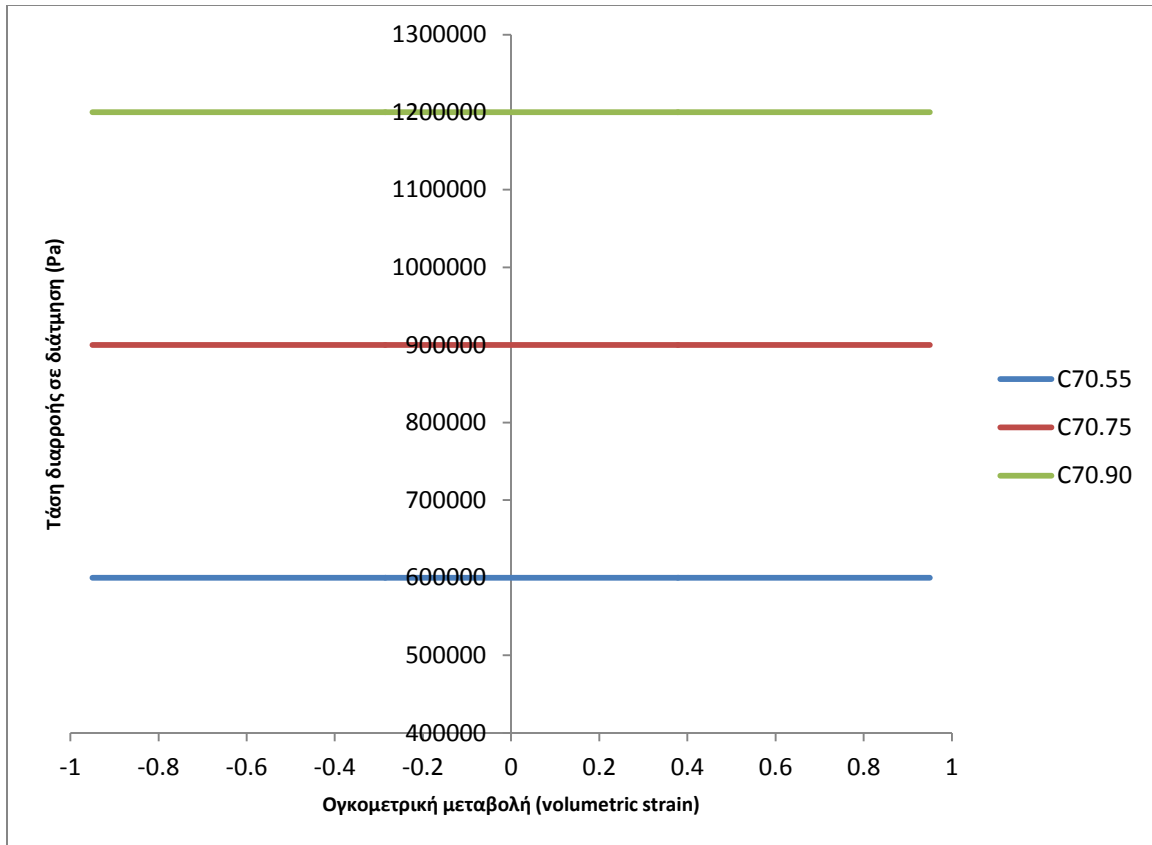




Σχήμα 3.18: Διαγράμματα διατμητικής τάσης διαρροής των αφρών στα επίπεδα *ca* και *cb*.

#### στ. Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης σε διάτμηση στο επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες *b – a*

Δεν ισχύει κάτι διαφορετικό στην περίπτωση σε σχέση με πριν, και οι υποθέσεις που έγιναν εφαρμόζονται και εδώ. Δεν έχει ιδιαίτερο νόημα η αναφορά στο χειρισμό της θραύσης λόγω διάτμησης, διότι η κάμψη που μελετάται στην εργασία δεν παράγει αστοχία λόγω διάτμησης στο επίπεδο αυτό. Οπότε το διάγραμμα που θα εισαχθεί στον κώδικα του LS-DYNA® θα είναι μια ευθεία γραμμή σε τάση ίση με την αντοχή σε διάτμηση και για ογκομετρική παραμόρφωση από 0 έως 100%.



Σχήμα 3.19: Διαγράμματα διατμητικής τάσης διαρροής των αφρών στο επίπεδο *ab*.

### 3.2.6 Μοντέλο υλικού κυλίνδρων στήριξης & κυλίνδρου φόρτισης – MAT\_20 (MAT\_RIGID)

Η φυσική του προβλήματος κάμψης που εξετάζεται είναι τέτοια που οι κύλινδροι στήριξης και φόρτισης της πειραματικής διάταξης, εάν συγκριθούν με τις κατασκευές sandwich που φορτίζονται, θεωρούνται ως απαραμόρφωτοι (rigid bodies). Στα πλαίσια του λογισμικού του LS-DYN®, για περιπτώσεις σωμάτων τα οποία θεωρούνται απαραμόρφωτα, απαιτείται η χρήση του μοντέλου υλικού MAT\_20 (MAT\_RIGID). Παρά το γεγονός ότι το σώμα είναι απαραμόρφωτο, για λόγους που σχετίζονται με την ευστάθεια του προβλήματος τρεις παράμετροι απαιτούνται να καθοριστούν:

- Πυκνότητα υλικού ( $\rho$ )
- Μέτρο ελαστικότητας ( $E$ )
- Λόγος Poisson ( $\nu$ )

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θεωρήθηκε ότι οι κύλινδροι διέθεταν τις ιδιότητες ενός τυπικού χάλυβα, και επομένως οι ανωτέρω τιμές ορίστηκαν σε  $7800 \text{ kg/m}^3$ ,  $200 \text{ GPa}$  και λόγος Poisson  $0.3$ .

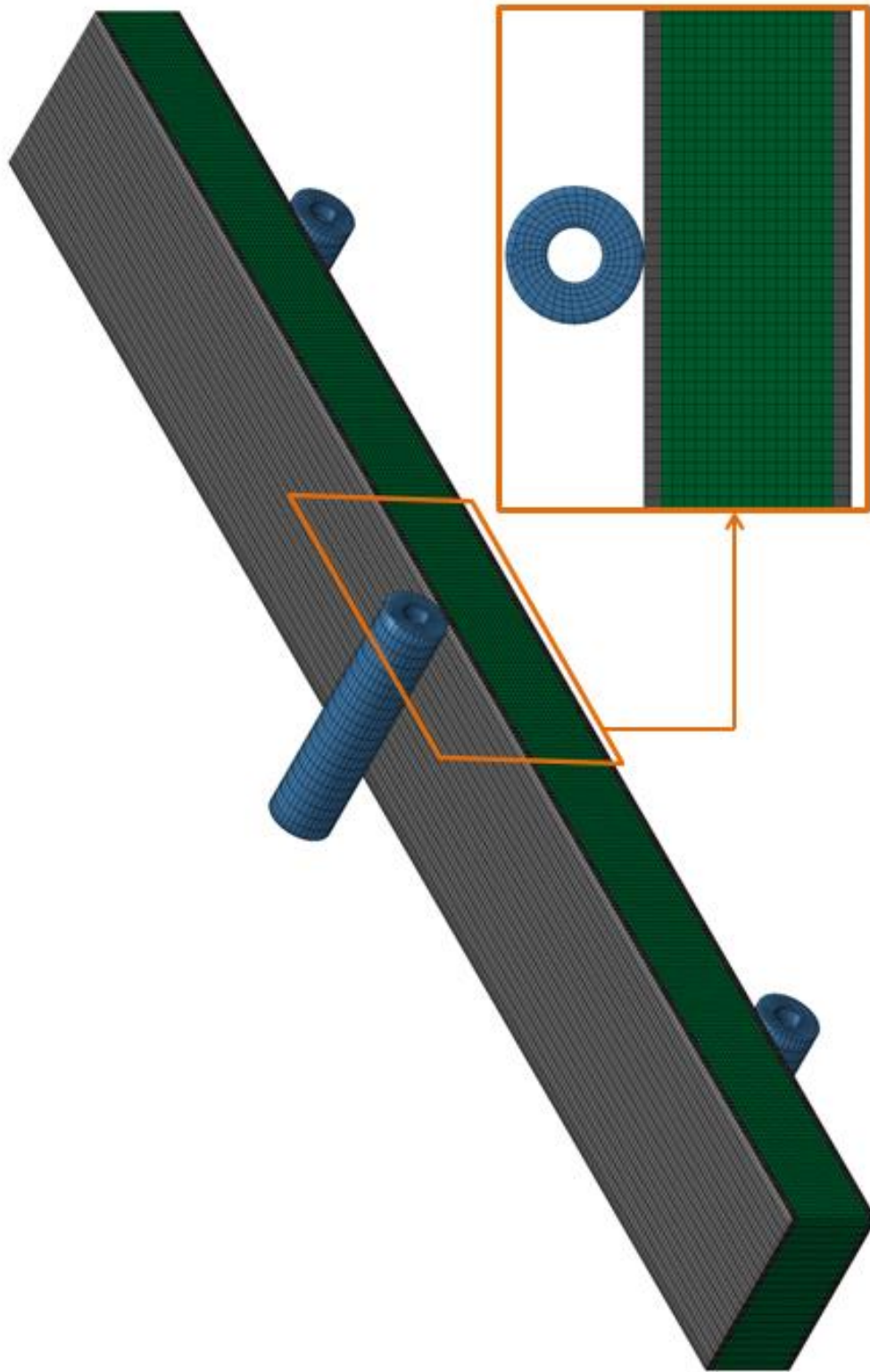
### 3.2.7 Διακριτοποίηση

Όπως προαναφέρθηκε, για όλα τα επιμέρους σώματα που συνθέτουν το αριθμητικό μοντέλο (ενισχυτικές πλάκες, στρώματα αφρού, κύλινδροι στήριξης – φόρτισης), χρησιμοποιήθηκαν ορθογώνια παραλληλεπίπεδα στερεά στοιχεία για τη μοντελοποίησή τους. Ζήτημα αποτελεί η κατάλληλη διακριτοποίηση των δομικών αυτών συστατικών ώστε να επιτευχθεί με το βέλτιστο τρόπο η συσχέτιση με τα πειραματικά δεδομένα. Κοινή πρακτική για την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος στοιχείων (επίπεδο πυκνότητας) αποτελεί η επαναλαμβανόμενη δοκιμή διαφόρων επιπέδων πυκνότητας πλέγματος και η παρακολούθηση της σύγκλισης αυτών, ώστε να επιλεγεί τελικά μια εξ αυτών των πυκνοτήτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αριθμητικών μοντέλων, η πρακτική αυτή εφαρμόστηκε μόνο σε πολύ προκαταρκτικό επίπεδο, στις αρχικές δοκιμές της λειτουργικότητας των αριθμητικών μοντέλων, κάτι το οποίο δεν παρουσιάζεται εδώ. Εν τέλει, ο τρόπος που επιλέχθηκε για την διακριτοποίηση των επιμέρους συστατικών ήταν ο εξής:

- **Ενισχυτικές πλάκες:** διακριτοποίηση κάθε μιας εκ των έξι (6) στρώσεων ανά ενισχυτική πλάκα με ένα (1) στοιχείο κατά το πάχος (πάχος στοιχείου 0.25 mm), δεκαεννέα (19) στοιχεία κατά το πλάτος (πλάτος ~1 mm/στοιχείο) και τριακόσια (300) στοιχεία κατά το μήκος (μήκος 1 mm/ στοιχείο). Με τον τρόπο αυτό, η διακριτοποίηση οδηγεί σε έναν αριθμό 34200 στοιχείων/ενισχυτική πλάκα (συνολικά 68400 στοιχεία για τις 2 ενισχυτικές πλάκες).
- **Στρώματα αφρού:** διακριτοποίηση του καθενός εκ των τριών (3) στρωμάτων αφρού με πέντε (5) στοιχεία κατά το πάχος (πάχος 1 mm/στοιχείο), δεκαεννέα (19) στοιχεία κατά το πλάτος (πλάτος ~1 mm/στοιχείο) και τριακόσια (300) στοιχεία κατά το μήκος (μήκος 1 mm/στοιχείο). Με τον τρόπο αυτό, η διακριτοποίηση οδηγεί σε έναν αριθμό 28500 στοιχείων/στρώμα αφρού (συνολικά 85500 στοιχεία για τα 3 στρώματα αφρού).

Με τον ανωτέρω τρόπο διακριτοποίησης, η δοκός sandwich διακριτοποιείται συνολικά με 119700 στοιχεία σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου. Όσον αφορά τους τρεις (3) κυλίνδρους (2 στήριξης και 1 φόρτισης), οι οποίοι έχουν μοντελοποιηθεί ως απαραμόρφωτοι, δεν απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή του πλέγματος στοιχείων τους, αρκεί να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να απεικονίσει επαρκώς τη γεωμετρία τους με ικανοποιητικό τρόπο. Η διακριτοποίησή των κυλίνδρων έγινε με εξαεδρικής γεωμετρίας στερεά στοιχεία, 15700 ανά κύλινδρο.

Στο Σχήμα 3.20 αποτυπώνεται ο τρόπος διακριτοποίησης του συστήματος δοκού sandwich – κυλίνδρων.



Σχήμα 3.20: Διακριτοποίηση του συστήματος δοκού sandwich – κυλίνδρων στήριξης και φόρτισης.

### 3.2.8 Συνένωση των επιμέρους συστατικών των sandwich κατασκευών

Στην κατασκευή της γεωμετρίας των sandwich κατασκευών που μελετώνται, οι έξι (6) στρώσεις της κάθε ενισχυτικής πλάκας και τα τρία (3) στρώματα αφρού στον πυρήνα σχεδιάζονται ξεχωριστά, ως ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. Αυτό που απαιτείται είναι η ένωσή τους ώστε να σχηματίσουν την τελική sandwich κατασκευή. Σε πειραματικό επίπεδο, η μελέτη των Kaboglu et al [6] δεν έδειξε ότι εμφανίστηκε κάποιου είδους αστοχία στην ένωση μεταξύ των επιμέρους συστατικών στοιχείων της κατασκευής υπό μορφήν κάποιου είδους αποκόλλησης (delamination). Ακόμα και η καταστροφική αστοχία στον πυρήνα, σε μία εκ των διαβαθμισμένων (graded) διαμορφώσεων, συνέβη στον ίδιο τον αφρό και δεν ήταν αστοχία στη συγκόλληση μεταξύ γειτονικών στρωμάτων αφρού. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε η ένωση μεταξύ των έξι (6) στρώσεων της άνω ενισχυτικής πλάκας, των τριών (3) στρωμάτων αφρού του πυρήνα και των έξι (6) στρώσεων αφρού της κάτω ενισχυτικής πλάκας να μοντελοποιηθεί ως πλήρως στιβαρή (bonded). Σε αυτό το πλαίσιο, είναι αληθές ότι δεν απαιτείται η υιοθέτηση κάποιας συγκεκριμένης τεχνικής, π.χ. εφαρμογής συνθηκών επαφής μεταξύ γειτονικών δομικών συστατικών. Αυτό που εφαρμόζεται, είναι η επιλογή, κατά τη διάρκεια της διακριτοποίησης, κοινών κόμβων στα σημεία ένωσης των επιμέρους δομικών συστατικών. Με τον τρόπο αυτό μοντελοποιείται αποτελεσματικά η πλήρως στιβαρή (bonded) ένωση, χωρίς να υπάρχει απαίτηση για επιπλέον επιβάρυνση του υπολογιστικού μοντέλου με ορισμούς συνθηκών επαφής οι οποίοι θα αύξαναν τον όγκο των υπολογισμών.

## 3.3 Φόρτιση - Επίλυση

### 3.3.1 Φόρτιση μέσω ορισμού επαφών

Όπως είναι απολύτως σαφές από το πείραμα των Kaboglu et al [6], η φόρτιση των δοκιμίων σε κάμψη πραγματοποιείται μέσω του συστήματος των δύο ακίνητων κυλίνδρων στήριξης και του κινούμενου κυλίνδρου φόρτισης. Συγκεκριμένα, το φορτίο επιβάλλεται μέσω του κατακόρυφα κινούμενου κυλίνδρου, και η δοκός στηρίζεται στους δύο ακίνητους κυλίνδρους. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να οριστεί ο τρόπος αλληλεπίδρασης των κυλίνδρων αυτών με τα δοκίμια. Η αλληλεπίδραση αυτή ορίζεται μέσω της εδραίωσης συνθηκών επαφής ως εξής:

- Επαφή ανάμεσα στους ακίνητους κυλίνδρους και την κάτω στρώση συνθέτου της κάτω ενισχυτικής πλάκας

- Επαφή ανάμεσα στον κινούμενο κύλινδρο και την επάνω στρώση συνθέτου της επάνω ενισχυτικής πλάκας

Κατά τον ορισμό μίας επαφής ανάμεσα σε δύο στερεά σώματα, όπως απαιτείται και εδώ, είναι αναγκαίο το ένα να οριστεί ως πρωτεύον (master) και το άλλο ως δευτερεύον (slave). Πρωτεύον λέγεται το σώμα που προκαλεί τη «διάτρηση», προσπαθεί να διαπεράσει δηλαδή το άλλο, και δευτερεύον αυτό που λειτουργεί ως στόχος και δέχεται τη διάτρηση. Στο περιβάλλον του LS-DYNA® διατίθεται ένας αριθμός από τύπους επαφής, οι οποίοι ορίζουν διαφορετικές συνθήκες επαφής ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε προσομοίωσης.

Όταν οι συνθήκες επαφής τίθενται ανάμεσα σε ένα παραμορφώσιμο (deformable) σώμα και ένα θεωρούμενο ως απαραμόρφωτο (rigid) βάσει του προβλήματος που εξετάζεται, τότε πρωτεύον σώμα λαμβάνεται πάντα το απαραμόρφωτο σώμα και ως δευτερεύον το παραμορφώσιμο. Στις περιπτώσεις που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, οι κύλινδροι, είτε οι σταθεροί είτε ο κινούμενος, λαμβάνονται ως απαραμόρφωτοι, οπότε λειτουργούν πάντοτε ως τα πρωτεύοντα σώματα στις συνθήκες επαφών που τίθενται. Στο λογισμικό του LS-DYNA®, η συμπεριφορά μιας επαφής αναπαρίσταται εσωτερικά με γραμμικά ελατήρια ανάμεσα στους κόμβους του δευτερεύοντος σώματος (slave nodes) και στις επιφάνειες του πρωτεύοντος σώματος (master segments). Σε κάθε χρονικό βήμα, ο αλγόριθμος του LS-DYNA® πραγματοποιεί αναζήτηση για κόμβους του δευτερεύοντος σώματος οι οποίοι έχουν διαπεράσει επιφάνειες του πρωτεύοντος σώματος (ο αγγλικός όρος του φαινομένου αυτού είναι interpenetration). Όταν υπάρξει εύρεση τέτοιου φαινομένου, τότε εφαρμόζονται κατάλληλες δυνάμεις στους κόμβους του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος σώματος οι οποίοι εμπλέκονται στο φαινόμενο του interpenetration, ώστε να αποκατασταθούν οι συνθήκες επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων και στο τέλος του χρονικού βήματος να μην υπάρχουν κόμβοι του ενός σώματος που να διαπερνούν το άλλο. Οι δυνάμεις αυτές είναι ανάλογες της σταθεράς του ελατηρίου με το οποίο αναπαρίστανται οι κόμβοι, όπως προαναφέρθηκε. Είναι αληθές ότι η μηχανική των επαφών είναι ένα τεράστιο τμήμα της μηχανικής των υλικών, και η ανάλυση των μεθόδων της, είτε πρόκειται για αναλυτικές είτε για αριθμητικές, είναι πέρα από τους σκοπούς αυτής της εργασίας. Ακόμα και στο περιβάλλον του LS-DYNA®, ο ορισμός τους περιλαμβάνει ένα τεράστιο αριθμό παραμέτρων, κάποιες εκ των οποίων είναι υπολογιστέες ενώ κάποιες άλλες είναι ρυθμίσιμες με δοκιμή και λάθος ανάλογα με το πρόβλημα που επιλύεται. Δεν θα αναλωθεί χώρος λοιπόν για την ανάλυση θεωρίας μηχανικής των επαφών ούτε για την περιγραφή των πολλών παραμέτρων που απαιτούνται για την εδραίωση συνθηκών επαφής εντός του αριθμητικού μοντέλου. Για την κατανόηση του τρόπου επιβολής συνθηκών επαφής στο λογισμικό του LS-DYNA®, ο αναγνώστης

παραπέμπεται τόσο στο εγχειρίδιο θεωρίας του LS-DYNA®, LS-DYNA Theory Manual [14], όσο και στο εγχειρίδιο χρήσης του, LS-DYNA Manual Vol I [38].

Στο παρόν πρόβλημα, ο τύπος επαφής που επιλέγεται από την παλέτα του LS-DYNA® αναφέρεται ως CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE, και ο οποίος αποτελεί συνήθη επιλογή όταν η επιφάνεια του ενός σώματος διαπερνά την επιφάνεια του άλλου, χωρίς ωστόσο να είναι γνωστή η έκταση της επαφής και το ακριβές σημείο που αυτή θα συμβεί. Καλύπτει επομένως αυτή η επιλογή την πιο γενική περίπτωση επαφής μεταξύ δύο σωμάτων.

### 3.3.2 Χρονικό βήμα επίλυσης – Ταχύτητα φόρτισης

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζει το λογισμικό του LS-DYNA® όταν χρησιμοποιείται για την επίλυση στατικών προβλημάτων (δηλαδή προβλημάτων που η φόρτιση εξελίσσεται με πολύ μικρή ταχύτητα) αφορά το μέγεθος του χρονικού βήματος επίλυσης που χρησιμοποιείται, σε σχέση με το συνολικό χρόνο διάρκειας του προβλήματος. Στον αλγόριθμο επίλυσης του LS-DYNA® εκτελούνται συνεχώς υπολογισμοί για τα στοιχεία (elements) του προβλήματος με σκοπό τον προσδιορισμό των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτά, καθώς και των τοπικών τους συντεταγμένων. Οι υπολογισμοί αυτοί εκτελούνται ανά διαστήματα που υπαγορεύονται από το μέγεθος του χρονικού βήματος (time step) που χρησιμοποιείται. Αυτό το χρονικό βήμα που καθορίζει τη συχνότητα επανάληψης των υπολογισμών δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από το σύνολο των στοιχείων και κάθε φορά υπολογίζεται εκ νέου. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε στοιχείο υπολογίζεται ένα κρίσιμο χρονικό βήμα και στη συνέχεια το μικρότερο όλων επιλέγεται για την επίλυση του προβλήματος, αφού πρώτα πολλαπλασιαστεί για λόγους σταθερότητας με έναν συντελεστή ασφαλείας  $\alpha$ . Έτσι, αν ο τελευταίος υπολογισμός εκτελέστηκε τη χρονική στιγμή  $t^n$ , τότε το χρονικό διάστημα που θα μεσολαβήσει μέχρι τον επόμενο υπολογισμό τη χρονική στιγμή  $t^{n+1}$  θα δίνεται από την Εξίσωση 3.43.

$$\Delta t^{n+1} = \alpha \cdot \min\{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N\} \quad (3.43)$$

Όπου  $\Delta t^{n+1}$  είναι το χρονικό βήμα για τη χρονική στιγμή  $t^{n+1}$ ,  $N$  είναι ο αριθμός των στοιχείων του μοντέλου και  $\alpha$  είναι ο συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος είναι μικρότερος της μονάδας και κατά προεπιλογή του LS-DYNA® ισούται με 0.9. (τιμή που χρησιμοποιήθηκε και εδώ). Όπως διεξοδικά αναλύεται στο εγχειρίδιο χρήσης του LS-DYNA®, LS-DYNA Manual Vol I [38], το χρονικό βήμα συνάρτηση των διαστάσεων του στοιχείου, των μηχανικών ιδιοτήτων του (μέτρα ελαστικότητας) καθώς και της πυκνότητάς του. Ένα κοινό εμπόδιο που εμφανίζεται επομένως πολλές φορές σε περιπτώσεις στατικών προβλημάτων όταν γίνεται απόπειρα να μοντελοποιηθούν στο

λογισμικό του LS-DYNA® είναι η ύπαρξη πολύ μικρών χρονικών βημάτων, πόσο μάλλον αν συγκριθούν με το συνολικό χρόνο διάρκειας του προβλήματος (της τάξης των λεπτών πολλές φορές, όπως και στην πειράματα του Κεφαλαίου 2). Έτσι, προκύπτει ένας απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού που πρακτικά είναι ανέφικτος να υλοποιηθεί. Για την υπέρβαση αυτού του εμποδίου, χρησιμοποιείται μια τεχνική που είναι δυνατό να μειώσει τον συνολικό απαιτούμενο χρόνο επίλυσης του προβλήματος. Υπενθυμίζεται ότι στο Κεφάλαιο 2 αναφέρθηκε ότι η ταχύτητα κίνησης του κυλίνδρου φόρτισης των δοκιμών ήταν σταθερή και ίση με 6 mm/min. Στα πλαίσια αυτής της τεχνικής, αντί να επιβληθεί στα πλαίσια του αριθμητικού μοντέλου μια σταθερή ταχύτητα κίνησης στον κύλινδρο φόρτισης, του επιβάλλεται μια ταχύτητα η οποία είναι συνάρτηση του χρόνου, και μεταβάλλεται σύμφωνα με την Εξίσωση 3.44 [9]:

$$v(t) = \frac{\pi}{\pi-2} \frac{d_{max}}{T} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2T}t\right) \right] \quad (3.44)$$

Στην ανωτέρω Εξίσωση με  $d_{max}$  συμβολίζεται η μέγιστη μετατόπιση του κυλίνδρου φόρτισης, και με  $T$  ο συνολικός χρόνος κίνησής του. Η Εξίσωση αυτή παράγει ένα πεδίο ταχυτήτων με μηδενική αρχική επιτάχυνση, οπότε αποτελεί ένα τρόπο για την ομαλή επιβολή του φορτίου μεν, με μεγαλύτερη ταχύτητα από την πειραματική δε, ώστε να ελαττωθεί ο συνολικός χρόνος επίλυσης του προβλήματος και να είναι σε εφικτά πλαίσια. Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε σαν  $d_{max}$  η τιμή των 40 mm και σαν  $T$  η τιμή των 0.5 sec για όλες τις διαμορφώσεις, ασχέτως της τιμής μετατόπισης στην οποία εμφανιζόταν η τελική καταστροφική αστοχία.



## Κεφάλαιο 4: Σύγκριση πειραματικών – αριθμητικών αποτελεσμάτων

Έχοντας ολοκληρώσει στο Κεφάλαιο 3 την ανάπτυξη των αριθμητικών μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων στο περιβάλλον του λογισμικού LS-DYNA®, μέσω και της χρήσης του περιβάλλοντος του λογισμικού ANSYS® ως προεπεξεργαστή, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η σύγκριση των εξαγόμενων αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά αποτελέσματα των Kaboglu et al [6], όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 της εργασίας. Σημειώνεται ότι για την επεξεργασία των εξαγόμενων από τον υπολογιστικό κώδικα του LS-DYNA® αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ως μετα-επεξεργαστής η εφαρμογή LS-DYNA PrePost® Version 4.3.28. Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, για τη μοντελοποίηση των επιμέρους συστατικών των κατασκευών sandwich που μελετώνται στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τρία (3) μοντέλα υλικών από τη βιβλιοθήκη του λογισμικού LS-DYNA®:

- α. Για τη μοντελοποίηση των ενισχυτικών πλακών (skin panels) χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) περιπτώσεις μοντέλων υλικών:
  - Το μοντέλο με τίτλο MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE (ή MAT\_22 βάσει της αρίθμησης στο περιβάλλον του LS-DYNA®)
  - Το μοντέλο με τίτλο MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE (ή MAT\_54 βάσει της αρίθμησης στο περιβάλλον του LS-DYNA®)
- β. Για τη μοντελοποίηση των αφρών PVC που αποτελούν στα συστατικά στοιχεία των πυρήνων των κατασκευών sandwich που εξετάζονται, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο με τίτλο MAT\_HONEYCOMB (ή MAT\_26 βάσει της αρίθμησης στο περιβάλλον του LS-DYNA®).

Εν προκειμένω, δεδομένων των τριών (3) περιπτώσεων μοντέλων υλικών που απαριθμήθηκαν ανωτέρω, τα αριθμητικά αποτελέσματα προέκυψαν σε δύο (2) συνδυασμούς:

- α. Μοντελοποίηση των ενισχυτικών πλακών (skin panels) με χρήση του μοντέλου MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE (MAT\_22) και των αφρών PVC των πυρήνων με χρήση του μοντέλου MAT\_HONEYCOMB (MAT\_26).
- β. Μοντελοποίηση των skin panels με χρήση του μοντέλου MAT\_COMPOSITE\_ENHANCED\_DAMAGE (MAT\_54) και των αφρών PVC των πυρήνων με χρήση του μοντέλου MAT\_HONEYCOMB (MAT\_26).

Σημείωση: Για την ευχερέστερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων που θα ακολουθήσουν, όπου απαιτείται η διευκρίνιση σχετικά με το συνδυασμό των μοντέλων υλικών που εξετάζεται θα χρησιμοποιούνται οι αριθμητικοί συμβολισμοί των μοντέλων (MAT\_22, MAT\_54, MAT\_26).

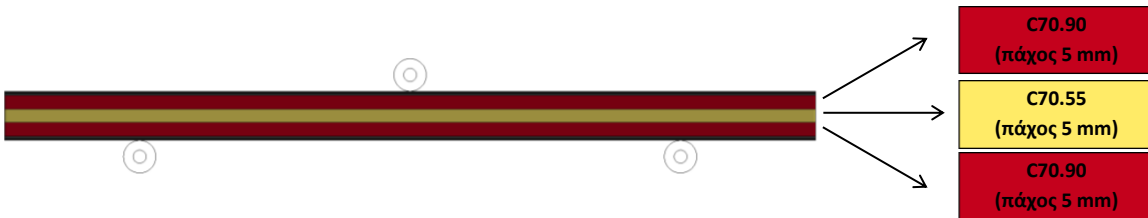
Όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 2 της παρουσίασης των πειραματικών αποτελεσμάτων των Kaboglu et al [6], οι διαφορετικές διαμορφώσεις πυρήνων που εξετάστηκαν, διατηρώντας πάντοτε σταθερές τις ενισχυτικές πλάκες (skin panels), είναι τρεις (3), με στόχο να επιτευχθεί κάθε φορά διαφορετική διαβάθμιση (gradation), από μακροσκοπική άποψη, στον πυρήνα, και να μελετηθούν οι διαφορές στη μηχανική συμπεριφορά των sandwich κατασκευών που παρατηρούνται. Για λόγους διευκόλυνσης, οι τρεις (3) διαφορετικές διαμορφώσεις πυρήνων που εξετάστηκαν αναπαράγονται ακολούθως, μέσω του περιβάλλοντος της εφαρμογής μετα-επεξεργασίας LS-DYNA PrePost©. Αναφέρεται ότι τα χρώματα που χρησιμοποιούνται για τη γραφική απεικόνιση των αφρών PVC των πυρήνων είναι τα εμπορικά χρώματα τους, όπως αναφέρονται από τον κατασκευαστή τους (AirexBaltekBanova©).

- α. **Ομοιογενής διαμόρφωση πυρήνα** (χρήση τριών (3) στρωμάτων αφρού PVC C70.75, πυκνότητας  $80 \text{ kg/m}^3$ )



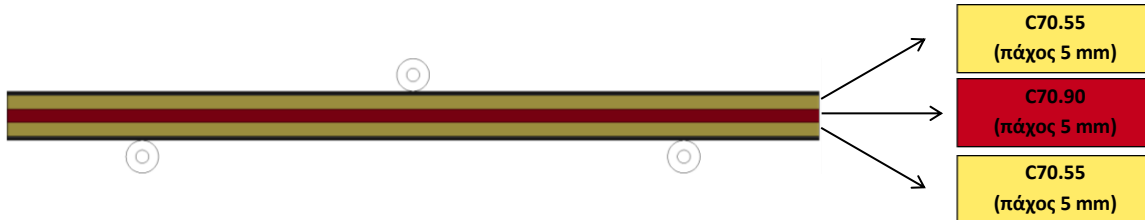
Σχήμα 4.1: Γραφική απεικόνιση της sandwich κατασκευής με ομοιογενή διαμόρφωση πυρήνα [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] ([C70.75/C70.75/C70.75]).

- β. **Διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα** (χρήση δύο (2) στρωμάτων αφρού PVC C70.90 πυκνότητας  $100 \text{ kg/m}^3$  και ενός (1) στρώματος αφρού PVC C70.55 πυκνότητας  $60 \text{ kg/m}^3$ )



Σχήμα 4.2: Γραφική απεικόνιση της sandwich κατασκευής με διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] ([C70.90/C70.55/C70.90]).

- γ. **Διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα** (χρηση δύο (2) στρωμάτων αφρού PVC C70.55 πυκνότητας  $60 \text{ kg/m}^3$  και ενός (1) στρώματος αφρού PVC C70.90 πυκνότητας  $100 \text{ kg/m}^3$ )



Σχήμα 4.3: Γραφική απεικόνιση της sandwich κατασκευής με διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] ([C70.55/C70.90/C70.55]).

Όπως έγινε σαφές στο Κεφάλαιο 2, τα δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα των Kaboglu et al [6] αφορούσαν δύο (2) βασικά στοιχεία της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών sandwich που μελετήθηκαν:

- α. Τον (προσεγγιστικό) υπολογισμό των διατμητικών τάσεων στον πυρήνα της sandwich κατασκευής (core shear stress), ο οποίος πραγματοποιήθηκε βάσει της Εξίσωσης 2.1, η οποία περιλαμβάνεται στο πρότυπο ASTM C393 [8] βάσει του οποίου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα κάμψης τριών (3) σημείων.
- β. Την απεικόνιση της κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων (shear strains) κατά το πάχος των πυρήνων των sandwich κατασκευών, ως προς ένα αρχικό καθολικό σύστημα αναφοράς.

Ως εκ τούτου, βασικά αποτελέσματα που πρέπει να είναι ικανά να παράγουν τα αριθμητικά μοντέλα που αναπτύσσονται στην παρούσα εργασία είναι τα δύο (2) ανωτέρω. Ως προς την πρώτη περίπτωση, αυτή του υπολογισμού της διατμητικής τάσης στον πυρήνα, απαιτείται ένα σχόλιο σχετικά με τον τρόπο σύγκρισης των πειραματικών με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Αρχικά, βάσει της Εξίσωσης 2.1, αποδεικνύεται ότι είναι άμεσα δυνατή η μετατροπή των αποτελεσμάτων των διαγραμμάτων διατμητικής τάσης – μετατόπισης του Σχήματος 2.1 σε διαγράμματα δύναμης (φορτίου) – μετατόπισης. Λόγω της μη γραμμικότητας των αριθμητικών μοντέλων που κατασκευάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, οι κατανομές των διατμητικών τάσεων στους πυρήνες των εξεταζόμενων sandwich κατασκευών δεν είναι γραμμικές, όπως υποθέτει η Εξίσωση 2.1. Από την άλλη, μέσω του λογισμικού μετα-επεξεργασίας LS-DYNA PrePost© είναι άμεσα δυνατή η εξαγωγή των τιμών της δύναμης που εξασκείται από τον κύλινδρο φόρτισης της πειραματικής διάταξης (indentor) στην sandwich κατασκευή. Επομένως, τα διαγράμματα διατμητικής τάσης – μετατόπισης του Σχήματος 2.1 μετατράπηκαν, για τους σκοπούς της σύγκρισης με τα αριθμητικά

αποτελέσματα, σε διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Web Plot Digitizer©, διαθέσιμη ως ελεύθερο λογισμικό (free software) στο Διαδίκτυο.

Επιπρόσθετα, εκτός των ανωτέρω αποτελεσμάτων, τα οποία είναι ο πυρήνας της σύγκρισης με τα πειραματικά, επιπλέον αποτελέσματα εξήχθησαν από τα αριθμητικά μοντέλα, τα οποία θα παρουσιαστούν ακολούθως. Είναι αληθές ότι η ακρίβεια των επιπλέον αριθμητικών αποτελεσμάτων δεν μπορεί να είναι άμεσα επαληθεύσιμη, λόγω της έλλειψης αντίστοιχων πειραματικών αποτελεσμάτων. Παρ' όλ' αυτά, η αξία των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων δεν θεωρείται ότι πρέπει να υποβαθμιστεί, καθώς αποτελούν έναν δείκτη της μηχανικής συμπεριφοράς των υπό εξέταση sandwich κατασκευών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή κάποιων, προκαταρκτικών τουλάχιστον, συμπερασμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα αυτά αφορούν:

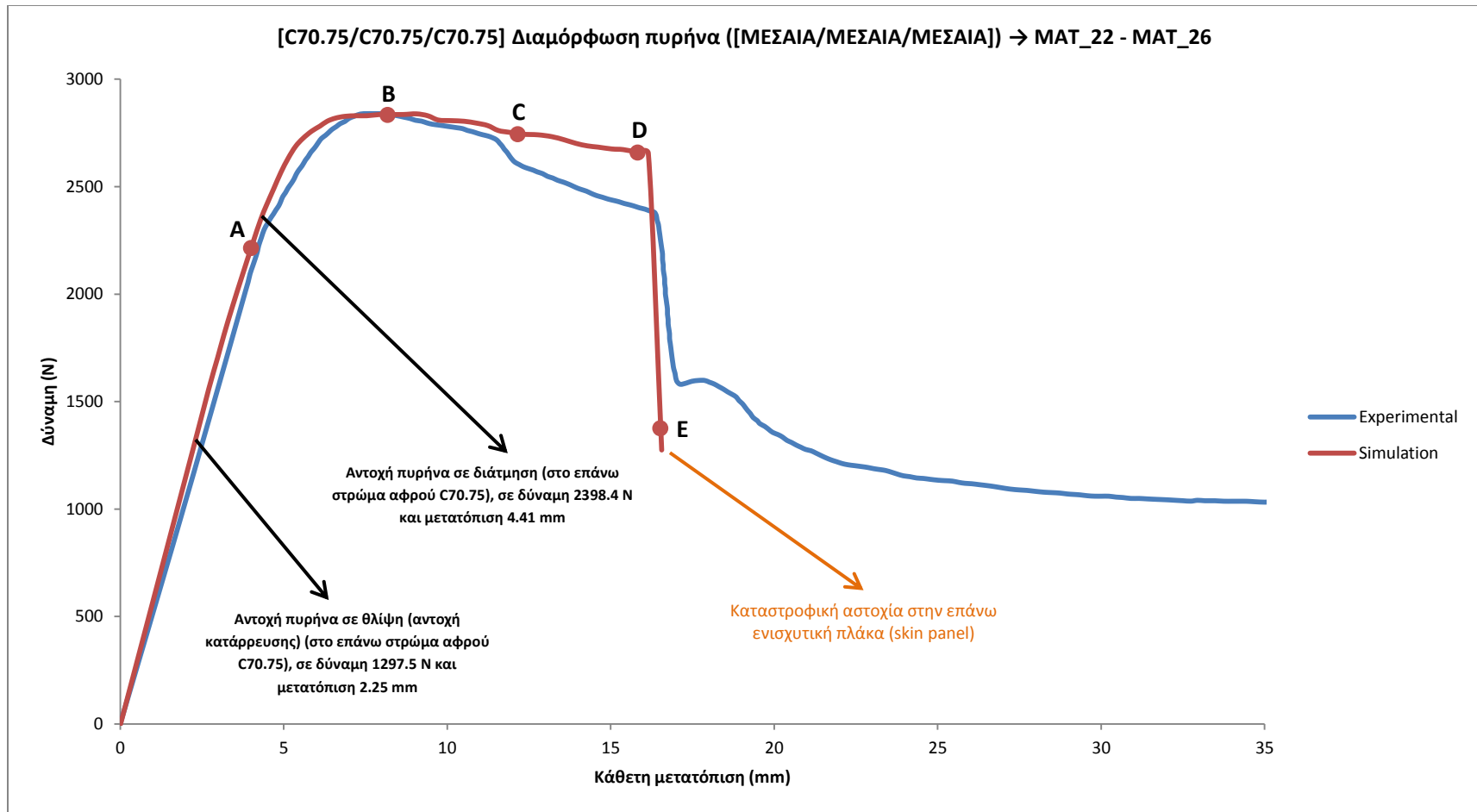
- α. Την παρακολούθηση – ανίχνευση των αρχικών τύπων αστοχίας στις υπό εξέταση sandwich κατασκευές. Εξηγώντας, στην ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων αναφέρθηκε ότι οι κατασκευές sandwich που εξετάζονται εμφανίζουν σαν αρχικές αστοχίες τοπική θλίψη – κατάρρευση του πυρήνα (ακριβέστερος όρος ο αγγλικός "indentation", που εκφράζει την αστοχία σε θλίψη κάτω από συγκεντρωμένα φορτία), καθώς και διατμητική αστοχία (ο αντίστοιχος αγγλικός όρος είναι "shear damage"). Παρατηρώντας ωστόσο τα πειραματικά αποτελέσματα, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι οι αρχικές αυτές αστοχίες εμφανίζονται σχετικά νωρίς στο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης, και η τελική συμπεριφορά της κατασκευής επέρχεται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των δύο αυτών αστοχιών. Επομένως, η σημασία της ανίχνευσης των επιπέδων φορτίου στα οποία πραγματοποιείται η εμφάνιση αυτών των αρχικών αστοχιών βασίζεται στην δυνατότητα του να πραγματοποιείται μια προκαταρκτική αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών (π.χ. για λόγους σχεδίασης).
- β. Την χαρτογράφηση της εξέλιξης, εκτός από τις διατμητικές παραμορφώσεις κατά το πάχος του πυρήνα, όπως έγινε σε πειραματικό επίπεδο, και των θλιπτικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα, μιας και η θλίψη αποτελεί, μαζί με τη διάτμηση, τον κύριο λόγο αστοχίας των κατασκευών sandwich που μελετώνται στη συγκεκριμένη εργασία.

Σημειώσεις:

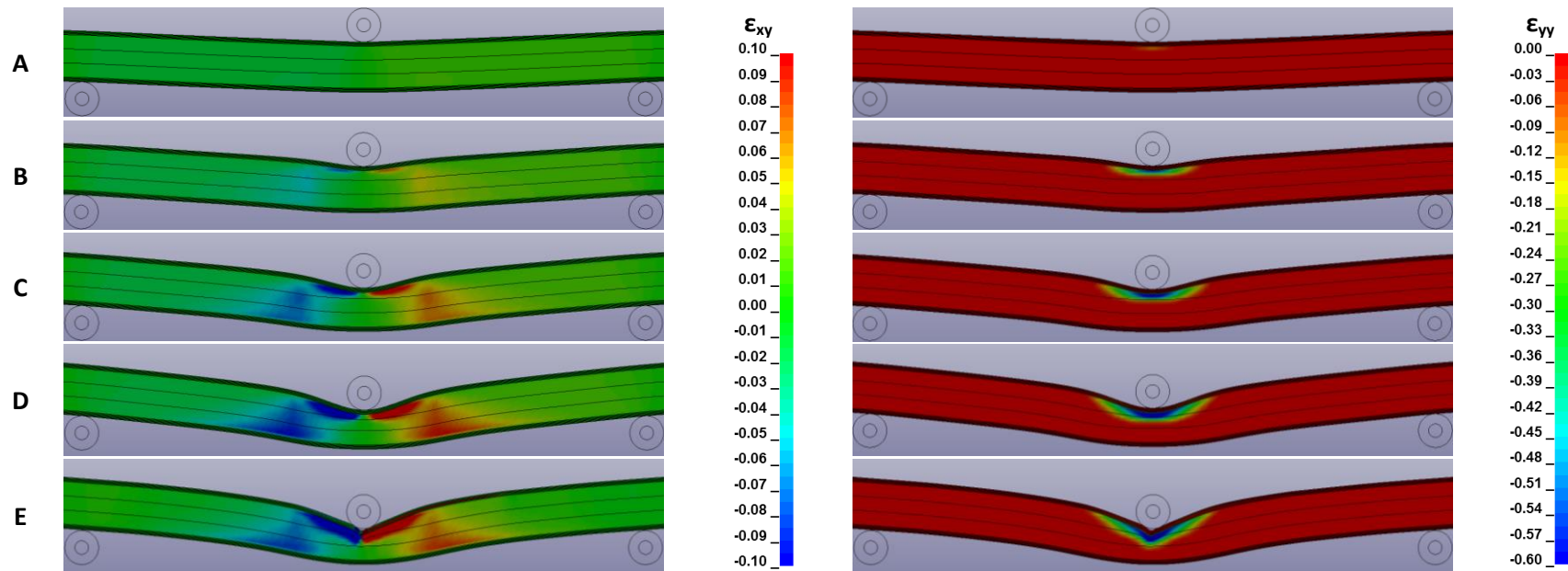
- α. Στα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης που ακολουθούν, επισημαίνονται με βέλη τα σημεία στα οποία εμφανίζεται θλιπτική αστοχία και διατμητική αστοχία

στον πυρήνα συνολικά. Αφορά δηλαδή το πρώτο στρώμα αφρού στο οποίο εμφανίζεται η εκάστοτε αστοχία. Λεπτομέρειες σχετικά με την εμφάνιση αστοχιών στα υπόλοιπα στρώματα αφρού κατά την εξέλιξη της φόρτισης δίνονται συγκεντρωτικά σε επόμενες σελίδες, για όλες τις διαμορφώσεις πυρήνων που εξετάζονται στο κεφάλαιο αυτό.

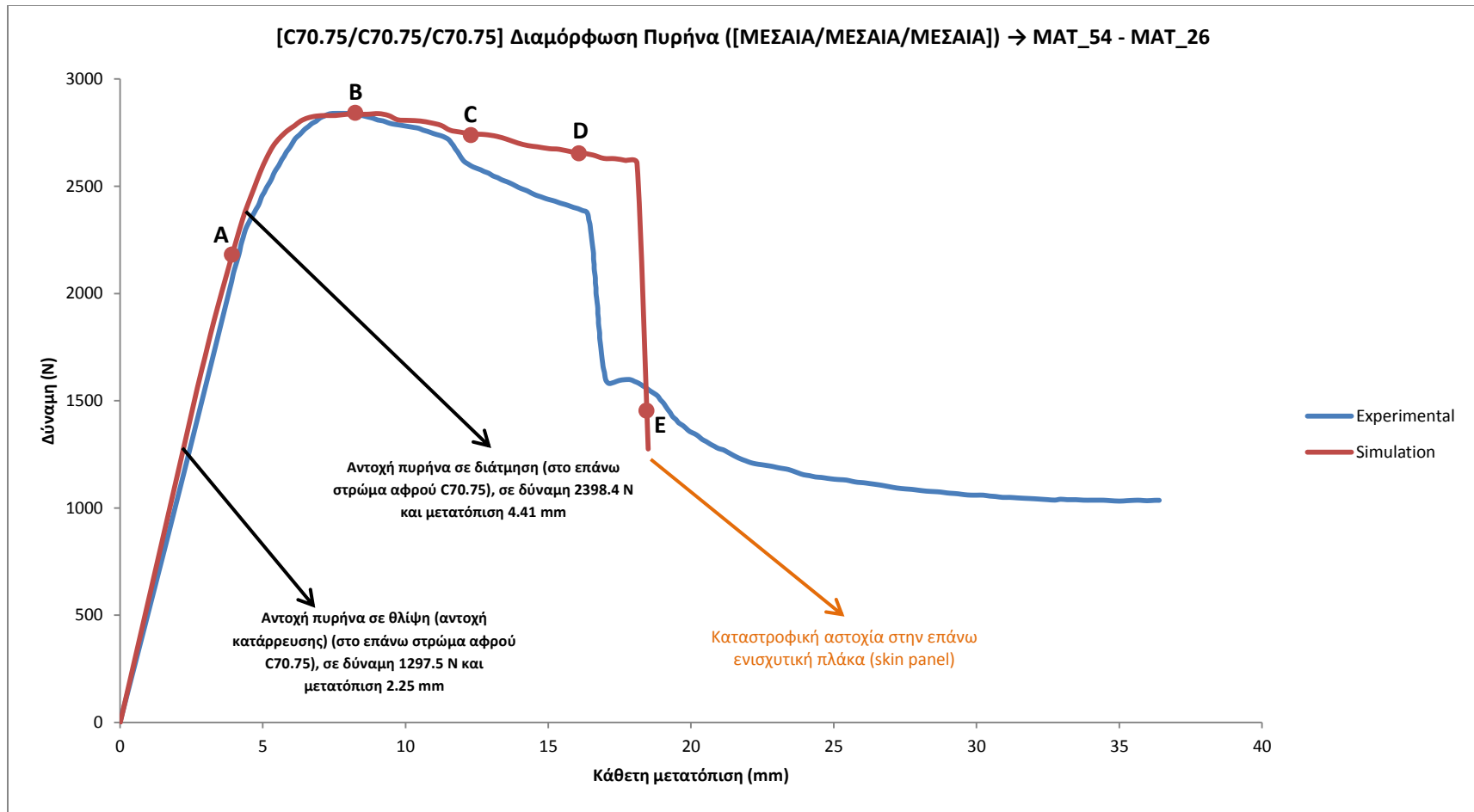
- β. Στις εικόνες που αφορούν την εξέλιξη της κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα των sandwich κατασκευών, η κλίμακα μέτρησης τους είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται στην δημοσιευμένη εργασία των Kaboglu et al [6] (βλ. Κεφάλαιο 2). Στις εικόνες που αφορούν την εξέλιξη της κατανομής των θλιπτικών παραμορφώσεων, το σκεπτικό στην επιλογή της κλίμακας που χρησιμοποιείται ήταν το εξής: στην ανάλυση θλιπτικής συμπεριφοράς των αφρών PVC που εξετάζονται στην παρούσα εργασία (βλ. Κεφάλαιο 3), παρατηρήθηκε η εμφάνιση ελαστικής συμπεριφοράς μέχρι μια ανηγμένη θλιπτική παραμόρφωση ~1.5%. Κατόπιν, το διάγραμμα θλιπτικής τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης εμφάνιζε μια πλαστική περιοχή με σχεδόν σταθερή θλιπτική τάση (στα αριθμητικά μοντέλα η τάση αυτή μοντελοποιήθηκε ως απολύτως σταθερή), μέχρι ένα επίπεδο ανηγμένης παραμόρφωσης της τάξης του 60%. Επομένως, η κλίμακα που χρησιμοποιείται ξεκινά από το 0% και φτάνει έως το όριο του 60%, που αποτελεί το τέλος της πλαστικής περιοχής και την «συμπύκνωση» (densification) του αφρού, αυξάνοντας αντίστοιχα το επίπεδο των αναπτυσσόμενων θλιπτικών τάσεων.
- γ. Στην περίπτωση της διαβαθμισμένης (graded) διαμόρφωσης πυρήνα με διάταξη αφρών [C70.90/C70.55/C70.90] (η οποία είναι η [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ]), συμφώνως και του πειράματος, η αστοχία εμφανίζεται στο ενδιάμεσο στρώμα αφρού (C70.55). Στην περίπτωση αυτή, τα αποτελέσματα των συνδυασμών μοντέλων υλικών MAT\_22 – MAT\_26 και MAT\_54 – MAT\_26 παρουσιάζονται μαζί, διότι δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η καταστροφική αστοχία αφορά αποκλειστικά τον πυρήνα, οπότε τα δύο μοντέλα που προσομοιώνουν τη συμπεριφορά των συνθέτων υλικών δεν ενεργοποιούν τα κριτήρια αστοχίας τους.



Σχήμα 4.4: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης μεταξύ πειράματος [6] και αριθμητικού μοντέλου, για ομοιογενή διαμόρφωση πυρήνα [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ]. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν συνδυασμό μοντέλων υλικών MAT\_22 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB).

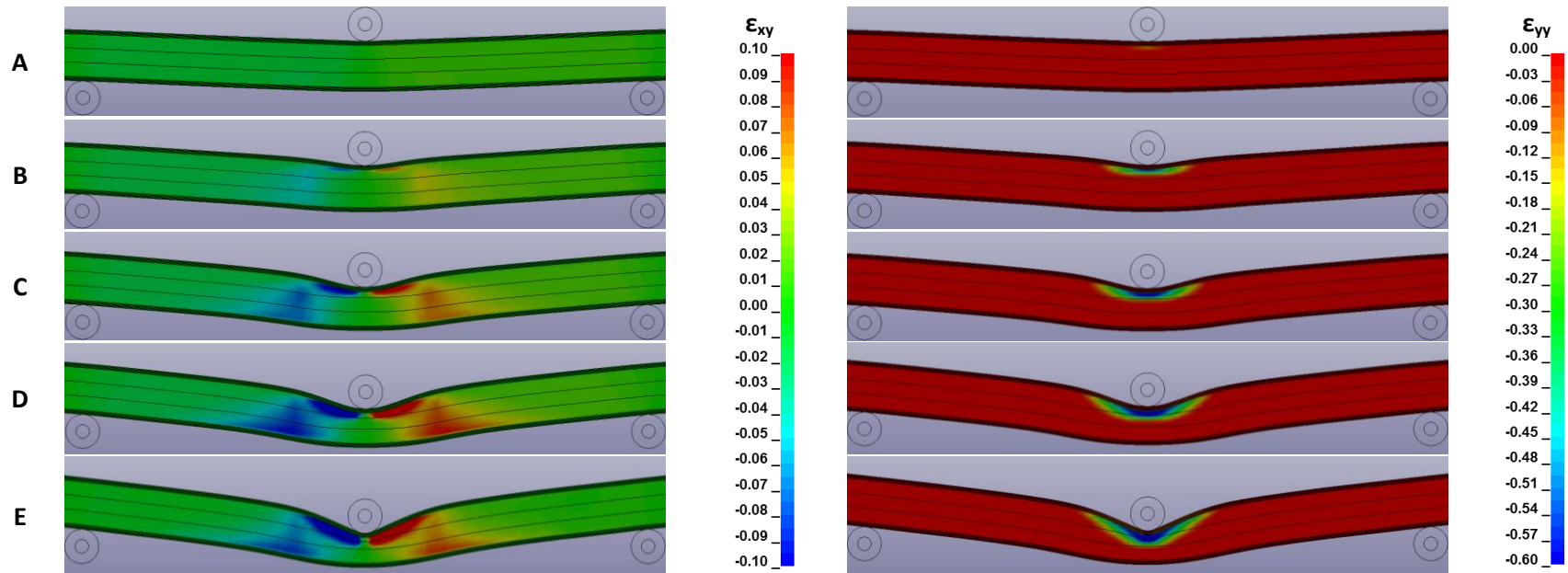


Σχήμα 4.5: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για ομοιογενή διαμόρφωση [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ], προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο (συνδυασμός μοντέλων υλικών MAT\_22 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB)).

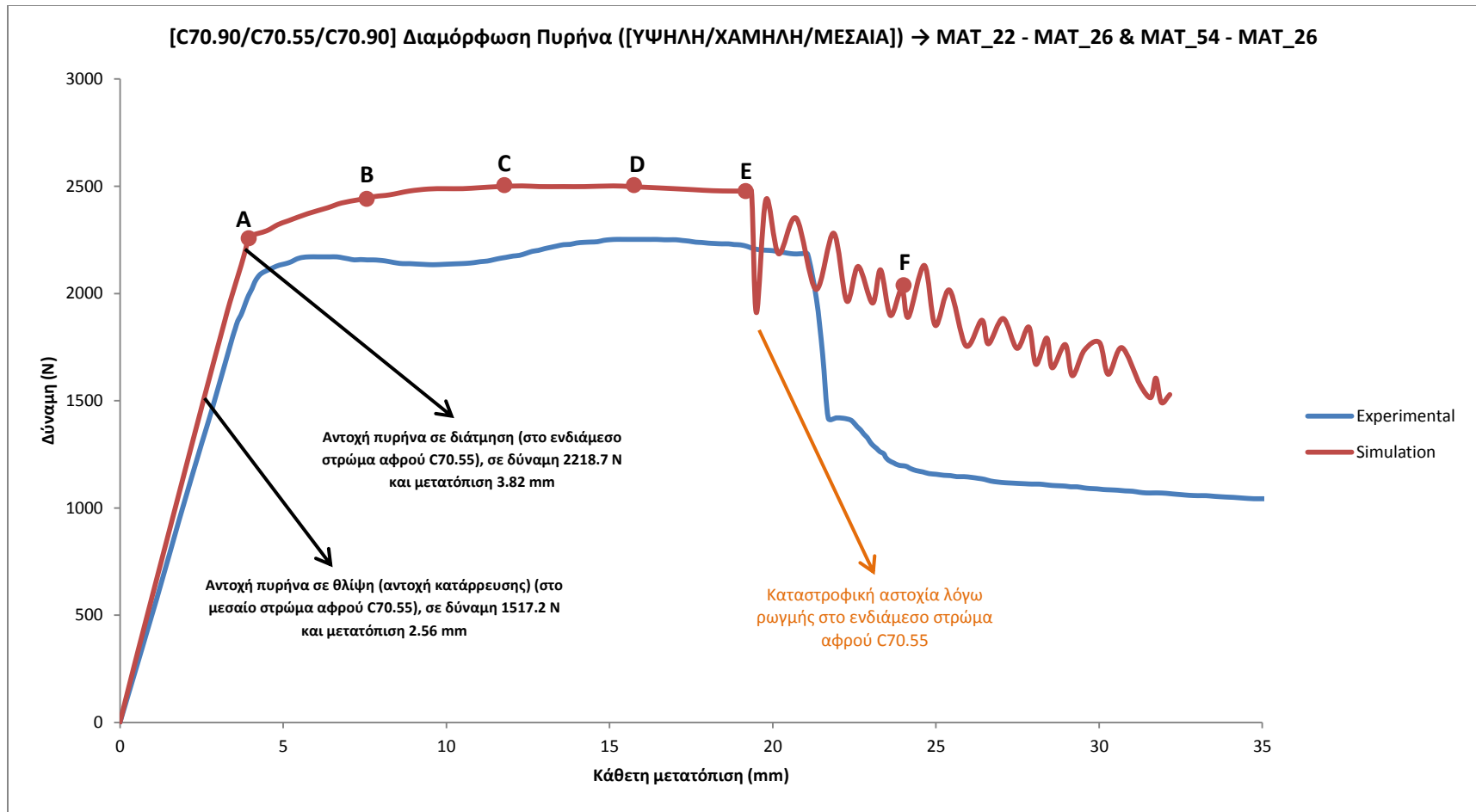


Σχήμα 4.6: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης μεταξύ πειράματος [6] και αριθμητικού μοντέλου, για ομοιογενή διαμόρφωση πυρήνα [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ]. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν συνδυασμό μοντέλων υλικών MAT\_54 (MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB).

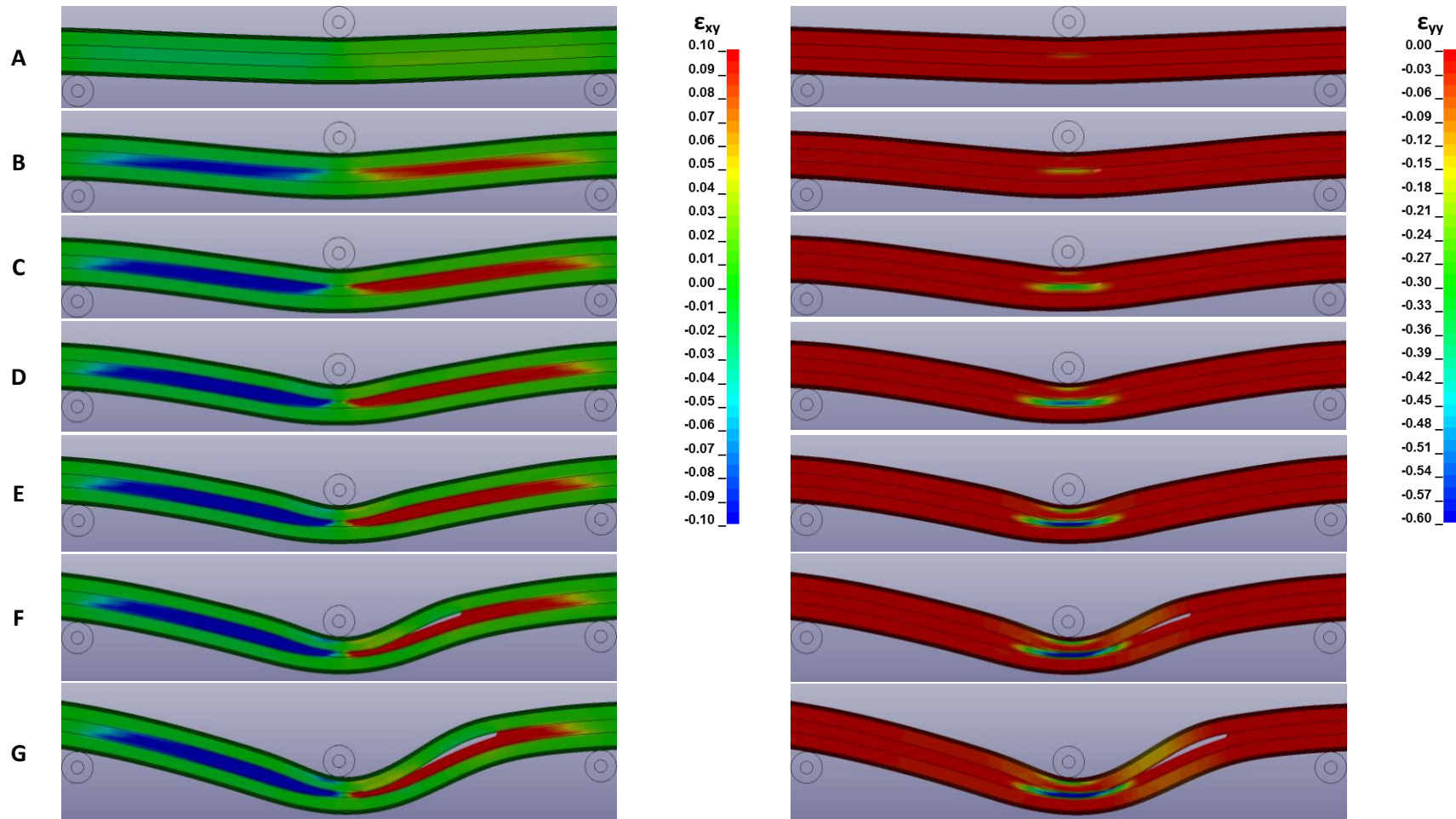




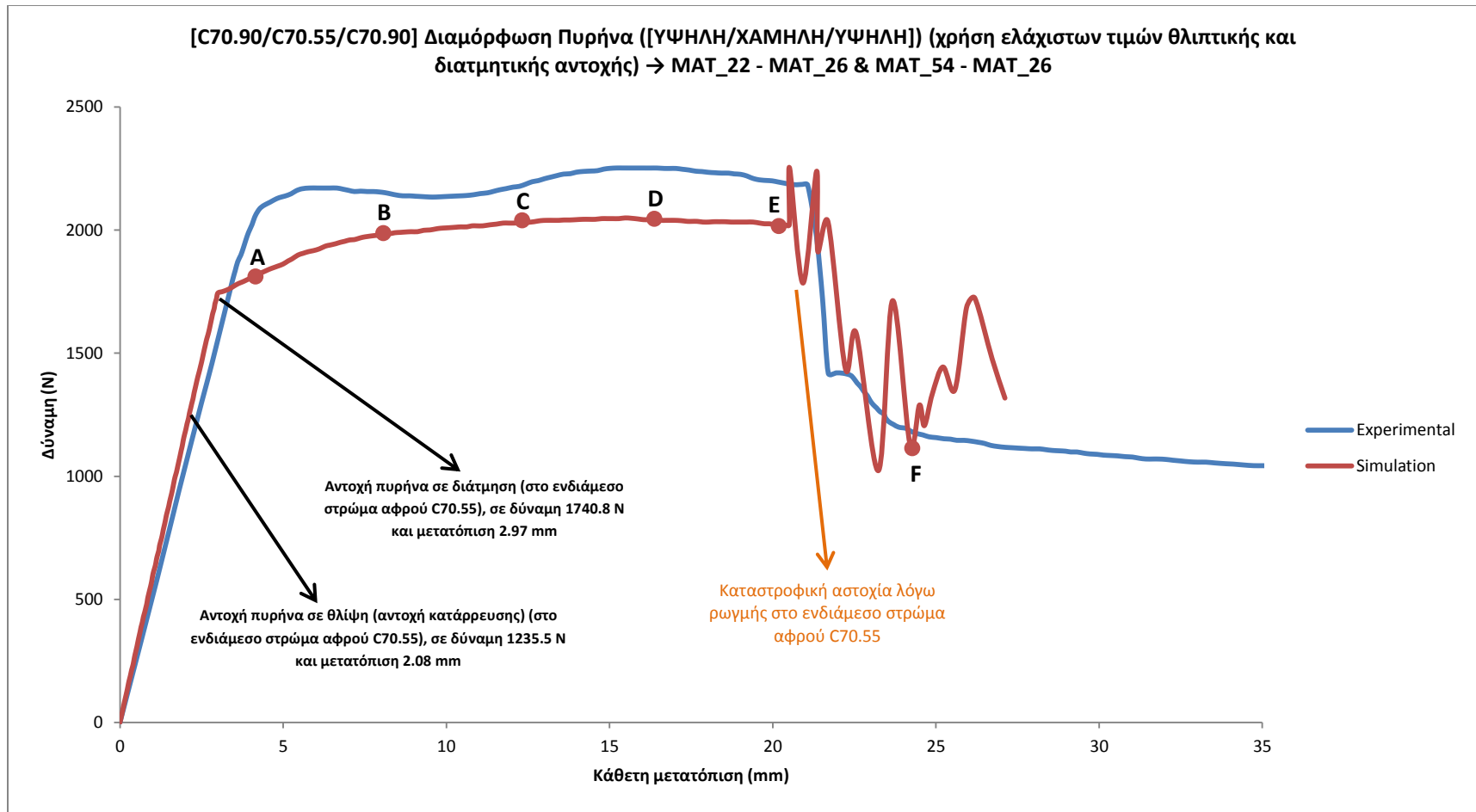
Σχήμα 4.7: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για ομοιογενή διαμόρφωση [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ], προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο (συνδυασμός μοντέλων υλικών MAT\_54 (MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB)).



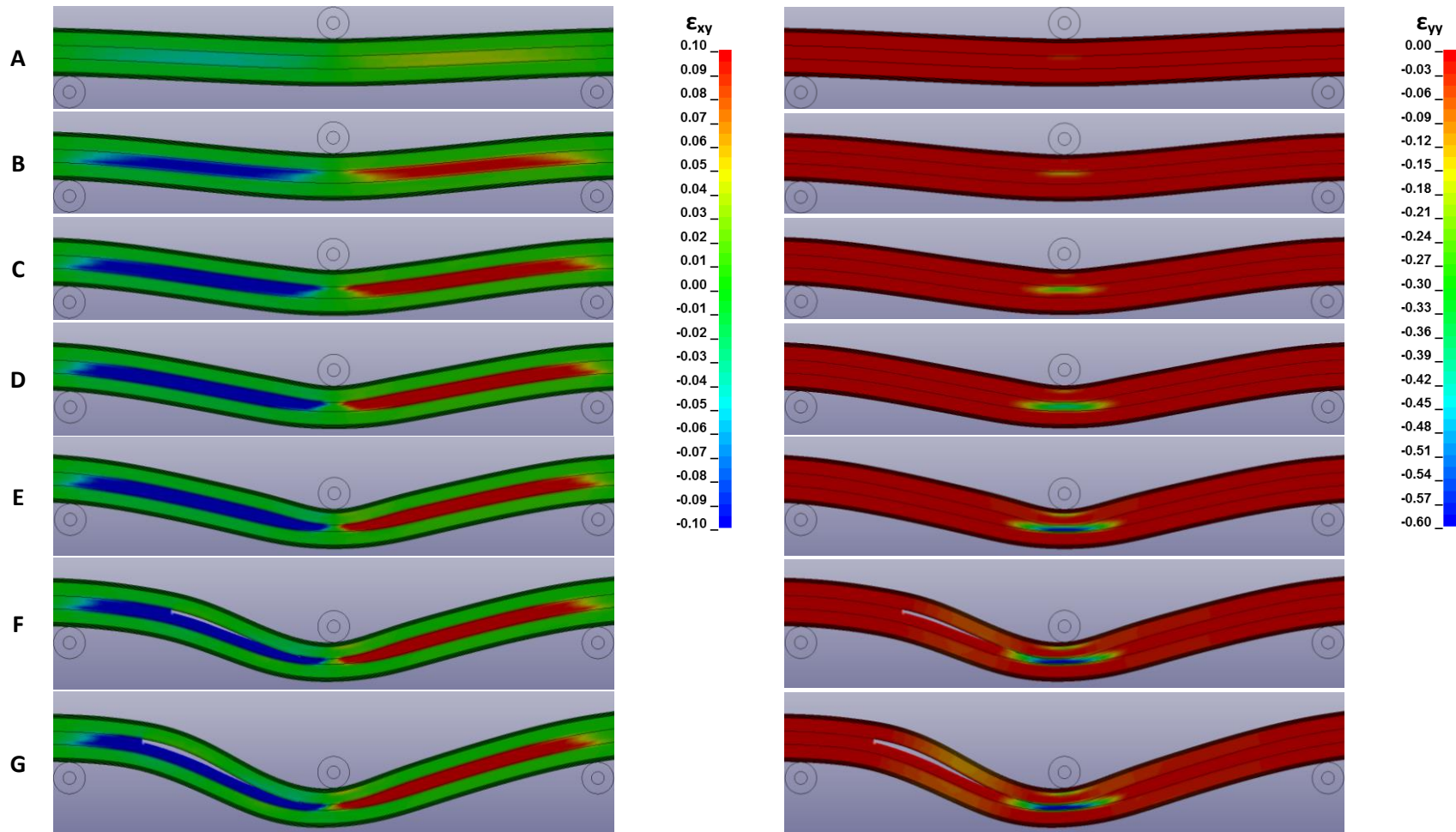
Σχήμα 4.8: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης μεταξύ πειράματος [6] και αριθμητικού μοντέλου, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ]. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν συνδυασμό μοντέλων υλικών MAT\_22 / MAT\_54 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE / MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB).



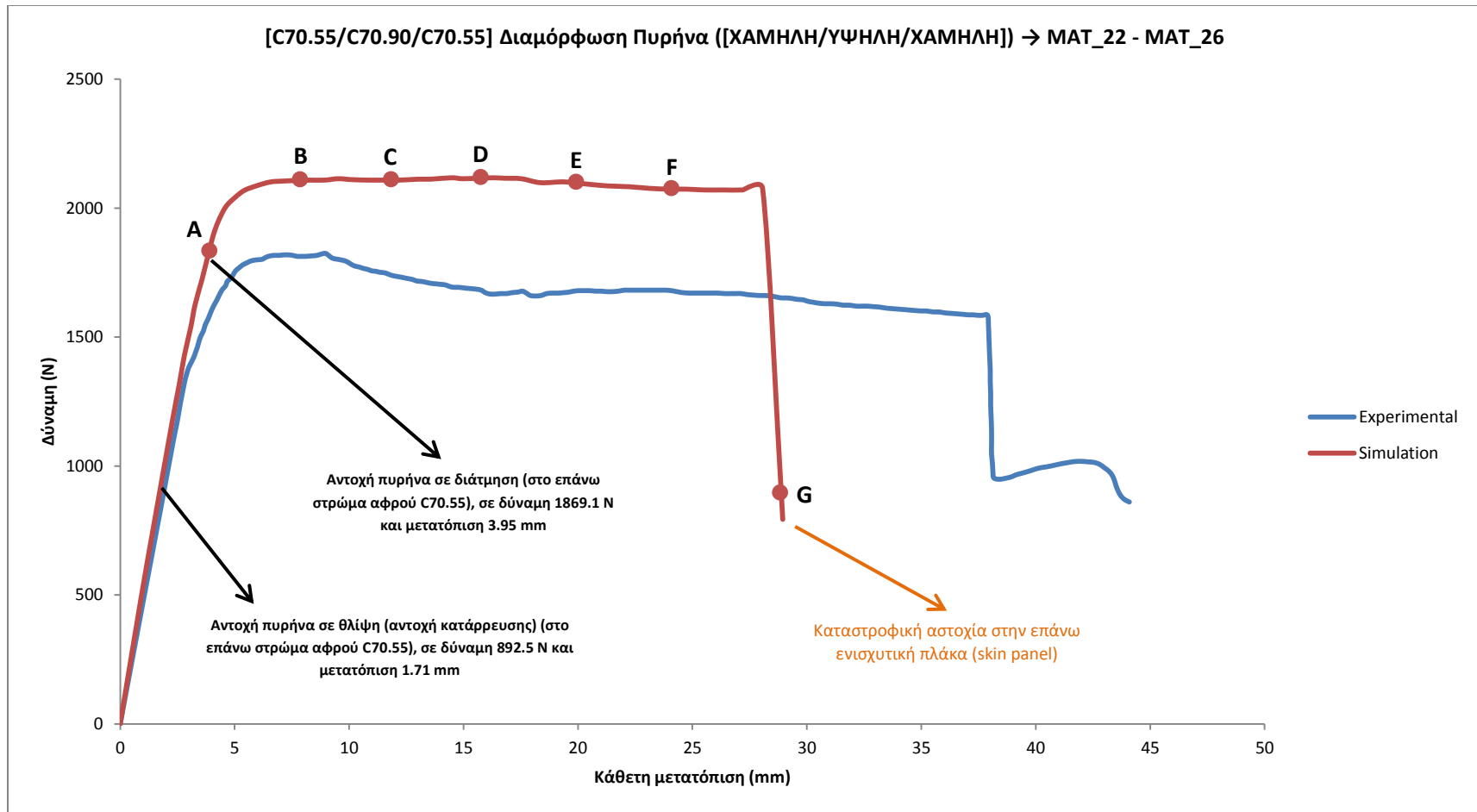
Σχήμα 4.9: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ], προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο (συνδυασμός μοντέλων υλικών MAT\_22 / MAT\_54 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE / MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB)).



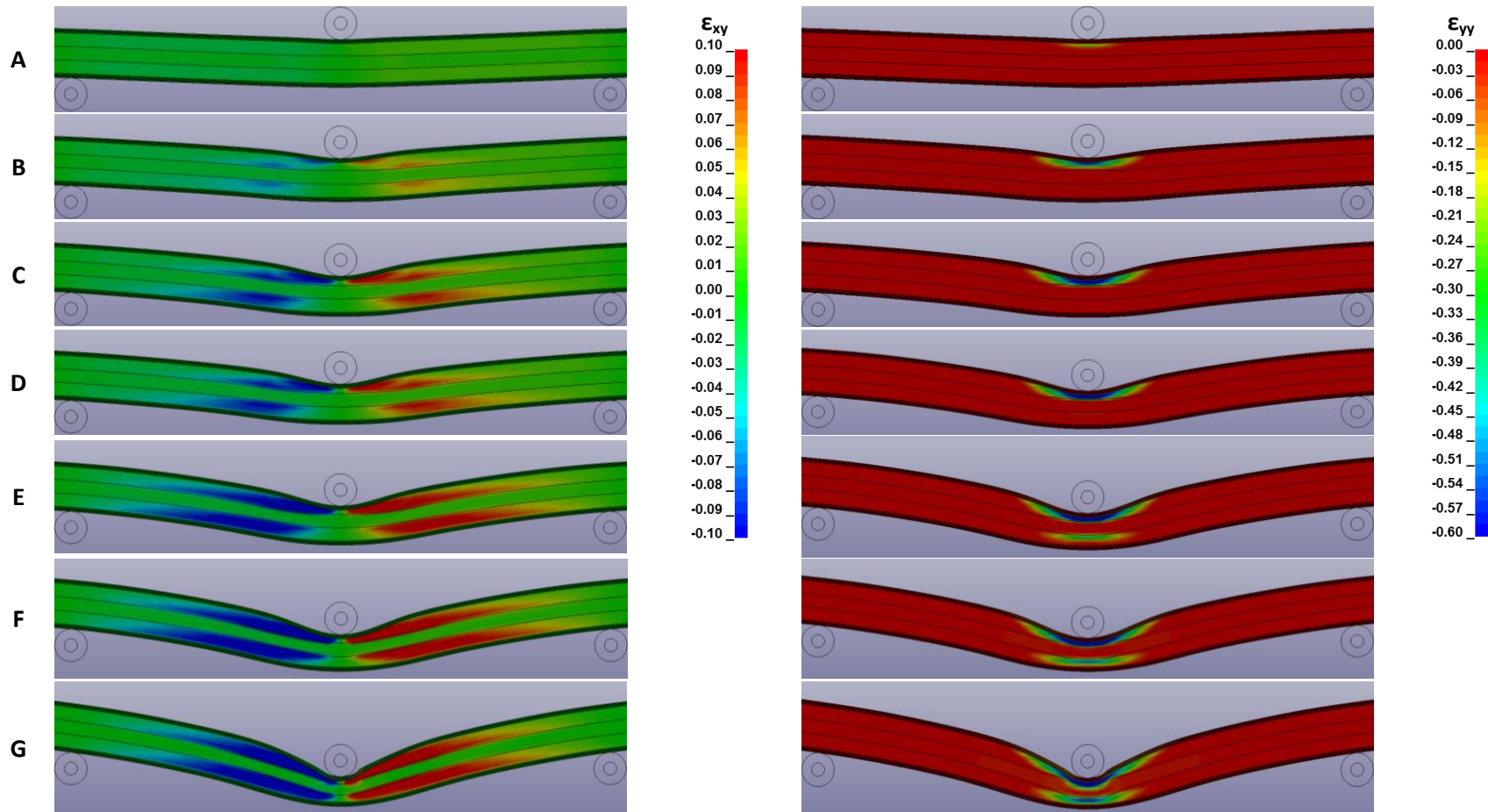
Σχήμα 4.10: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης μεταξύ πειράματος [6] και αριθμητικού μοντέλου, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] με ελάχιστες τιμές θλιπτικής – διατμητικής αντοχής. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν συνδυασμό μοντέλων υλικών MAT\_22 / MAT\_54 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE / MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB).



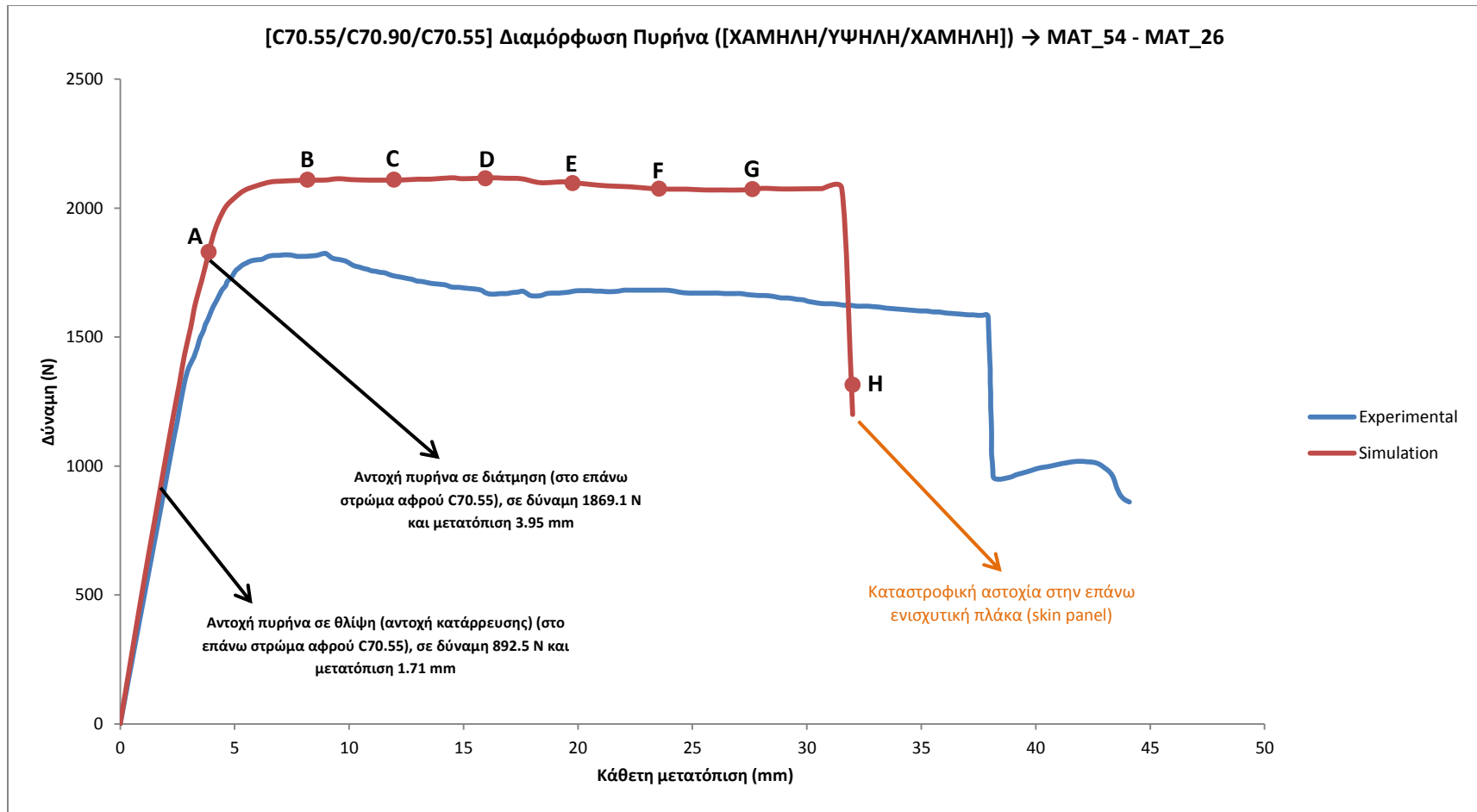
Σχήμα 4.11: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] με ελάχιστες τιμές θλιπτικής – διατμητικής αντοχής, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο (συνδυασμός μοντέλων υλικών MAT\_22 / MAT\_54 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE / MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB)).



Σχήμα 4.12: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης μεταξύ πειράματος [6] και αριθμητικού μοντέλου, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ]. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν συνδυασμό μοντέλων υλικών MAT\_22 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB).

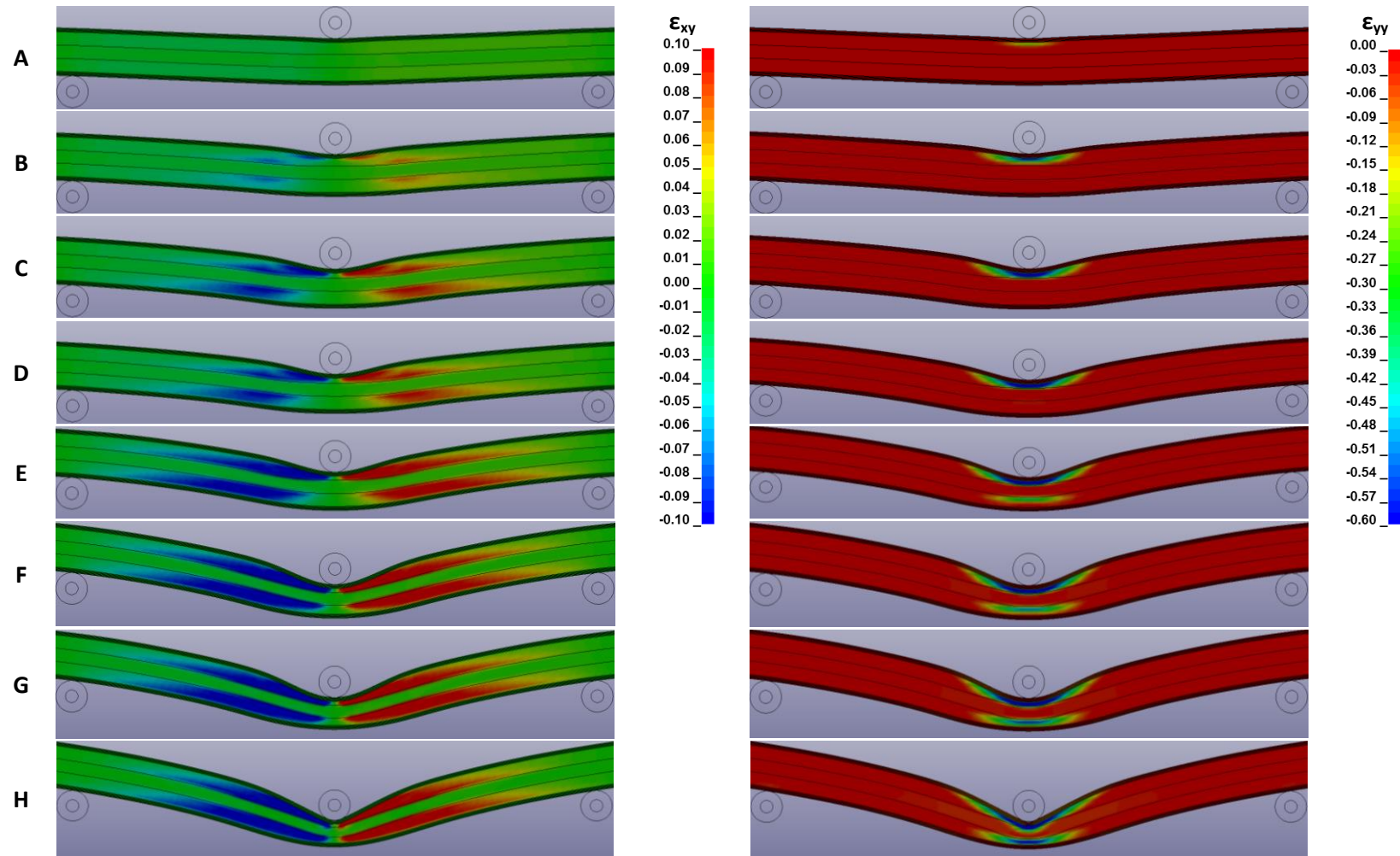


Σχήμα 4.13: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ], προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο (συνδυασμός μοντέλων υλικών MAT\_22 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB)).

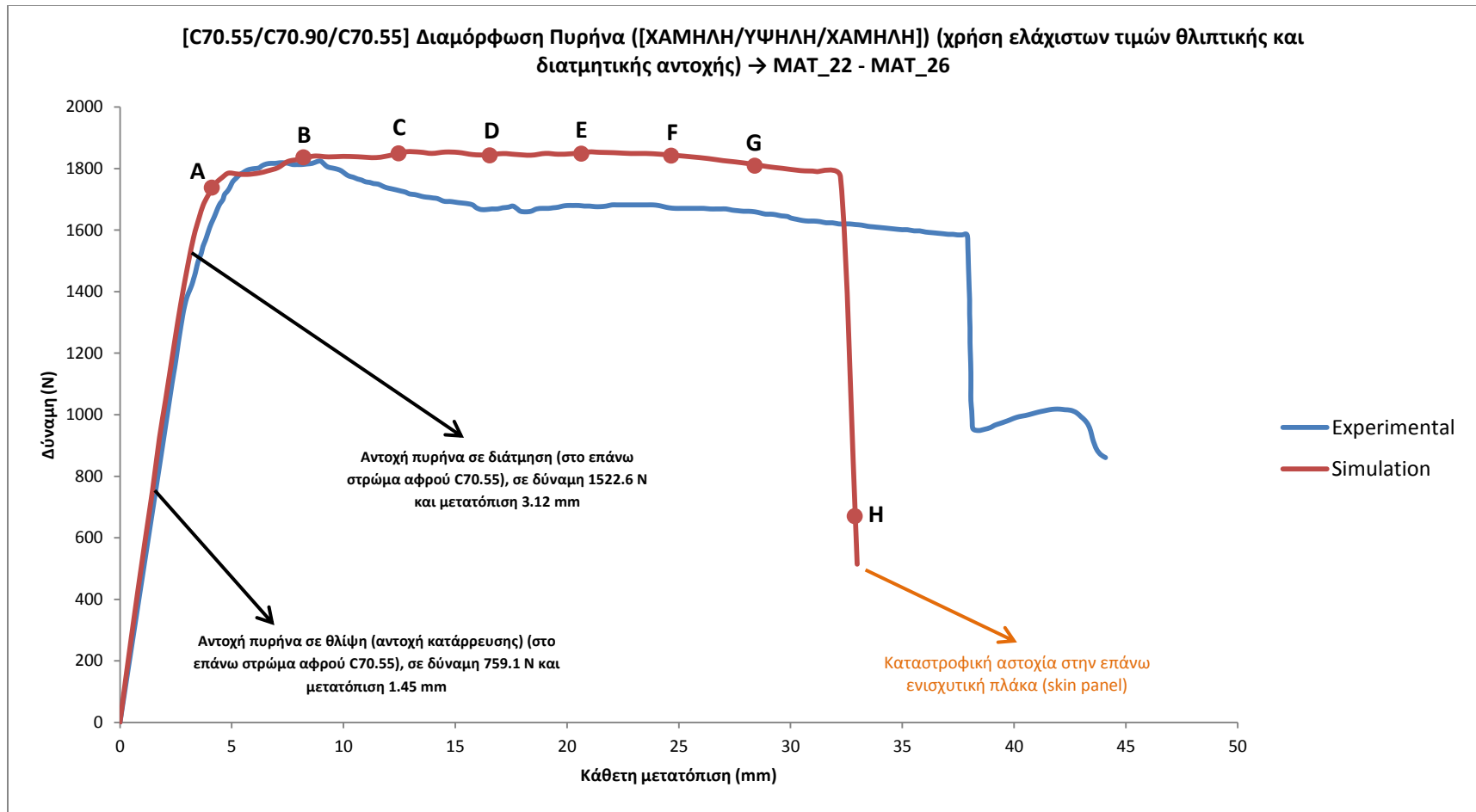


Σχήμα 4.14: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης μεταξύ πειράματος [6] και αριθμητικού μοντέλου, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ]. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν συνδυασμό μοντέλων υλικών MAT\_54 (MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB).

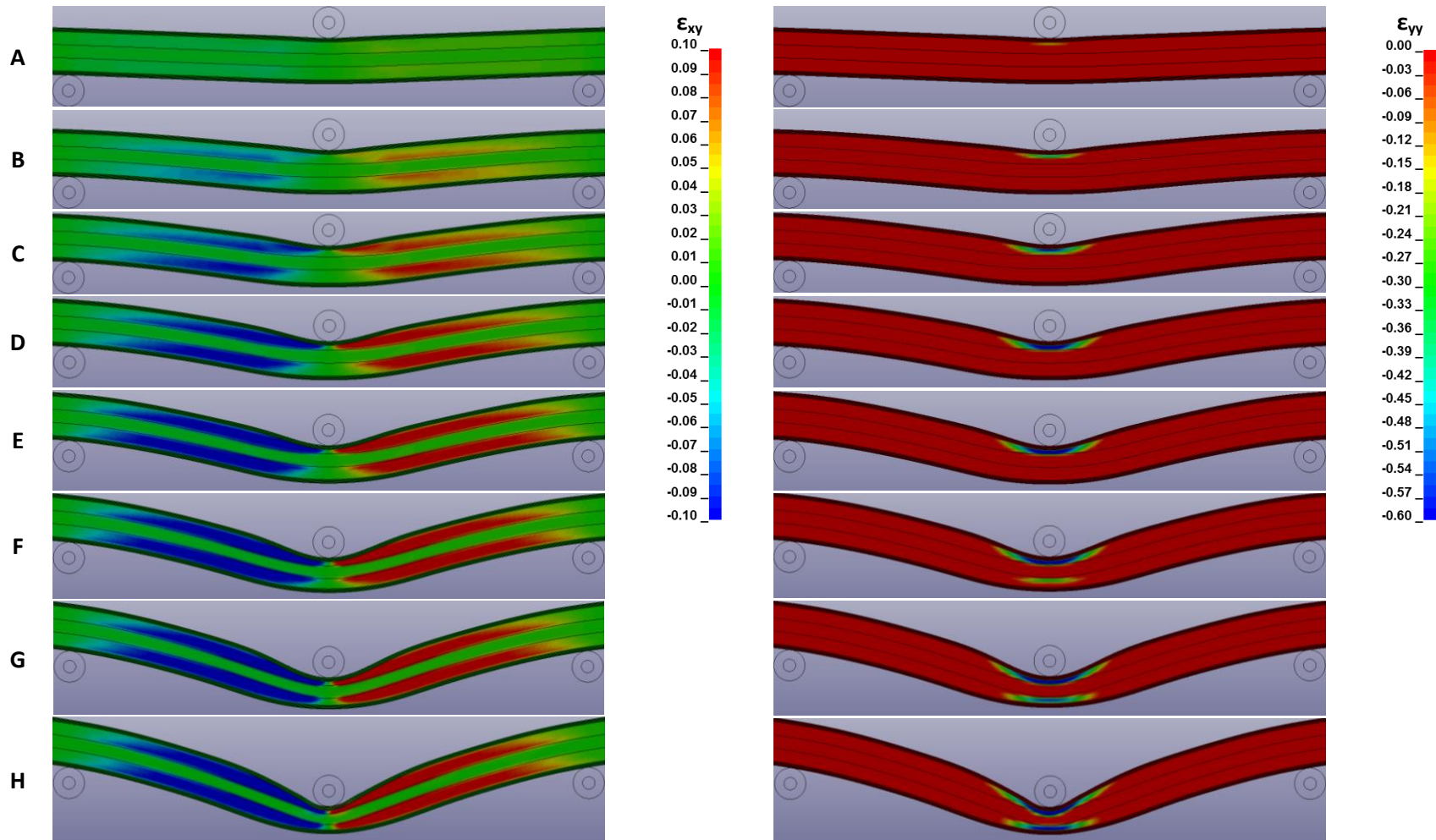




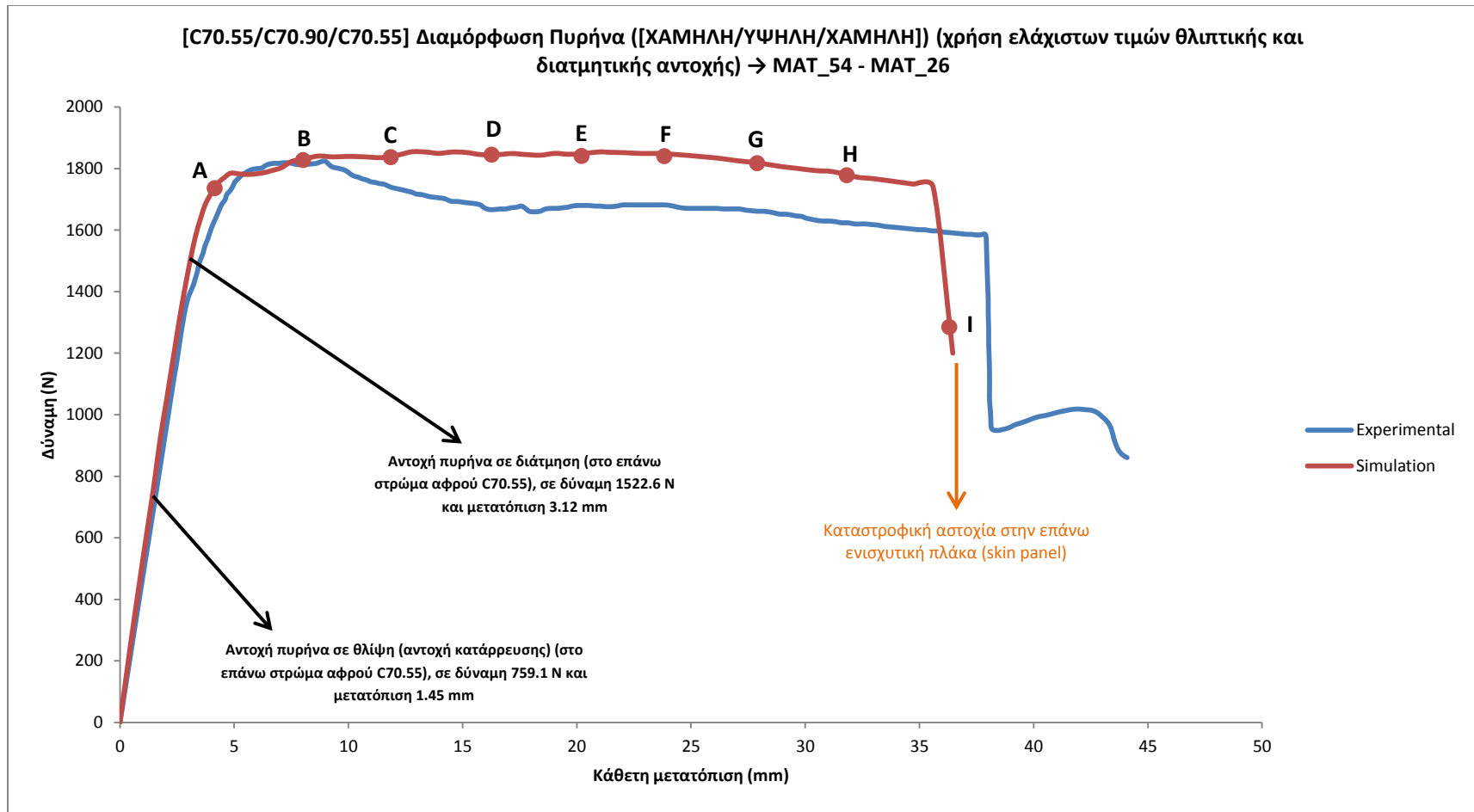
Σχήμα 4.15: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ], προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο (συνδυασμός μοντέλων υλικών MAT\_54 (MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB)).



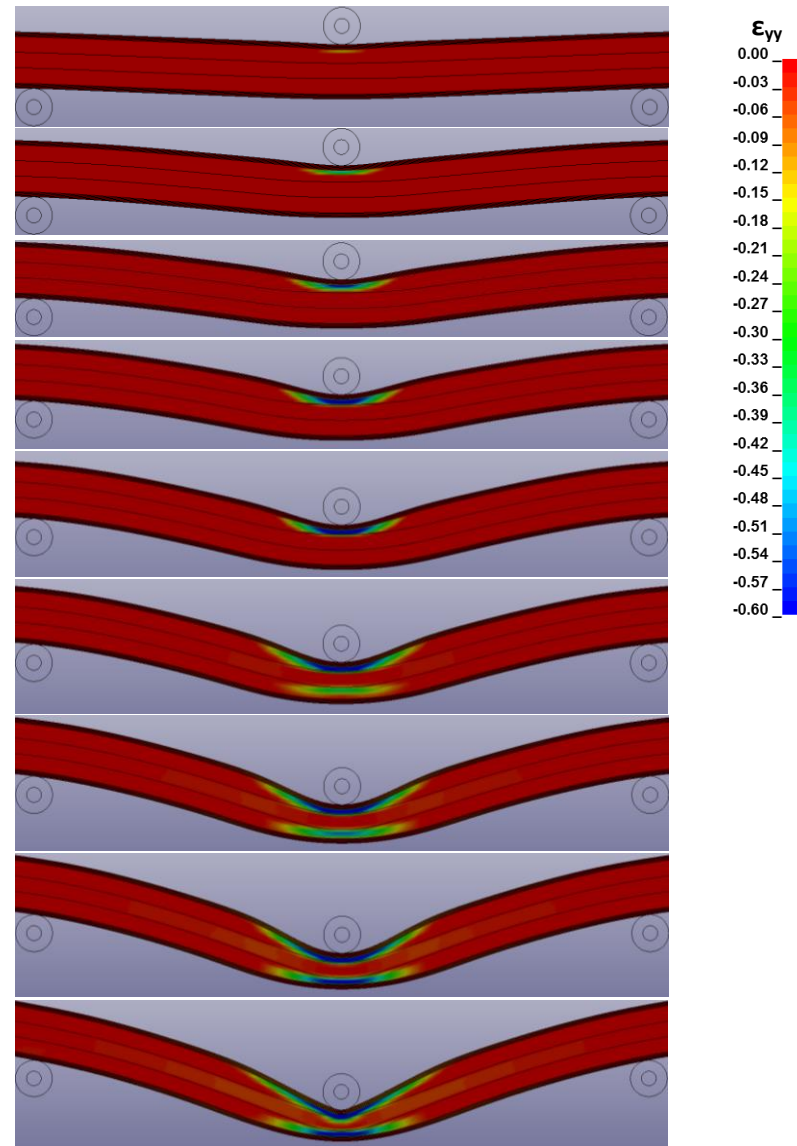
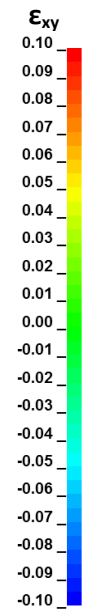
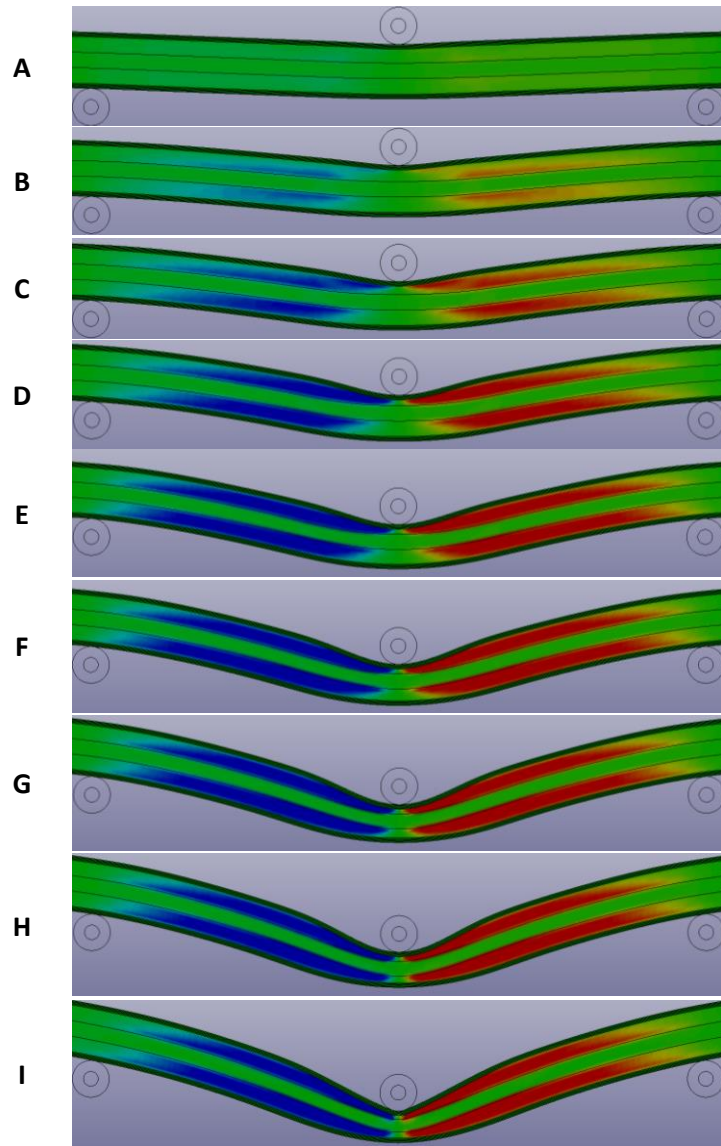
Σχήμα 4.16: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης μεταξύ πειράματος [6] και αριθμητικού μοντέλου, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ], με ελάχιστες τιμές θλιπτικής – διατμητικής αντοχής. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν συνδυασμό μοντέλων υλικών MAT\_22 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB).



Σχήμα 4.17: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ], με χρήση ελάχιστων τιμών θλιπτικής – διατμητικής αντοχής, προερχόμενα από το αριθμητικό μοντέλο (συνδυασμός μοντέλων υλικών MAT\_22 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB)).



Σχήμα 4.18: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης μεταξύ πειράματος [6] και αριθμητικού μοντέλου, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ], με ελάχιστες τιμές θλιπτικής – διατμητικής αντοχής. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν συνδυασμό μοντέλων υλικών MAT\_54 (MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_26 (MAT\_HONEYCOMB).



Στον Πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται αποτελέσματα για τα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσα σύγκριση ανάμεσα σε πείραμα και προσομοίωση. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν δύο χαρακτηριστικές τιμές των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης, οι οποίες είναι η μέγιστη τιμή φορτίου (σε N) και η τιμή της κάθετης μετατόπισης του κυλίνδρου φόρτισης στην οποία επέρχεται η καταστροφική αστοχία της εκάστοτε sandwich κατασκευής.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση τιμών μεγίστου φορτίου και μετατόπισης τη στιγμή της καταστροφικής αστοχίας μεταξύ πειράματος [6] και αριθμητικού μοντέλου.

	Μέγιστο φορτίο (N)	Διαφορά (%) ως προς Πείραμα	Κάθετη μετατόπιση τη στιγμή καταστροφικής αστοχίας (mm)	Διαφορά (%) ως προς Πείραμα
[ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] (Πείραμα)	2839.7	-	16.33	-
[ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] (Προσομοίωση MAT_22-MAT_26)	2838.6	+0.03	16.15	-1.10
[ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] (Προσομοίωση MAT_54-MAT_26)	2838.6	+0.03	18.1	+10.83
[ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] (Πείραμα)	2252.3	-	20.9	-
[ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] (Προσομοίωση MAT_22-MAT_26)	2498.1	+10.90	19.4	-7.17
[ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] (Προσομοίωση MAT_54-MAT_26)	2498.1	+10.90	19.4	-7.17
[ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] (Προσομοίωση MAT_22-MAT_26 με χαμηλότερες τιμές αντοχών θλίψης – διάτμησης)	2049.5	-9.00	20.5	-1.91
[ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] (Προσομοίωση MAT_54-MAT_26 με χαμηλότερες τιμές αντοχών θλίψης – διάτμησης)	2049.5	-9.00	20.5	-1.91
[ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] (Πείραμα)	1824.3	-	37.8	-
[ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] (Προσομοίωση MAT_22-MAT_26)	2117.3	+16.00	28.6	-24.3
[ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] (Προσομοίωση MAT_54-MAT_26)	2117.3	+16.00	31.5	-16.67
[ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] (Προσομοίωση MAT_22-MAT_26 με χαμηλότερες τιμές αντοχών θλίψης – διάτμησης)	1810.2	-0.70	32.2	-14.81
[ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] (Προσομοίωση MAT_54-MAT_26 με χαμηλότερες τιμές αντοχών θλίψης – διάτμησης)	1810.2	-0.70	35.6	-5.8

Εξετάζοντας όλα τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, καθώς και τα διάφορα στιγμιότυπα αποτύπωσης των διατμητικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα και των θλιπτικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα, μπορούν να διατυπωθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα - παρατηρήσεις όσον αφορά την εγκυρότητα των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη χρήση του λογισμικού Πεπερασμένων Στοιχείων LS-DYNA®:

- α. Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης, είναι σαφής η πολύ καλή συσχέτιση της γραμμικής – ελαστικής περιοχής μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης. Η γραμμική – ελαστική περιοχή των διαγραμμάτων αυτών αποτελεί το μέσον αξιολόγησης των ελαστικών μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρο ελαστικότητας Young (E) και μέτρο διάτμησης (G)) που επελέγησαν για τα υλικά του πειράματος στο Κεφάλαιο 3. Υπενθυμίζεται ότι στο Κεφάλαιο 3 αντιμετωπίστηκε έλλειψη ακριβών πειραματικών αποτελεσμάτων για τις ενισχυτικές πλάκες (skin panels) και τους αφρούς PVC, η οποία ξεπεράστηκε με την χρήση βιβλιογραφικών πηγών και προσεγγιστικών μεθόδων. Αποδεικνύεται ότι οι τιμές που επελέγησαν οδηγούν σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη γραμμική περιοχή των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης.
- β. Σχετικά με τη μη γραμμική περιοχή των διαγραμμάτων δύναμης μετατόπισης, είναι σαφές ότι η μορφή τους καθορίζεται από τη μηχανική συμπεριφορά που εμφανίζει το μοντέλο MAT\_26 που χρησιμοποιήθηκε για τους αφρούς PVC, μιας και τα μοντέλα MAT\_22 και MAT\_54 των ενισχυτικών πλακών παραμένουν ελαστικά μέχρι την καταστροφική τους αστοχία. Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων αρχικά είναι αποδεικτέο ότι το μοντέλο MAT\_26 μπορεί να προβλέψει τη γενική συμπεριφορά των αφρών PVC, τόσο στην περίπτωση της ομοιογενούς διαμόρφωσης πυρήνα όσο και στην περίπτωση των διαβαθμισμένων διαμορφώσεων. Αυτό σημαίνει ότι η αλληλεπίδραση θλίψης – διάτμησης που έχει αναγνωριστεί από το πείραμα των Kaboglu et al [6] ως το κυρίαρχο φαινόμενο στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά με το συγκεκριμένο μοντέλο υλικού. Το επιχείρημα αυτό ενισχύεται ακόμη περισσότερο και από την παρατήρηση των στιγμιότυπων διατμητικών παραμορφώσεων κατά το πάχος του πυρήνα και τη σύγκριση με τις πειραματικές, όπου διαπιστώνεται αρκετά καλή σύγκλιση. Πιο συγκεκριμένα:
  - Στην περίπτωση της ομοιογενούς διαμόρφωσης πυρήνα [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ], όπου χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι μέσες τιμές θλιπτικής και διατμητικής αντοχής που δίνονται από τον κατασκευαστή

των αφρών PVC, το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης που εξήχθη από τα αριθμητικά μοντέλα ακολουθεί πολύ ικανοποιητικά το αντίστοιχο πειραματικό, με τις τιμές των φορτίων σε κάθε τιμή μετατόπισης να βρίσκονται σε πολύ καλή συσχέτιση. Το μέγιστο φορτίο συγκεκριμένα, μετρήθηκε από το αριθμητικό μοντέλο μόλις 0.03% μεγαλύτερο από αυτό του πειράματος.

- Στην περίπτωση της διαβαθμισμένης (graded) διαμόρφωσης [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ], χρησιμοποιήθηκαν για τους αφρούς PVC τόσο οι μέσες τιμές θλιπτικής και διατμητικής αντοχής όσο και οι ελάχιστες αυτών. Και στις δύο περιπτώσεις, το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης από τα αριθμητικά μοντέλα αποτύπωσε την γενική μορφή που επιδεικνύει και το αντίστοιχο πειραματικό. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτής της διαμόρφωσης, η διάτμηση του ενδιάμεσου στρώματος αφρού είναι αυτή που κυριαρχεί, γι' αυτό και το διάγραμμα παρουσιάζει μια σχετικά απότομη μετάβαση από την γραμμική στη μη γραμμική περιοχή. Ωστόσο, στη μη γραμμική περιοχή, οι τιμές των φορτίων από τα αριθμητικά μοντέλα ήταν υψηλότερες των πειραματικών στην περίπτωση των μέσων τιμών αντοχών και χαμηλότερα στην περίπτωση των ελάχιστων τιμών αντοχών. Το μέγιστο φορτίο στην πρώτη περίπτωση μετρήθηκε 10.9% μεγαλύτερο του πειραματικού ενώ στη δεύτερη 9% χαμηλότερο. Αυτό σημαίνει ότι η απόκλιση αυτή που καταγράφεται είναι πολύ πιθανό να οφείλεται στην έλλειψη ακριβών πειραματικών αποτελεσμάτων για τον αφρό, η ύπαρξη των οποίων θα οδηγούσε σε ικανοποιητικότερη ανάπτυξη του μοντέλου MAT\_26.
- Κάτι αντίστοιχο με την ανωτέρω περίπτωση διαβαθμισμένης διαμόρφωσης πυρήνα παρατηρήθηκε και στην επίσης διαβαθμισμένη [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ]. Και στην περίπτωση αυτή για τους αφρούς PVC χρησιμοποιήθηκαν τόσο οι μέσες όσο και οι ελάχιστες τιμές θλιπτικής και διατμητικής αντοχής των αφρών. Και στις δύο περιπτώσεις, τα αριθμητικά μοντέλα αναπαρήγαγαν αρκετά ικανοποιητικά τη γενική μορφή του διαγράμματος δύναμης – μετατόπισης, όπου η επίδραση της θλιπτικής καταπόνησης είναι αρκετά εντονότερη από ότι στην προηγούμενη περίπτωση διαβαθμισμένης διαμόρφωσης, οπότε υπάρχει μια πολύ ομαλή μετάβαση από τη γραμμική στη μη γραμμική περιοχή. Ωστόσο, στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές αντοχών, τα επίπεδα φορτίων ήταν αρκετά υψηλότερα των πειραματικών, με το μέγιστο φορτίο να είναι 16% μεγαλύτερο του



πειραματικού. Πολύ καλύτερη συσχέτιση παρατηρείται στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν οι ελάχιστες τιμές αντοχών για τους αφρούς, με το μέγιστο φορτίο να είναι 0.7% χαμηλότερο του πειραματικού, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένας πολύ πιθανός λόγος απόκλισης είναι η έλλειψη ακριβών πειραματικών αποτελεσμάτων για τους αφρούς PVC.

- γ. Ιδιαίτερη μνεία απαιτείται να γίνει και στις καταστροφικές αστοχίες των κατασκευών sandwich που μελετήθηκαν. Υπενθυμίζεται ότι βάσει του πειράματος, στην ομοιογενή διαμόρφωση [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] και στην διαβαθμισμένη (graded) [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] η καταστροφική αστοχία επέρχεται λόγω θραύσης των ενισχυτικών πλακών (skin panels), ενώ στην άλλη διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] λόγω διατμητικής ρωγμής στο μεσαίο στρώμα αφρού.
- Στην περίπτωση της καταστροφικής αστοχίας των ενισχυτικών πλακών, αυτή μοντελοποιήθηκε βάσει των κριτηρίων αστοχίας που είναι ενσωματωμένα στα μοντέλα υλικών MAT\_22 και MAT\_54 που χρησιμοποιήθηκαν. Παρατηρείται ότι στις συγκεκριμένες περιπτώσεις που μελετήθηκαν, τα δύο αυτά μοντέλα παρήγαγαν παρόμοια αποτελέσματα, με μικρές διαφορές στην τιμή κάθετης μετατόπισης στην οποία παρουσιάζεται η καταστροφική αστοχία. Στην περίπτωση της ομοιογενούς διαμόρφωσης [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] το μοντέλο MAT\_22 πλησίασε περισσότερο τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ στην περίπτωση της διαβαθμισμένης (graded) [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] αυτό ίσχυσε για το μοντέλο MAT\_54. Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι η χρήση των ελάχιστων τιμών θλιπτικής και διατμητικής αντοχής των αφρών PVC στην περίπτωση της διαβαθμισμένης διαμόρφωσης [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] βελτίωσε και την ικανότητα των μοντέλων MAT\_22 και MAT\_54 να επιτύχουν θραύση σε τιμές μετατόπισης πλησιέστερα στην πειραματική.
  - Στην περίπτωση της καταστροφικής αστοχίας του αφρού στην περίπτωση της διαβαθμισμένης (graded) διαμόρφωσης [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ], η χρήση της απλουστευμένης μεθόδου διαγραφής στοιχείων που πληρούν ένα κριτήριο μέγιστης κύριας ανηγμένης παραμόρφωσης (maximum principal strain) με τη χρήση του MAT\_ADD\_EROSION, ενώ κατάφερε να επιτύχει το σημείο της έναρξης της ρωγμής καθώς και την ασύμμετρη διάδοσή της, εντούτοις δεν κατάφερε να αποτυπώσει την ακριβή διαδρομή της διάδοσής της, όπως

φαίνεται από τη σύγκριση των στιγμιοτύπων της προσομοίωσης σε σχέση με του πειράματος. Ένας παράγοντας που θα μπορούσε να ευθύνεται για αυτό είναι το μέγεθος και η διάταξη του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε. Η χρήση μιας τεχνικής πύκνωσης πλέγματος στην περιοχή της ρωγμής ή η χρήση ενός μη δομημένου πλέγματος (π.χ. με τη χρήση τετράεδρων στοιχείων αντί εξάεδρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία) είναι πιθανόν να βελτιώνει τα αποτελέσματα. Επίσης, οι λόγοι της μη ταύτισης θα πρέπει να αναζητηθούν και στην απλοϊκότητα του κριτηρίου μέγιστης κύριας ανηγμένης παραμόρφωσης (*maximum principal strain*) συνδυασμένου με διαγραφή στοιχείων, η οποία αποδεικνύεται ότι μπορεί μόνο μια γενική, μακροσκοπική εικόνα για την εμφάνιση καταστροφικής ρωγμής στον αφρό μπορεί να δώσει, που σε καμία περίπτωση δεν αναπαράγει τις αστοχίες σε μικροσκοπικό επίπεδο. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου έγκειται και στο ότι η «κρίσιμη τιμή» του κριτηρίου επιλέγεται όχι εκ των προτέρων αλλά με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος, όπως έγινε και εδώ. Επομένως, αναδεικνύεται και η απαίτηση για την ανάπτυξη ενός πιο εξελιγμένου κριτηρίου αστοχίας για τον αφρό, το οποίο να μπορεί να λειτουργήσει εκ των προτέρων και όχι βασισμένο σε πειραματικά αποτελέσματα, και να μπορεί να ενσωματωθεί στο περιβάλλον του LS-DYNA®. Παρ' όλ' αυτά, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας το κριτήριο μέγιστης κύριας ανηγμένης παραμόρφωσης (*maximum principal strain*) δεν είναι απορριπτέο, μιας και μπορεί να δώσει μια ικανοποιητική εικόνα για την «επικίνδυνη» περιοχή της sandwich κατασκευής στην οποία εμφανίζεται η καταστροφική ρωγμή.

## Κεφάλαιο 5: Παραμετρική ανάλυση

Κατόπιν της σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων στο Κεφάλαιο 4, στο παρόν Κεφάλαιο αποφασίστηκε να μελετηθούν μερικές επιπλέον περιπτώσεις κατασκευών sandwich για την διεύρυνση των συμπερασμάτων που προέκυψαν προηγουμένως. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν αποτελούν τροποποιημένες περιπτώσεις των πειραματικών δοκιμών και αναλύονται παρακάτω.

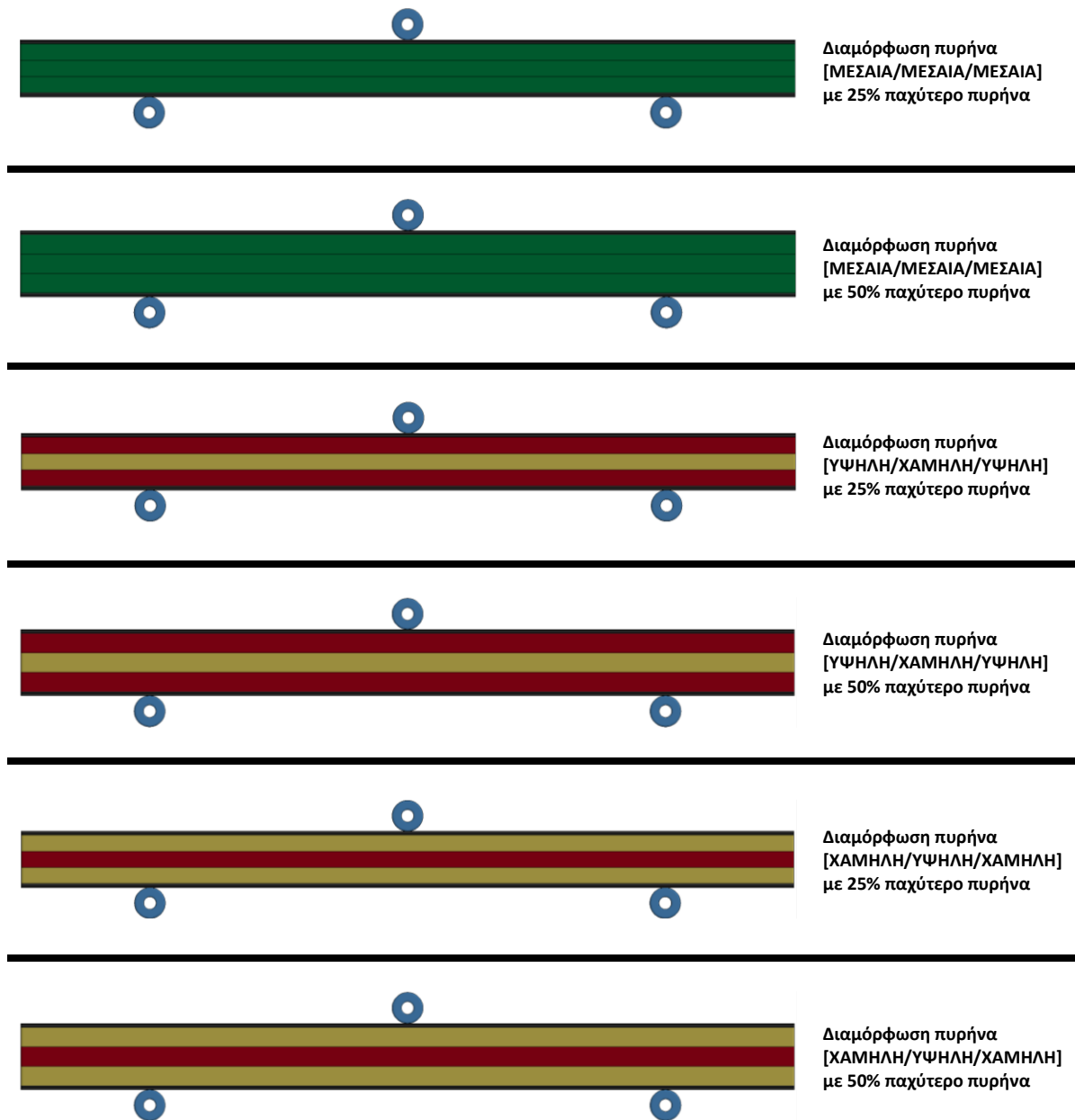
Μία γεωμετρική παράμετρος που θεωρήθηκε ότι αξίζει προσοχής είναι το πάχος των πυρήνων των δοκιμών, ώστε να δειχθεί η επίδραση που έχει όσον αφορά τα φορτία αρχικών αστοχιών σε θλίψη και διάτμηση, τα μέγιστα φορτία που αντέχει η κατασκευή, τη μέγιστη μετατόπιση του κυλίνδρου φόρτισης στην οποία επέρχεται η καταστροφική αστοχία, καθώς και τον τρόπο αλληλεπίδρασης των δύο κυρίαρχων φαινομένων στη μη γραμμική περιοχή του διαγράμματος δύναμης – μετατόπισης, που είναι η τοπική θλίψη (που έχει εκφραστεί με τον αγγλικό όρο indentation) και η διάτμηση. Επιπλέον, δοκιμάστηκαν διαφοροποιήσεις στον τρόπο διαβάθμισης του πυρήνα (gradation), τροποιώντας τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι τρεις (3) αφροί C70.55, C70.75 και C70.90. Παραμένοντας στα πλαίσια που έθεσε το πείραμα πάνω στο οποίο βασίστηκε η αριθμητική μελέτη, η μέση πυκνότητα του πυρήνα σε όλες τις τροποποιημένες περιπτώσεις που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο διατηρήθηκε απολύτως σταθερή στην τιμή των  $80 \text{ kg/m}^3$ . Πιο συγκεκριμένα:

- α. Διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες γεωμετρικές παραμέτρους σταθερές, το **πάχος των αρχικών πυρήνων αυξήθηκε κατά 25% και κατά 50%**, διαμοιράζοντας την αύξηση ισόποσα και στις τρεις (3) στρώσεις αφρών των πειραματικών διατάξεων [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ], [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ], [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ].
- β. Διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες γεωμετρικές παραμέτρους σταθερές, το **πάχος των αρχικών πυρήνων καλύφθηκε από έξι (6) στρώσεις αφρών, με ίσα πάχη**, χρησιμοποιώντας και τους τρεις αφρούς, C70.55, C70.75 και C70.90. Με τον τρόπο αυτό σχηματίστηκαν **δύο (2) συμμετρικές διαμορφώσεις**, η [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ] και η [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ]. Οι δύο αυτές νέες διαμορφώσεις εξετάστηκαν **και με αυξημένο πάχος πυρήνα**, στα πρότυπα της ανωτέρω αναφερόμενης περίπτωσης (α), **κατά 25% και 50%**.
- γ. Διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες γεωμετρικές παραμέτρους σταθερές, **το πάχος των αρχικών πυρήνων καλύφθηκε από τρεις (3) στρώσεις αφρών**, με ίσα πάχη

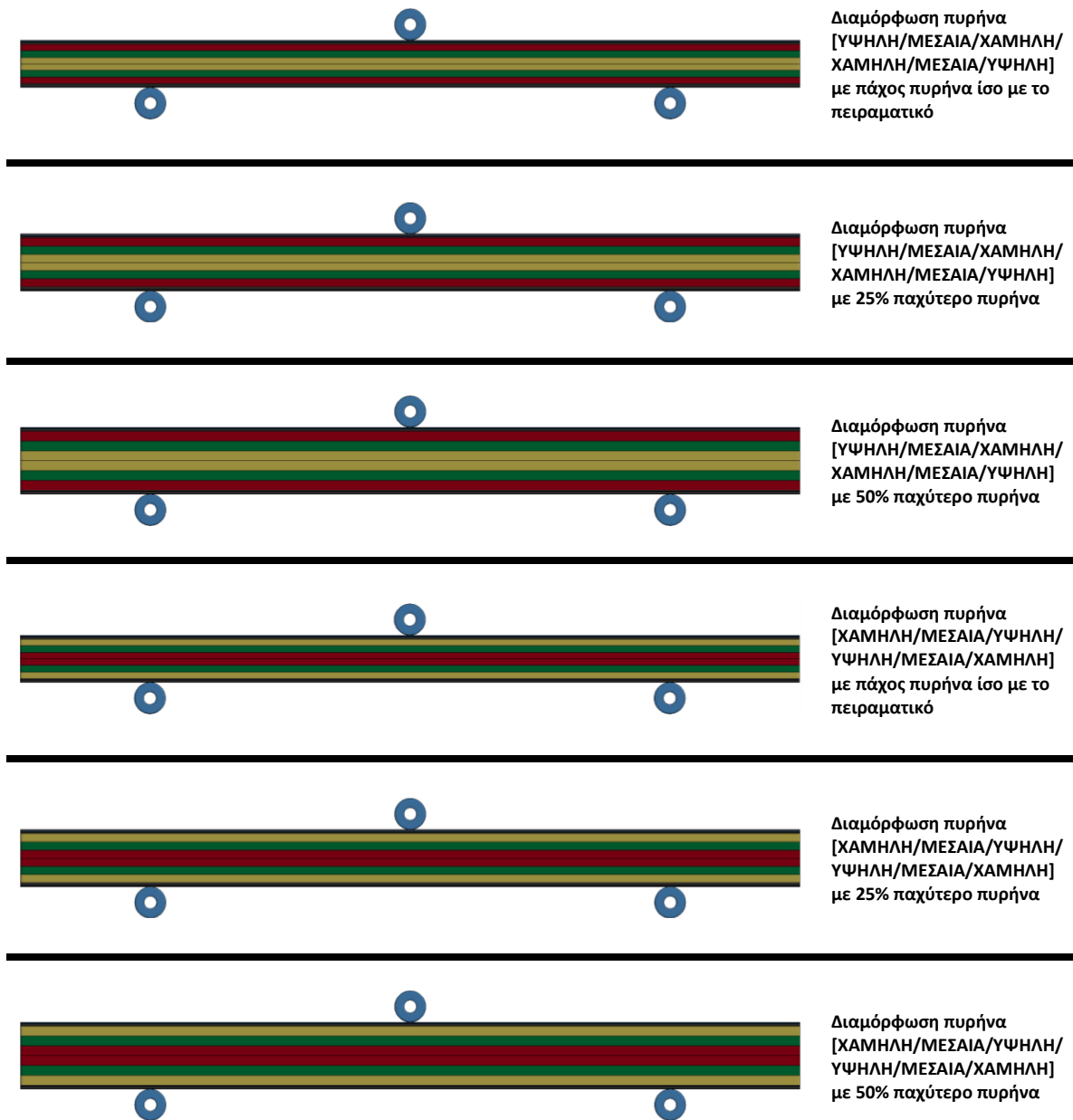
χρησιμοποιώντας και τους τρεις (3) αφρούς C70.55, C70.75 και C70.90. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάστηκαν **δύο (2) ασύμμετρες διαμορφώσεις**, η **[ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ]** και η **[ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ]**. Οι δύο αυτές νέες διαμορφώσεις εξετάστηκαν **και με αυξημένο πάχος πυρήνα**, στα πρότυπα της ανωτέρω αναφερόμενης περίπτωσης (α), **κατά 25% και 50%**.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση του πάχους των πυρήνων δεν παραβιάζει τους γεωμετρικούς περιορισμούς που τίθενται από το πρότυπο ASTM C393 [8] βάσει του οποίου εκτελέστηκαν οι πειραματικές δοκιμές.

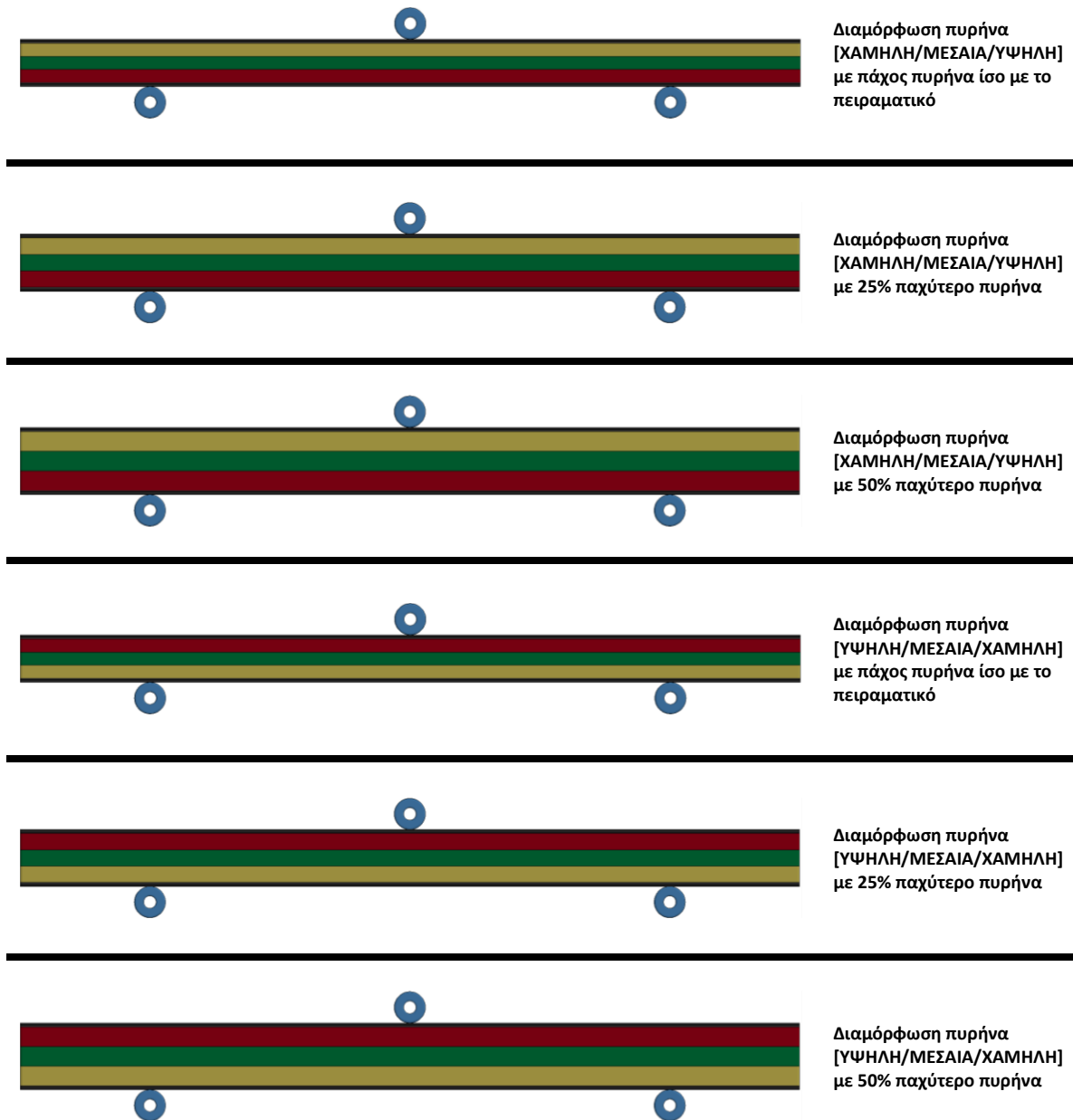
Στα σχήματα που ακολουθούν, οι ανωτέρω περιγραφόμενες διαμορφώσεις πυρήνων απεικονίζονται και σχηματικά, για καλύτερη εποπτική κατανόηση.



Σχήμα 5.1: Τροποποιημένες διαμορφώσεις πυρήνων, με αύξηση του αρχικού πάχους κατά 25% και 50%.



Σχήμα 5.2: Τροποποιημένες διαμορφώσεις πυρήνων, με μεταβολή του τρόπου διαβάθμισης (gradation) (χρήση έξι στρωμάτων αφρού, με συμμετρική διάταξη).



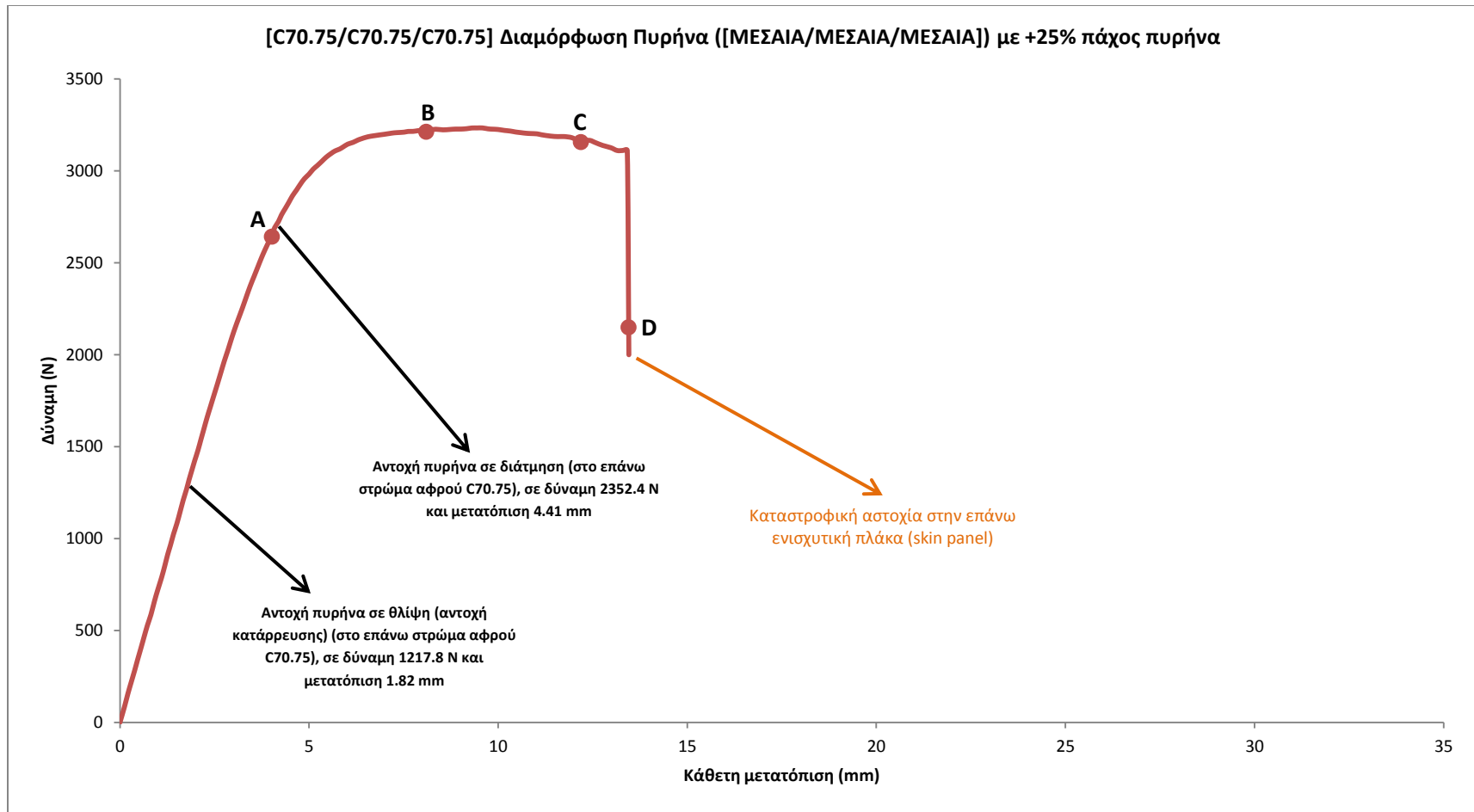
Σχήμα 5.3: Τροποποιημένες διαμορφώσεις πυρήνων, με μεταβολή του τρόπου διαβάθμισης (gradation) (χρήση τριών στρωμάτων αφρού, με ασύμμετρη διάταξη).

Υπενθυμίζεται ότι στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) διαφορετικοί συνδυασμοί υλικών για τις ενισχυτικές πλάκες (skin panels) και τα στρώματα αφρού, οι MAT\_22 – MAT\_26 και MAT\_54 – MAT\_26. Τα αποτελέσματα έδειξαν σχετικά μικρές διαφορές στην προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων, οι οποίες αφορούσαν βασικά τα τελικά επίπεδα καταστροφικής αστοχίας, όταν αυτή συνέβαινε στις ενισχυτικές πλάκες (skin panels). Επίσης, στις δύο διαβαθμισμένες (graded) διαμορφώσεις [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] και [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ], όταν

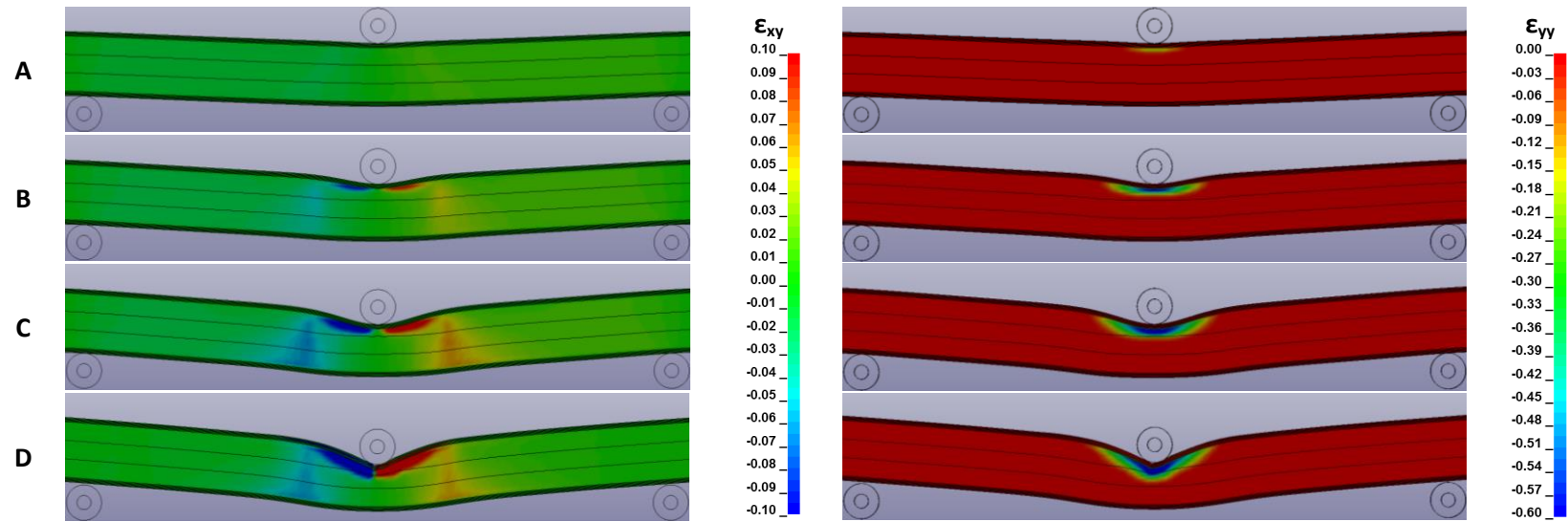
χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των αντοχών των αφρών σε θλίψη και διάτμηση, τα αριθμητικά μοντέλα εξήγαγαν υψηλότερες τιμές φορτίων, της τάξης του 10 και 15% αντίστοιχα. Οπότε, κρίνοντας ότι μια πιθανή αλλά όχι βέβαια αιτία για αυτό είναι οι μηχανικές ιδιότητες των αφρών, χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικά και οι ελάχιστες τιμές αντοχής σε θλίψη και διάτμηση των εν λόγω αφρών, μειώνοντας τα επίπεδα φορτίσεων σε σχέση με την περίπτωση των μέσων τιμών αντοχής. Ο σκοπός του παρόντος Κεφαλαίου ωστόσο, είναι να δώσει μια κατευθυντήρια οπτική ποιοτικού χαρακτήρα σχετικά με τη συμπεριφορά κάποιων επιπλέον κατασκευών sandwich. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε να επιλυθούν τα αριθμητικά μοντέλα των επιπλέον κατασκευών sandwich μόνο για το συνδυασμό μοντέλων υλικών MAT\_22 – MAT\_26, χρησιμοποιώντας μόνο τις μέσες τιμές αντοχών σε θλίψη και διάτμηση. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται επαρκής για να εξαχθούν τα απαραίτητα ποιοτικά συμπεράσματα.

Ακολούθως παρουσιάζονται αποτελέσματα παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, για όλες τις διαμορφώσεις πυρήνων των Σχημάτων 5.1, 5.2 και 5.3.

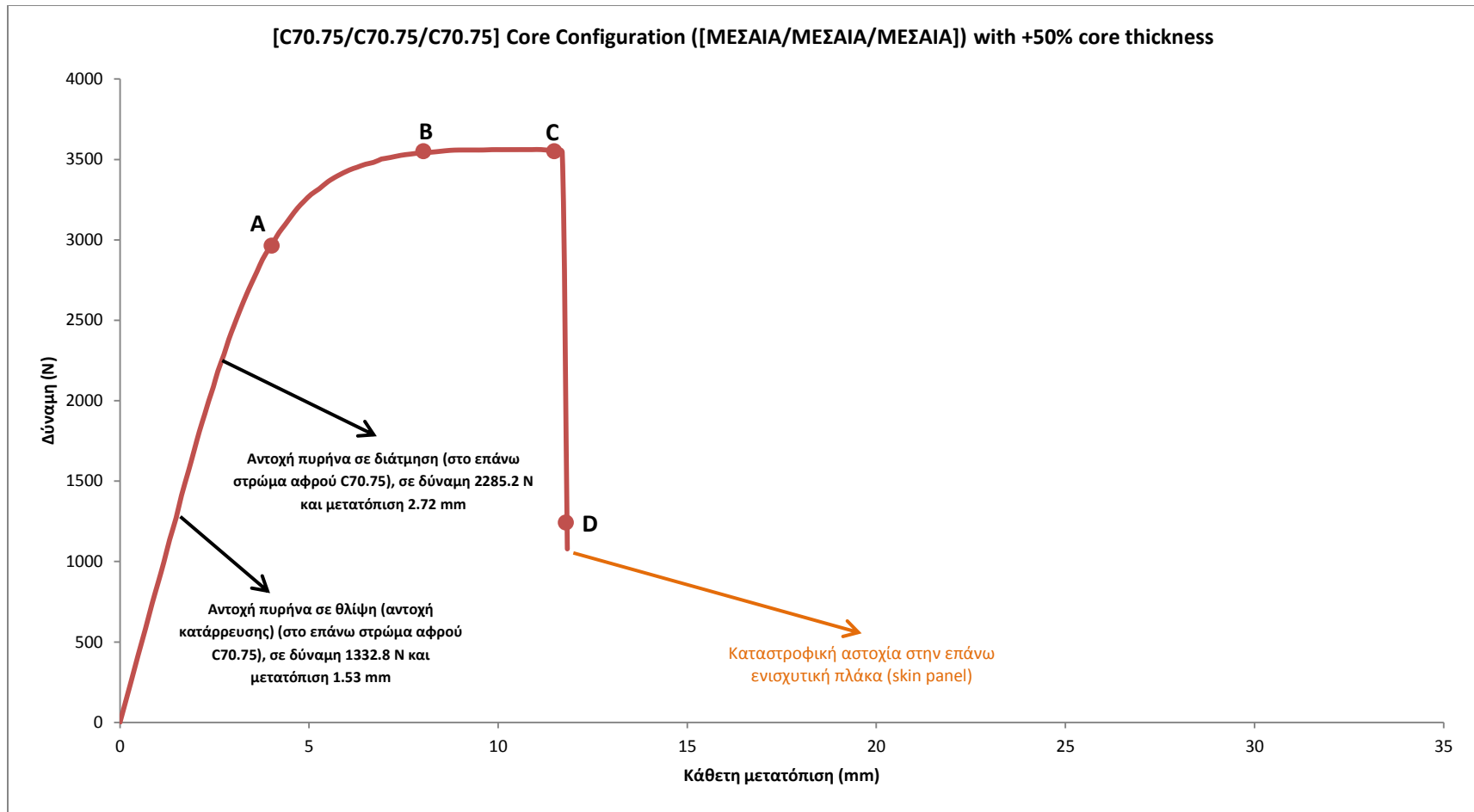




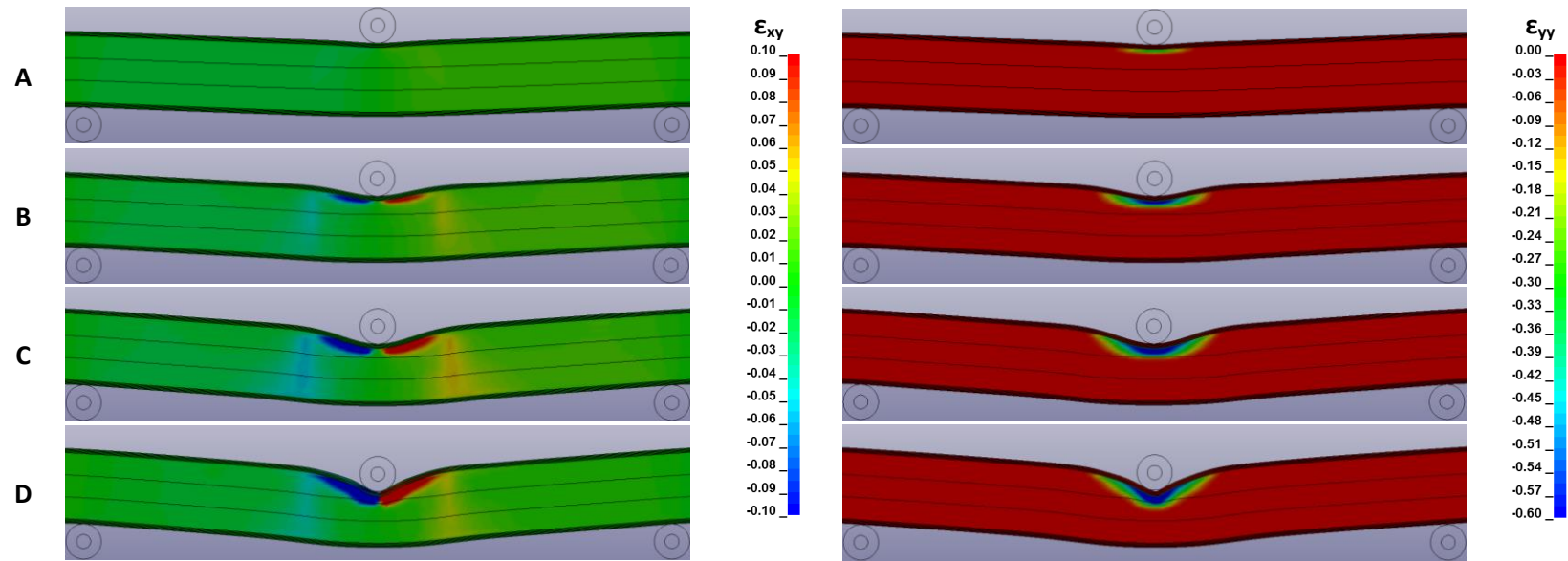
Σχήμα 5.4: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για ομοιογενή διαμόρφωση πυρήνα [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ], με αύξηση του αρχικού πάχους του πυρήνα κατά 25%.



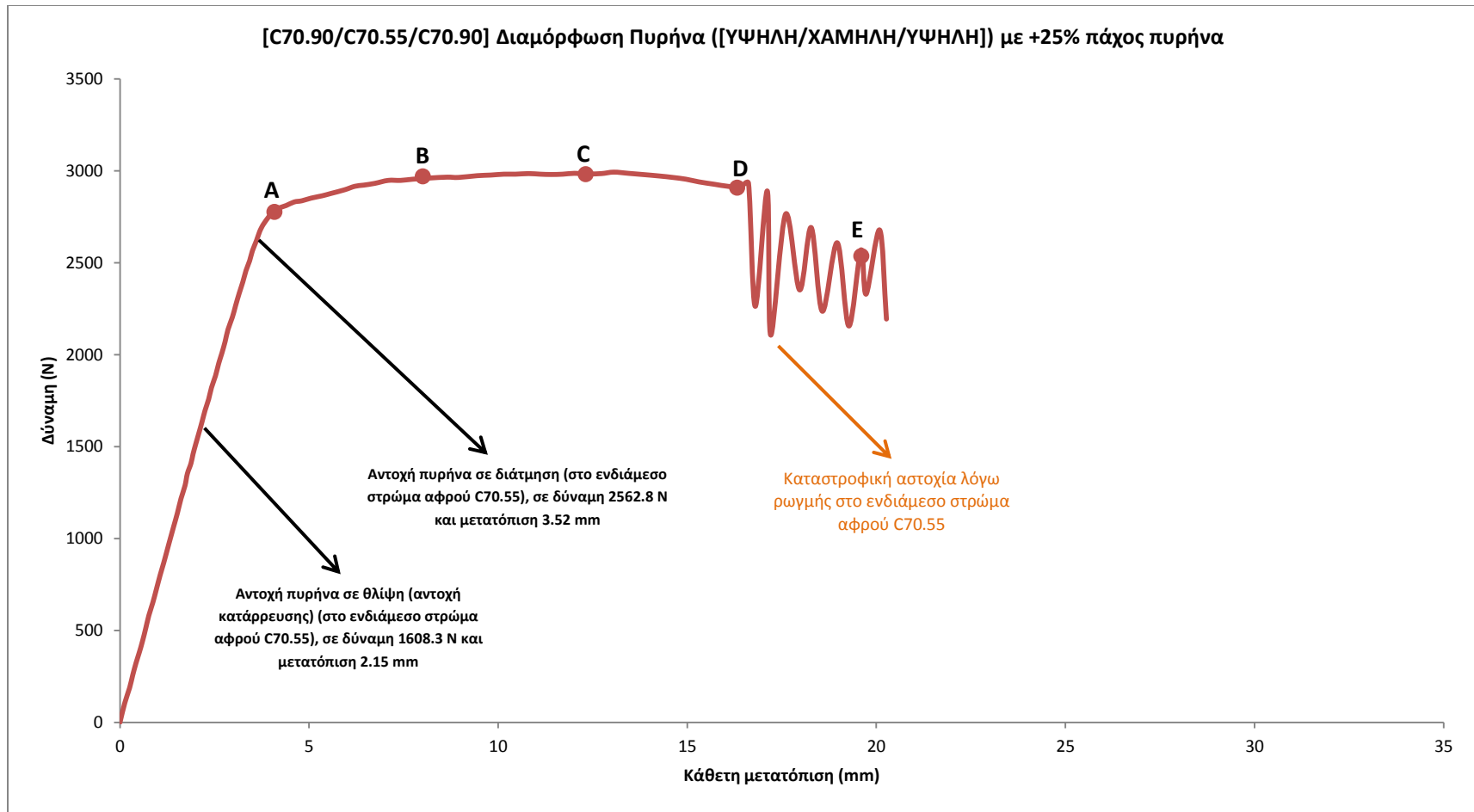
Σχήμα 5.5: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για ομοιογενή διαμόρφωση [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



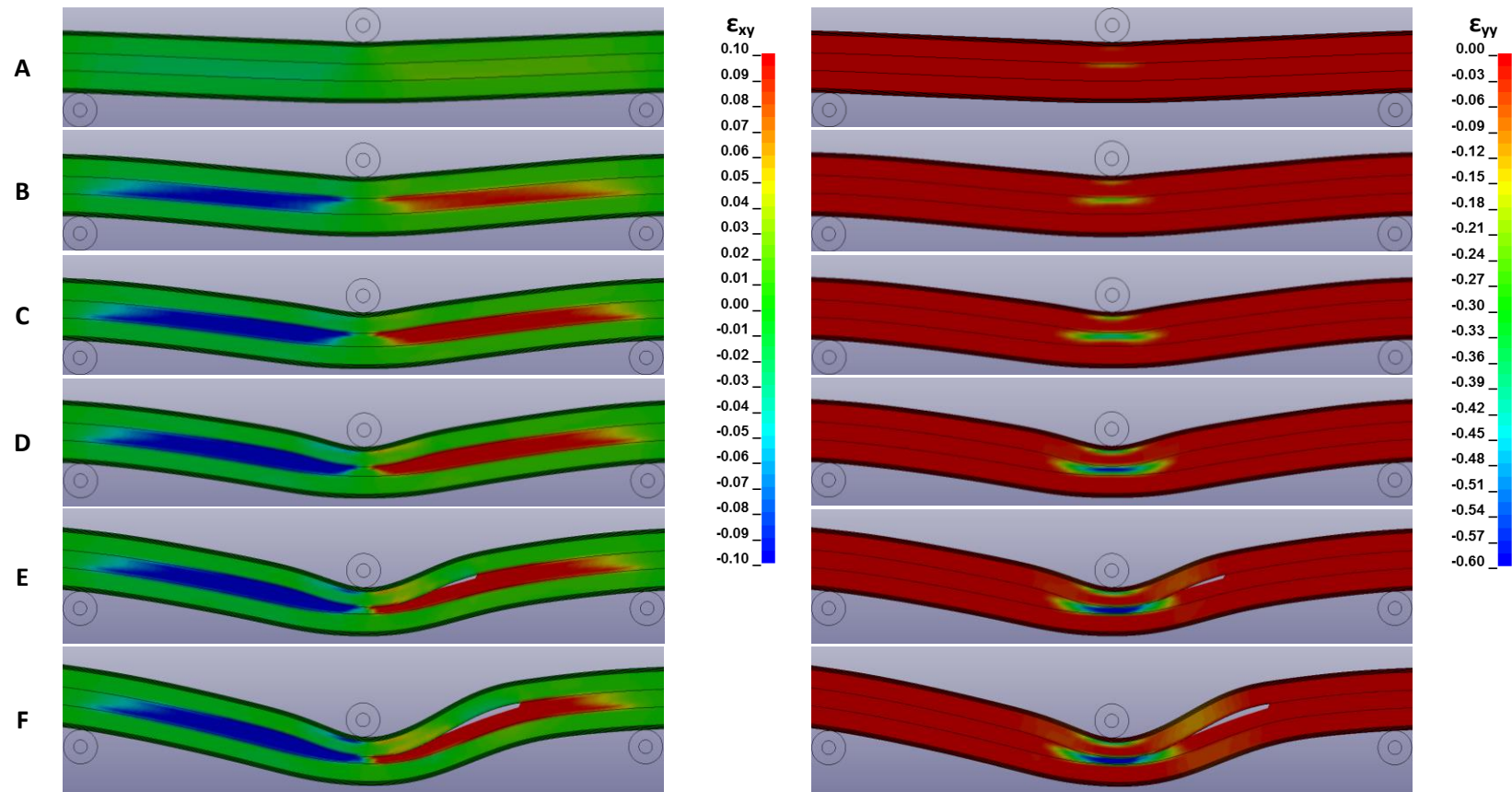
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για ομοιογενή διαμόρφωση πυρήνα [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ], με αύξηση του αρχικού πάχους του πυρήνα κατά 50%.



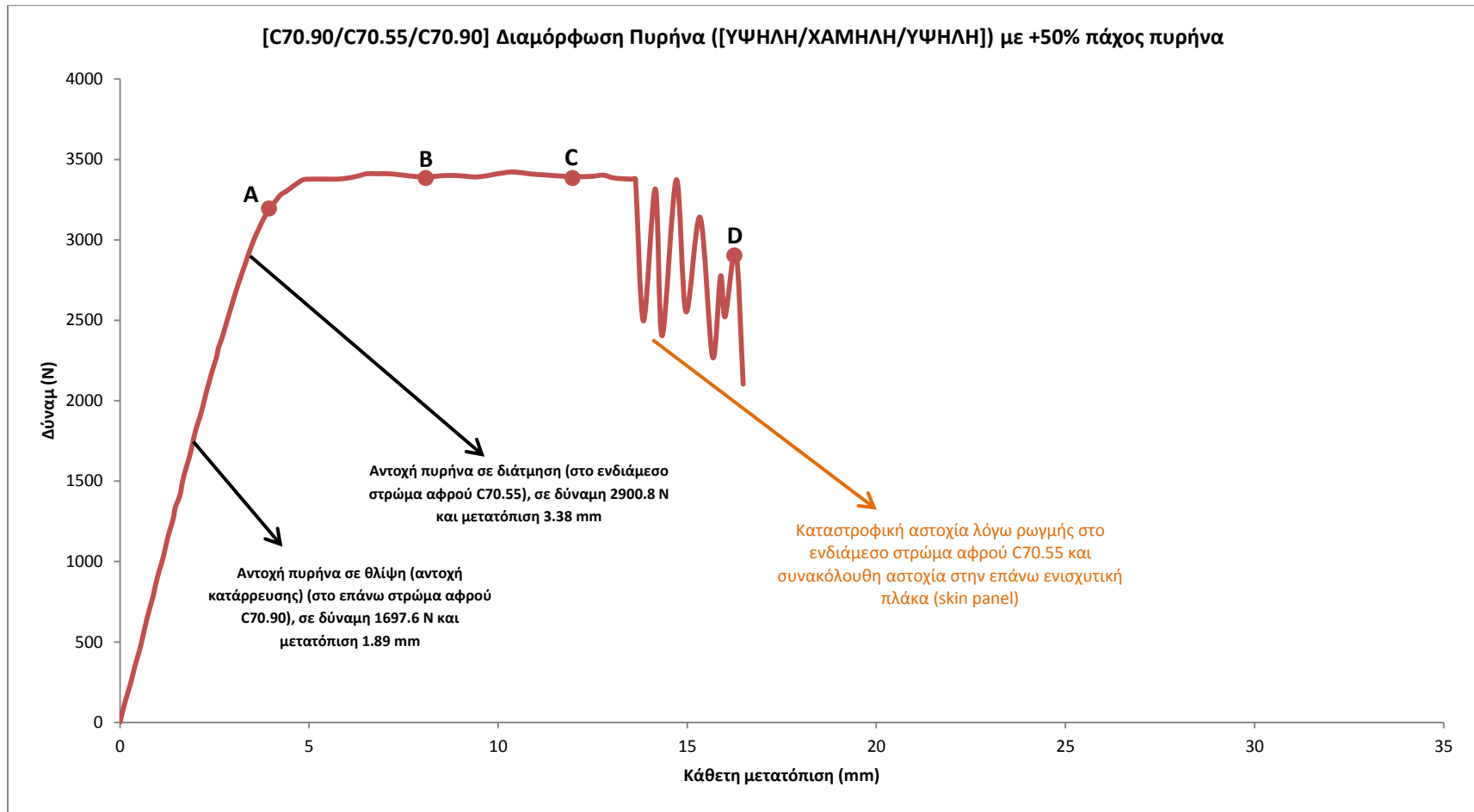
Σχήμα 5.7: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για ομοιογενή διαμόρφωση [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



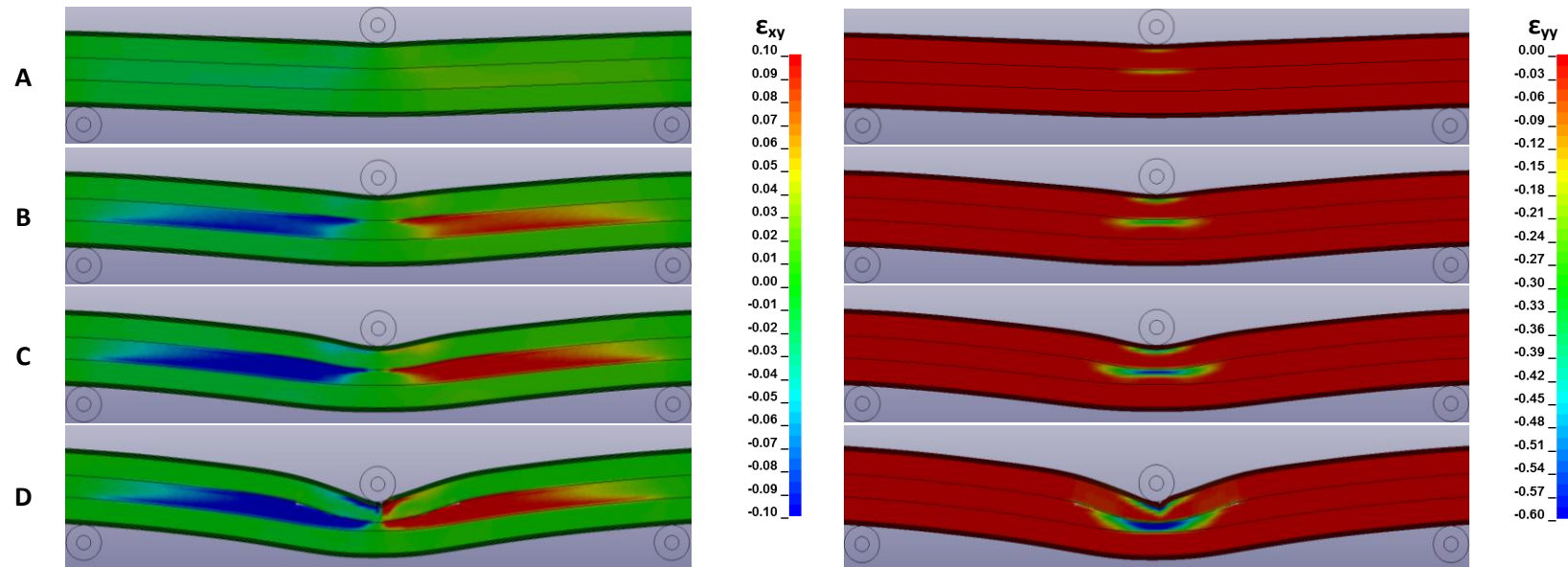
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ], με αύξηση του αρχικού πάχους του πυρήνα κατά 25%.



Σχήμα 5.9: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.

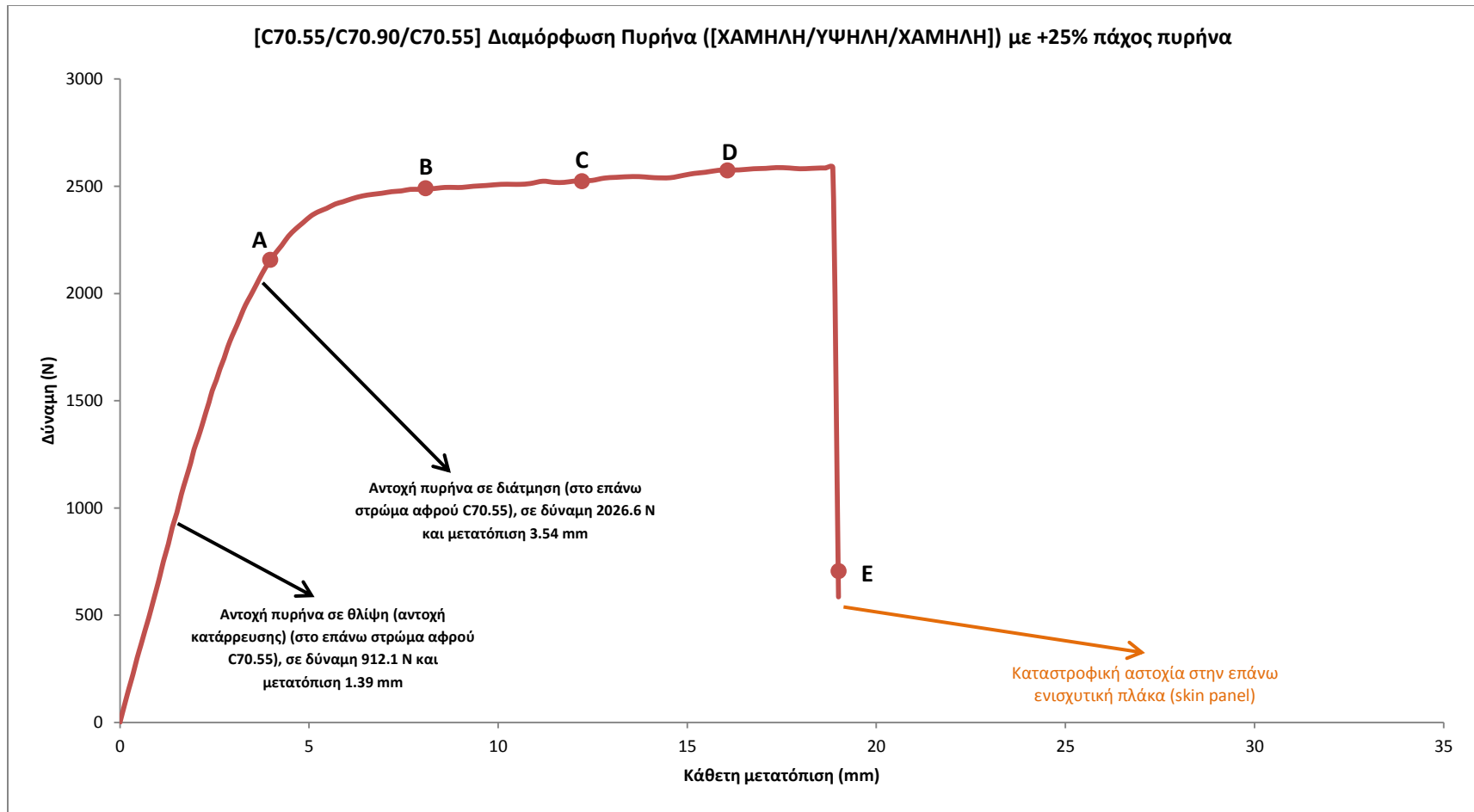


Σχήμα 5.10: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ], με αύξηση του αρχικού πάχους του πυρήνα κατά 50%.

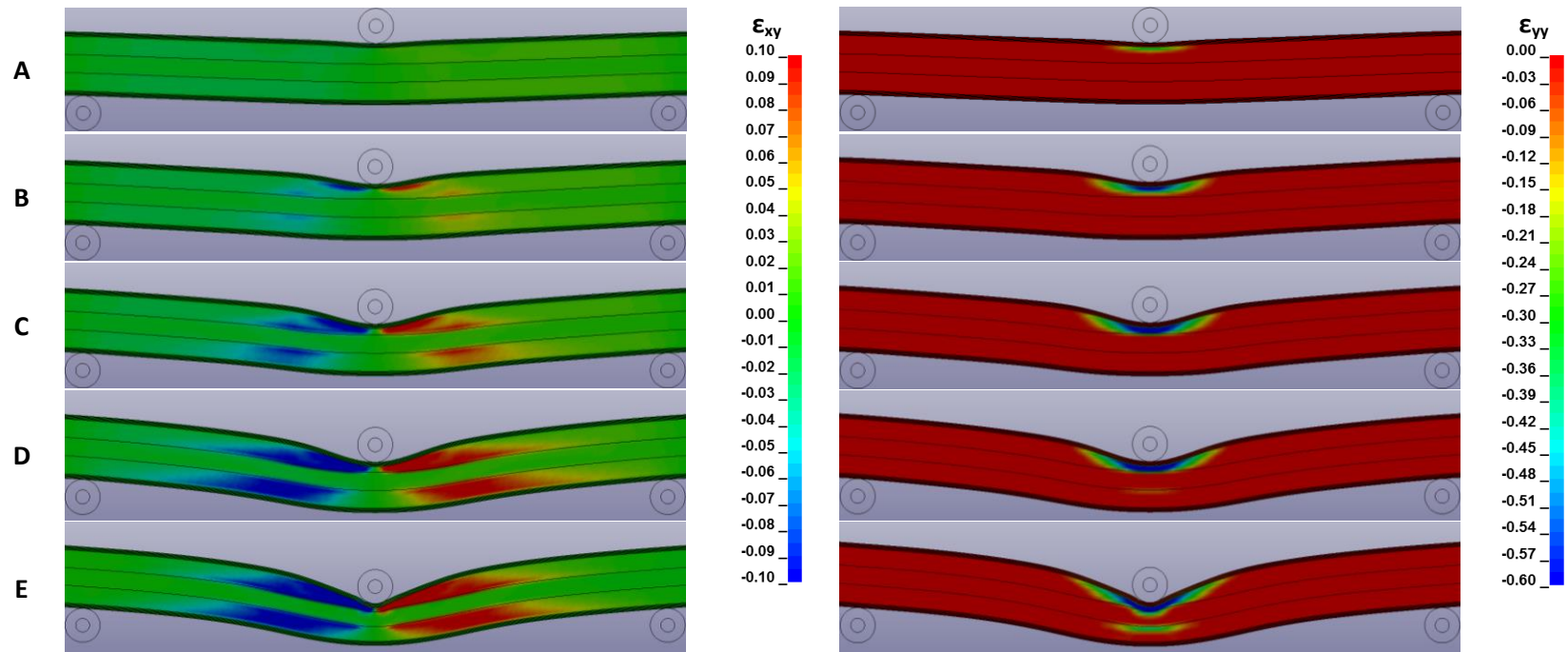


Σχήμα 5.11: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.

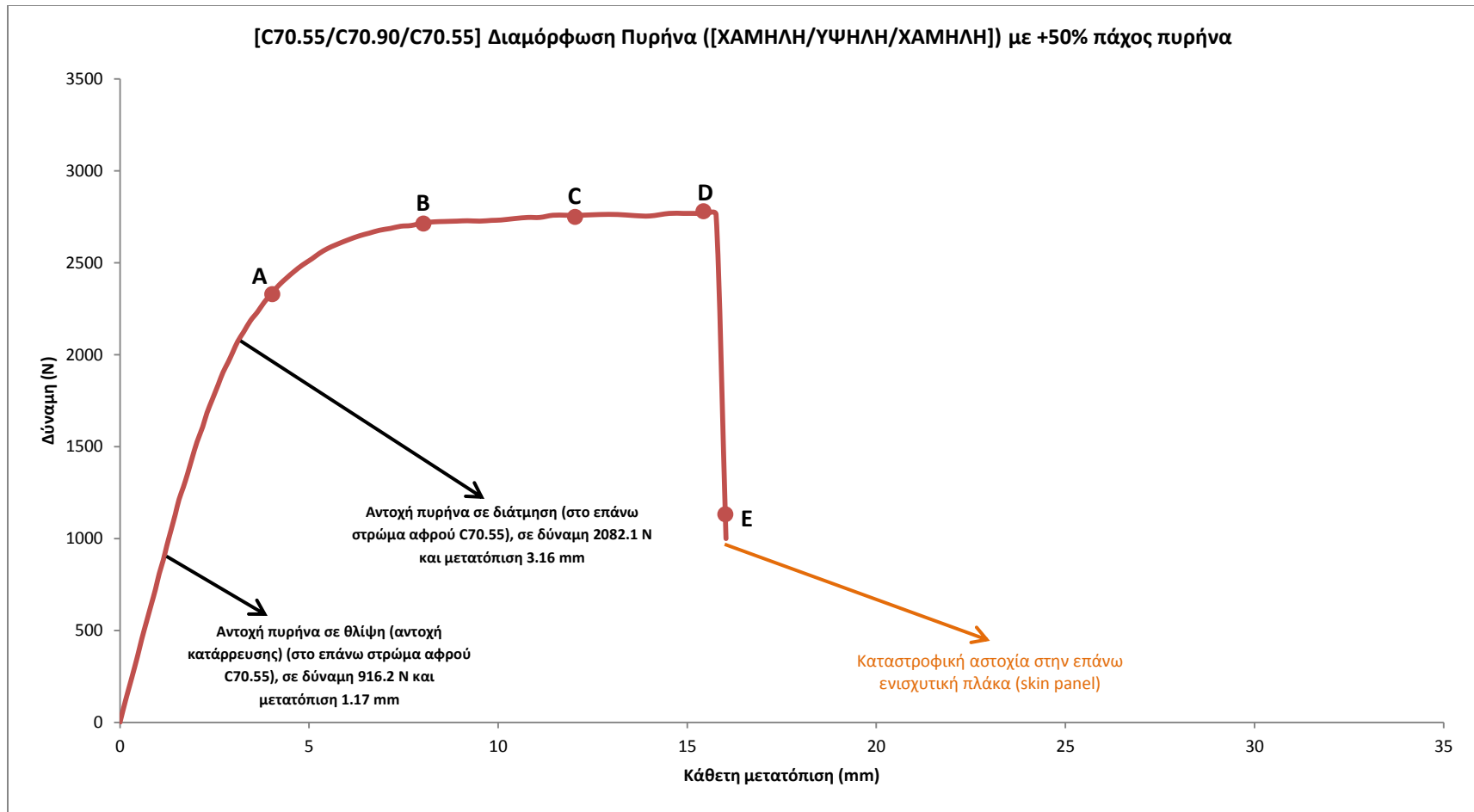




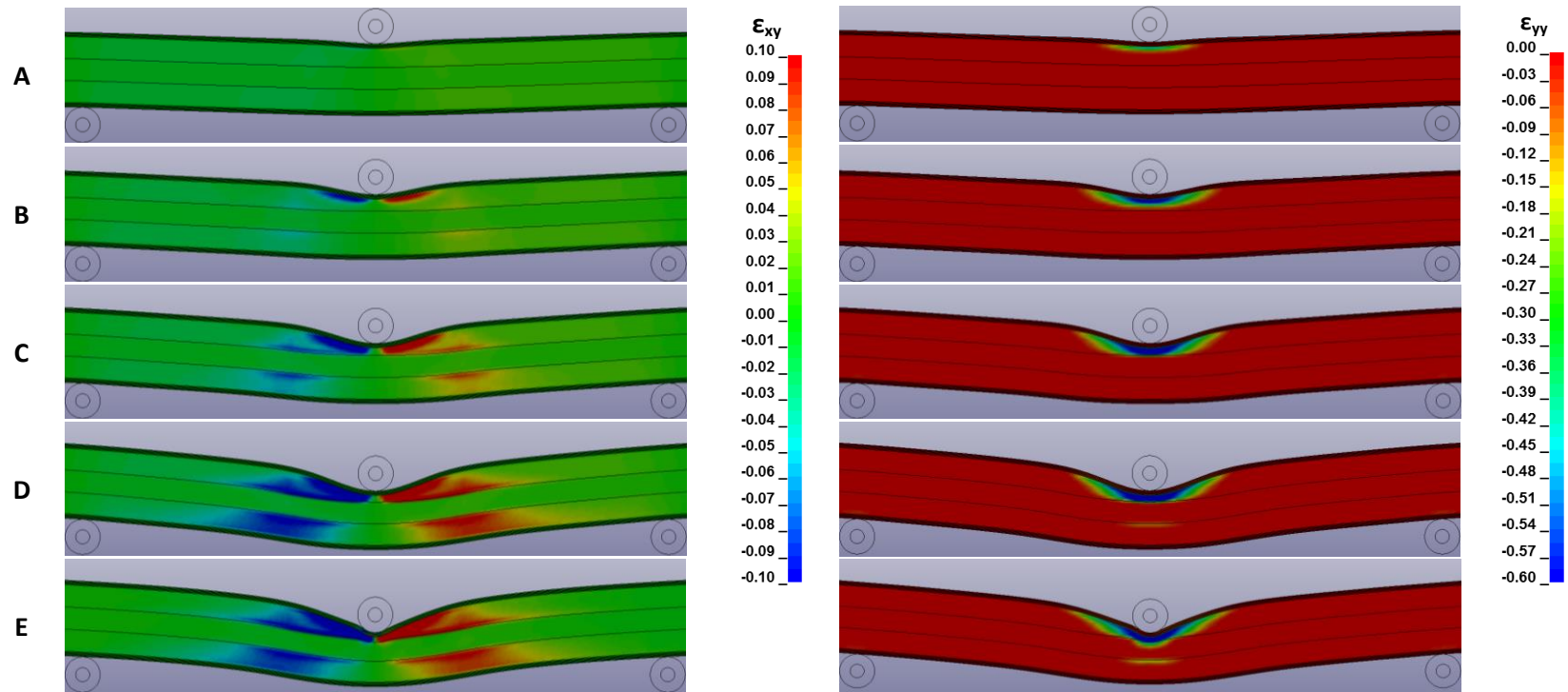
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ], με αύξηση του αρχικού πάχους του πυρήνα κατά 25%.



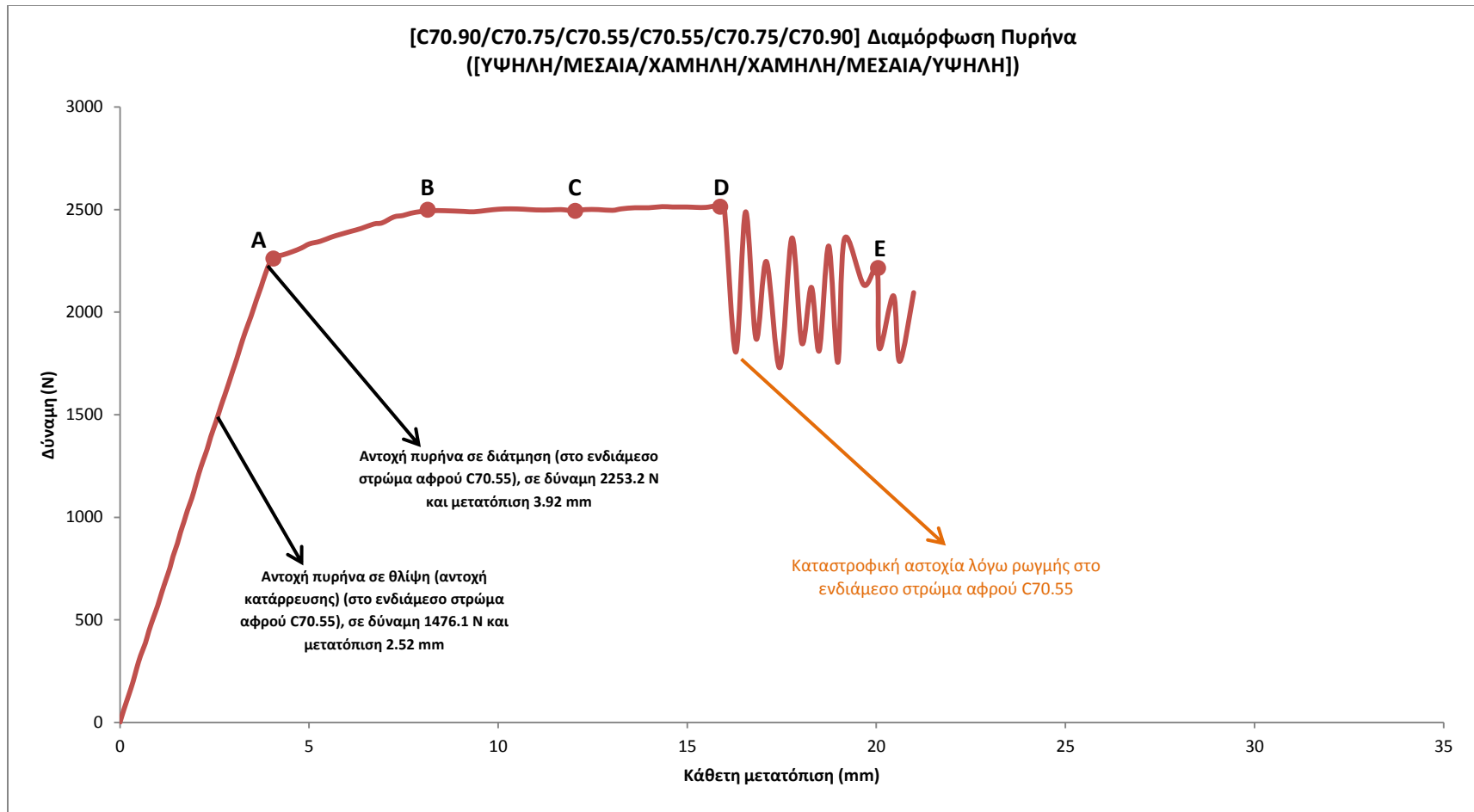
Σχήμα 5.13: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



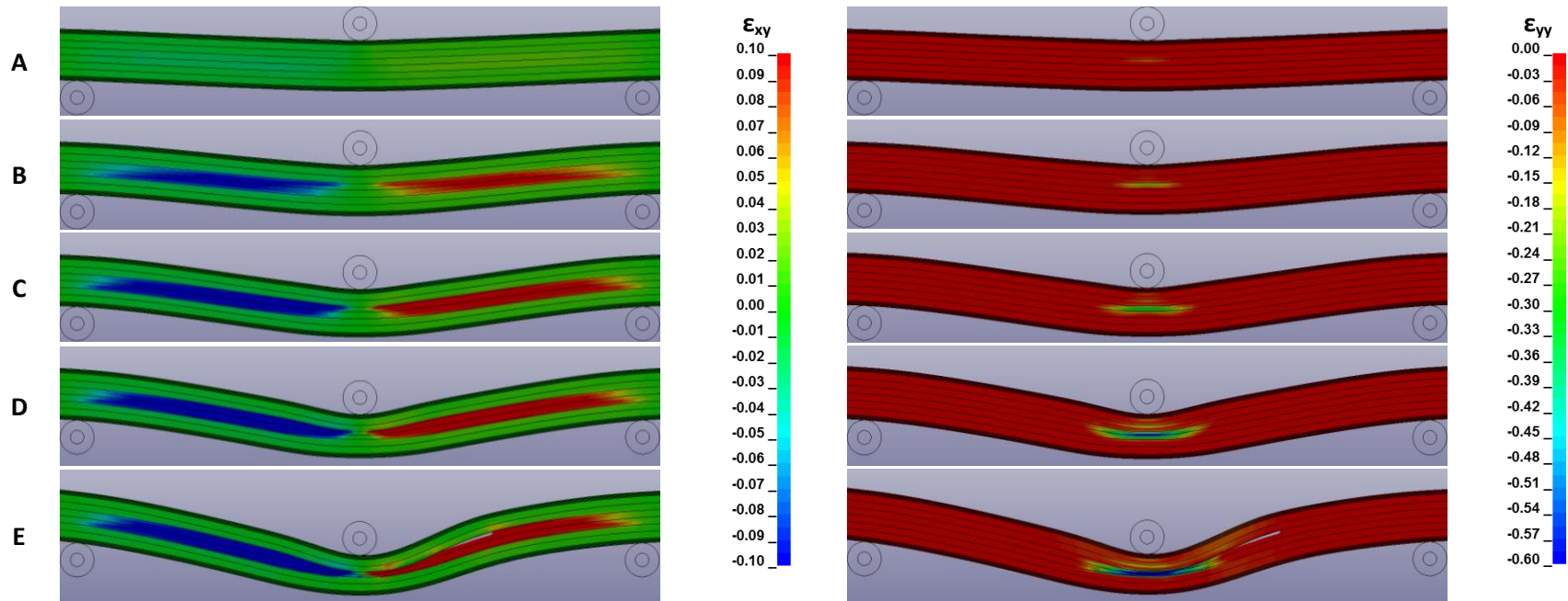
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ], με αύξηση του αρχικού πάχους του πυρήνα κατά 50%.



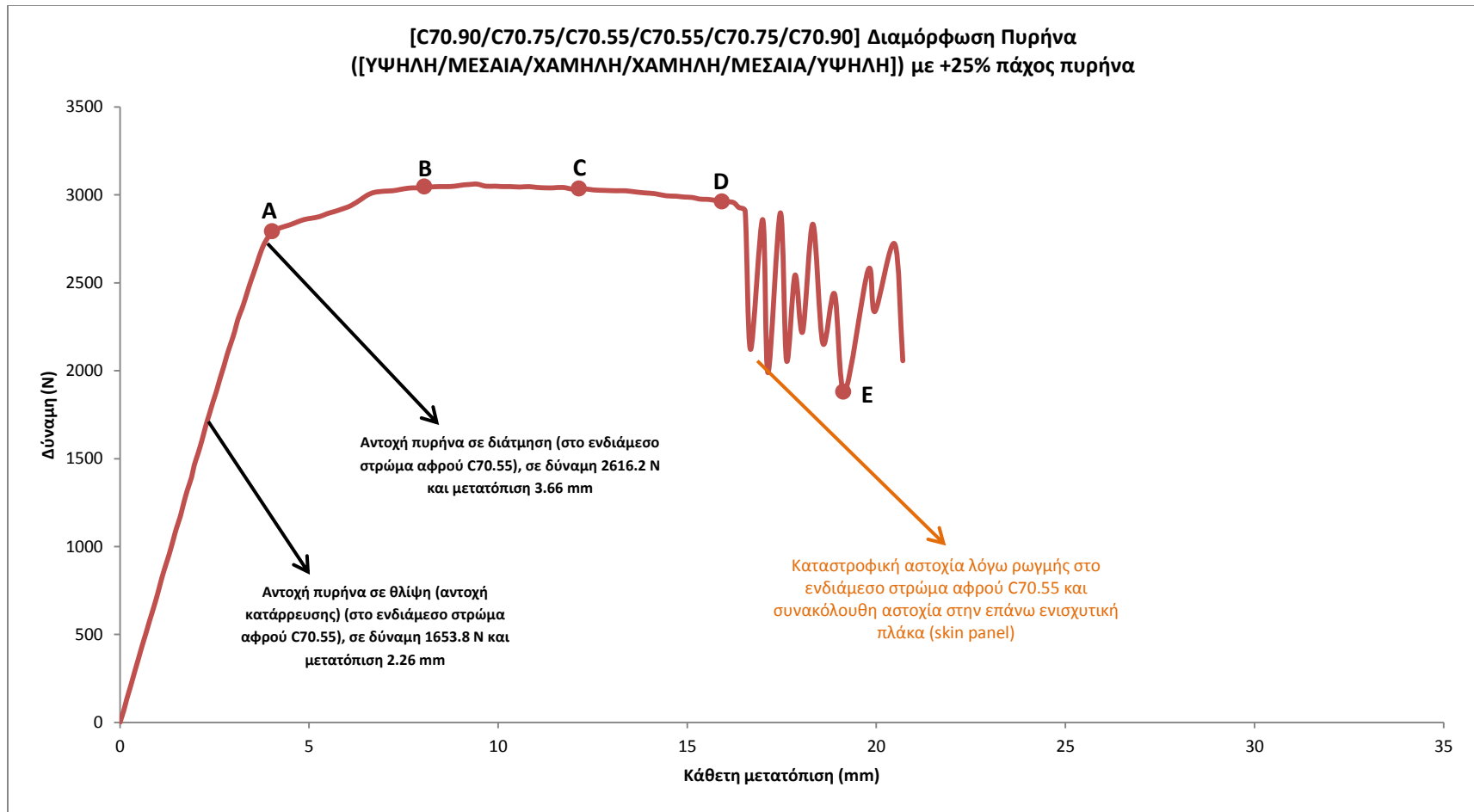
Σχήμα 5.15: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



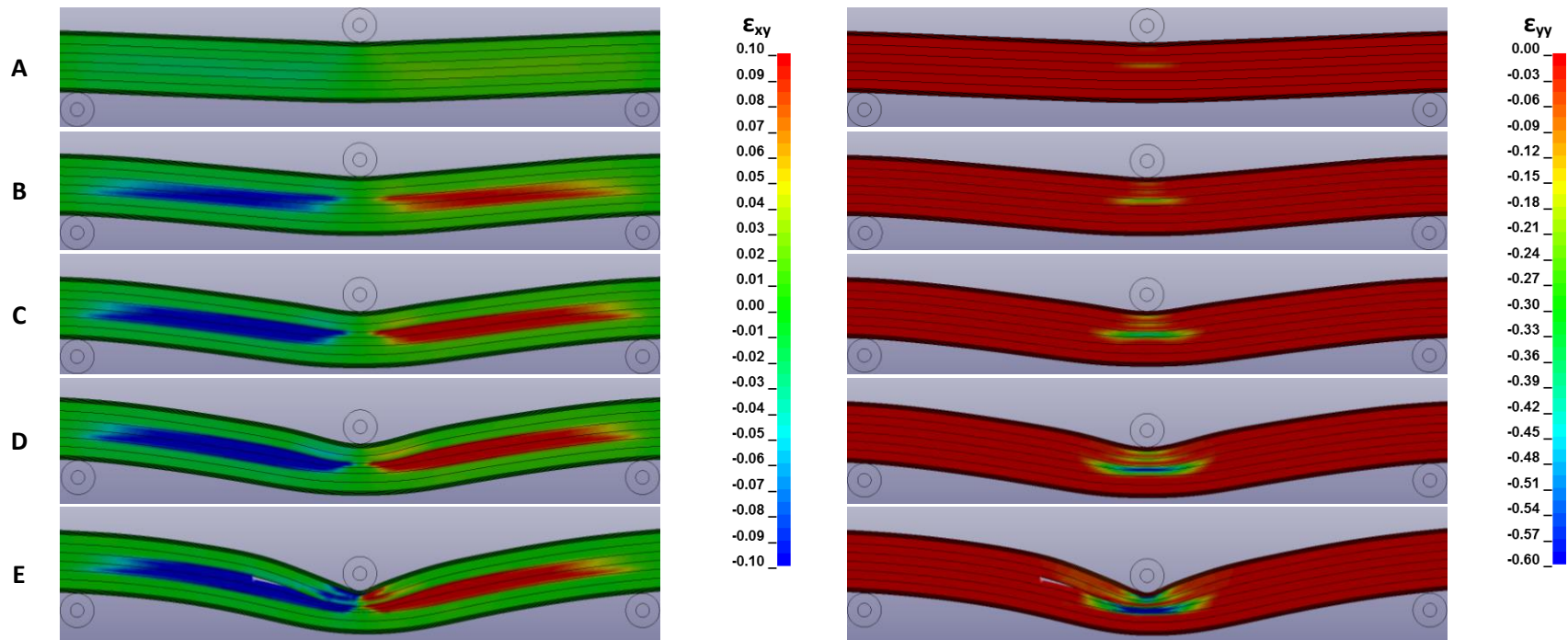
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ], με πάχος πυρήνα ίσο με το αρχικό.



Σχήμα 5.17: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ] με πάχος πυρήνα ίσο με το αρχικό, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.

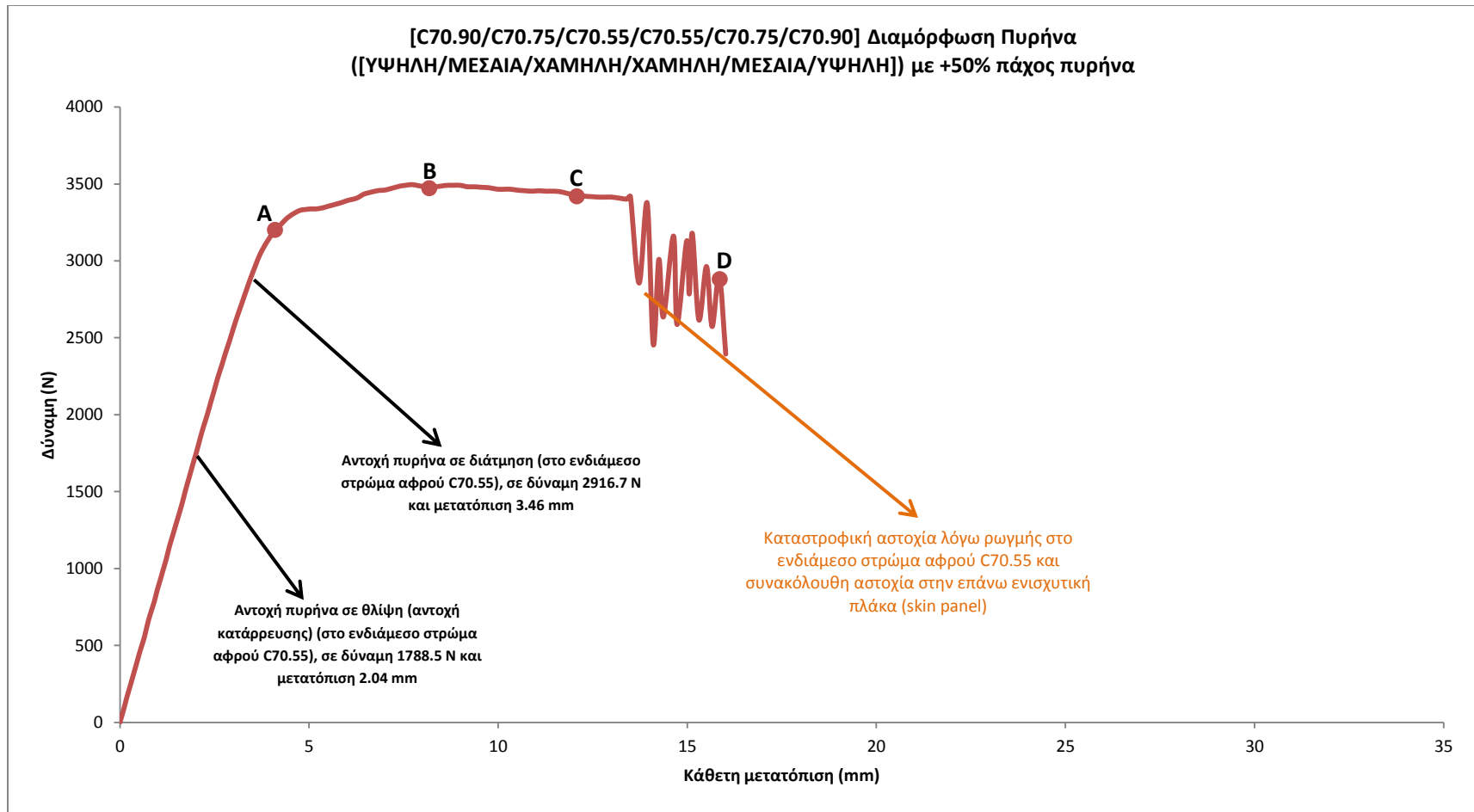


Σχήμα 5.18: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ], με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%.

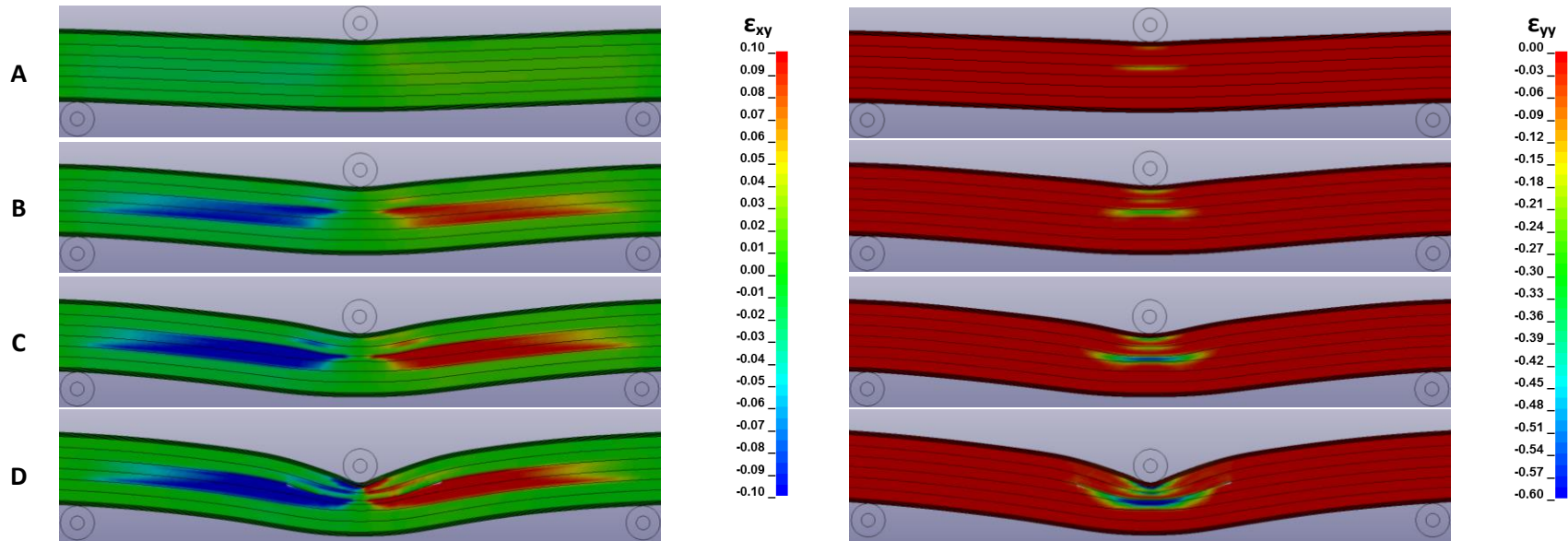


Σχήμα 5.19: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.

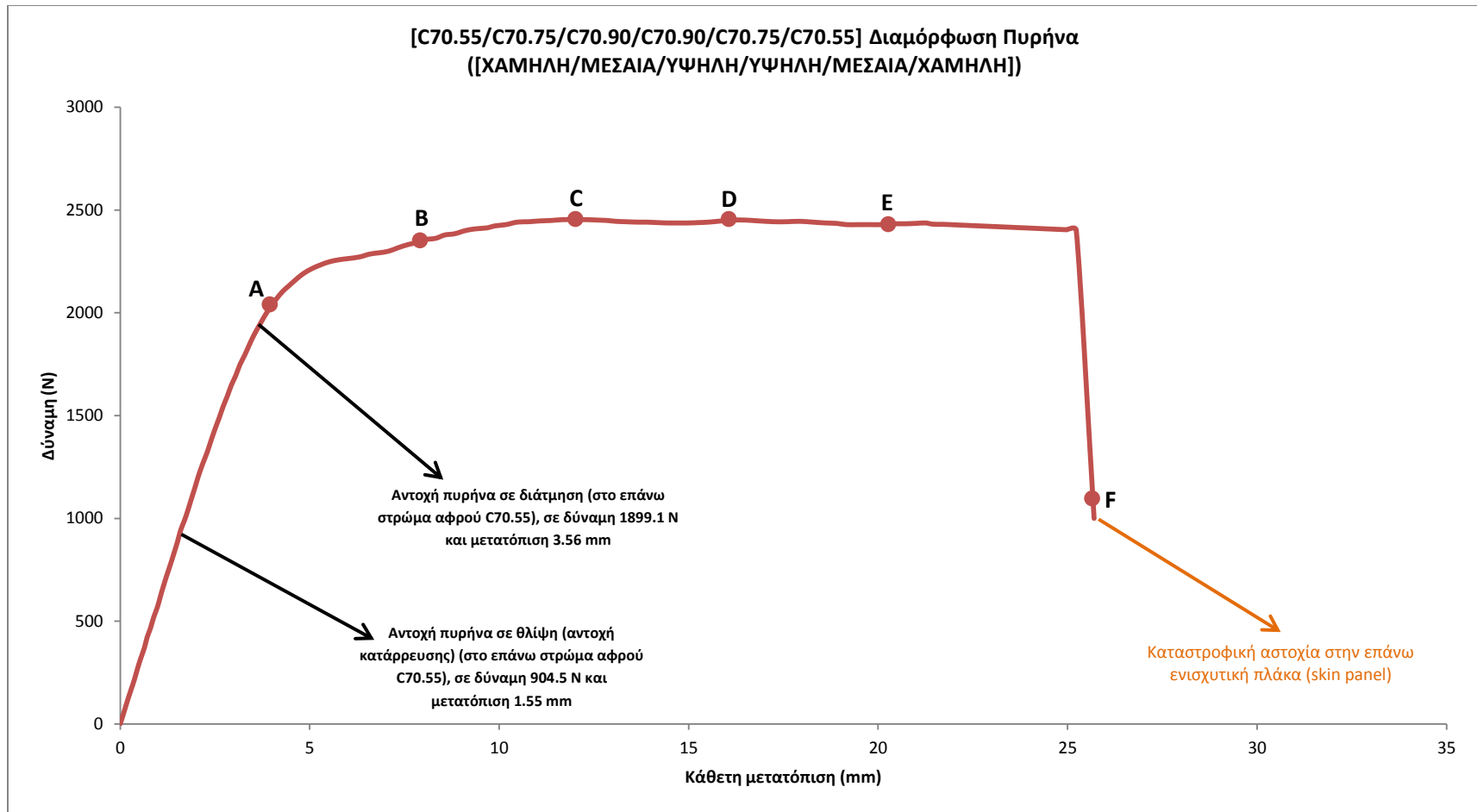




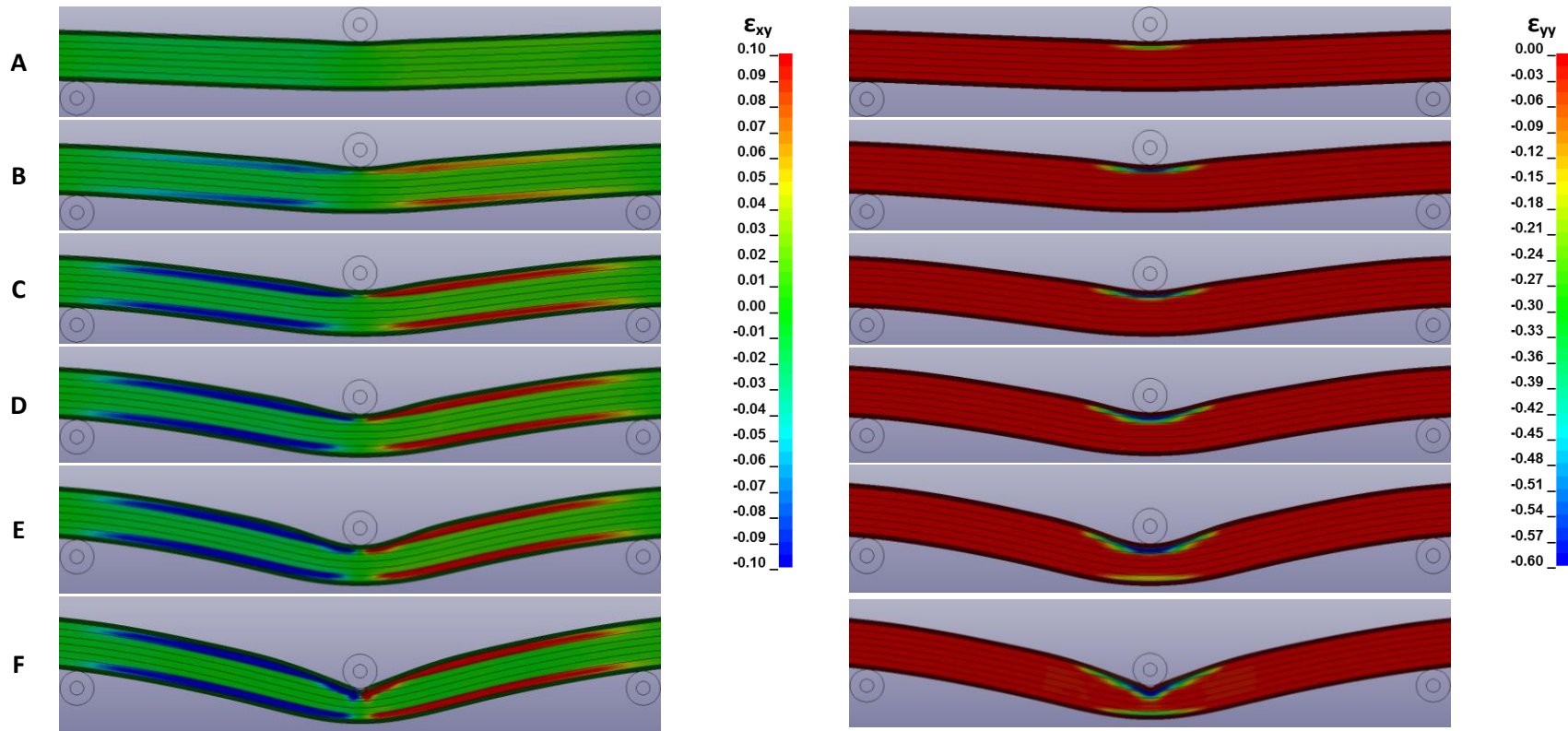
Σχήμα 5.20: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ], με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%.



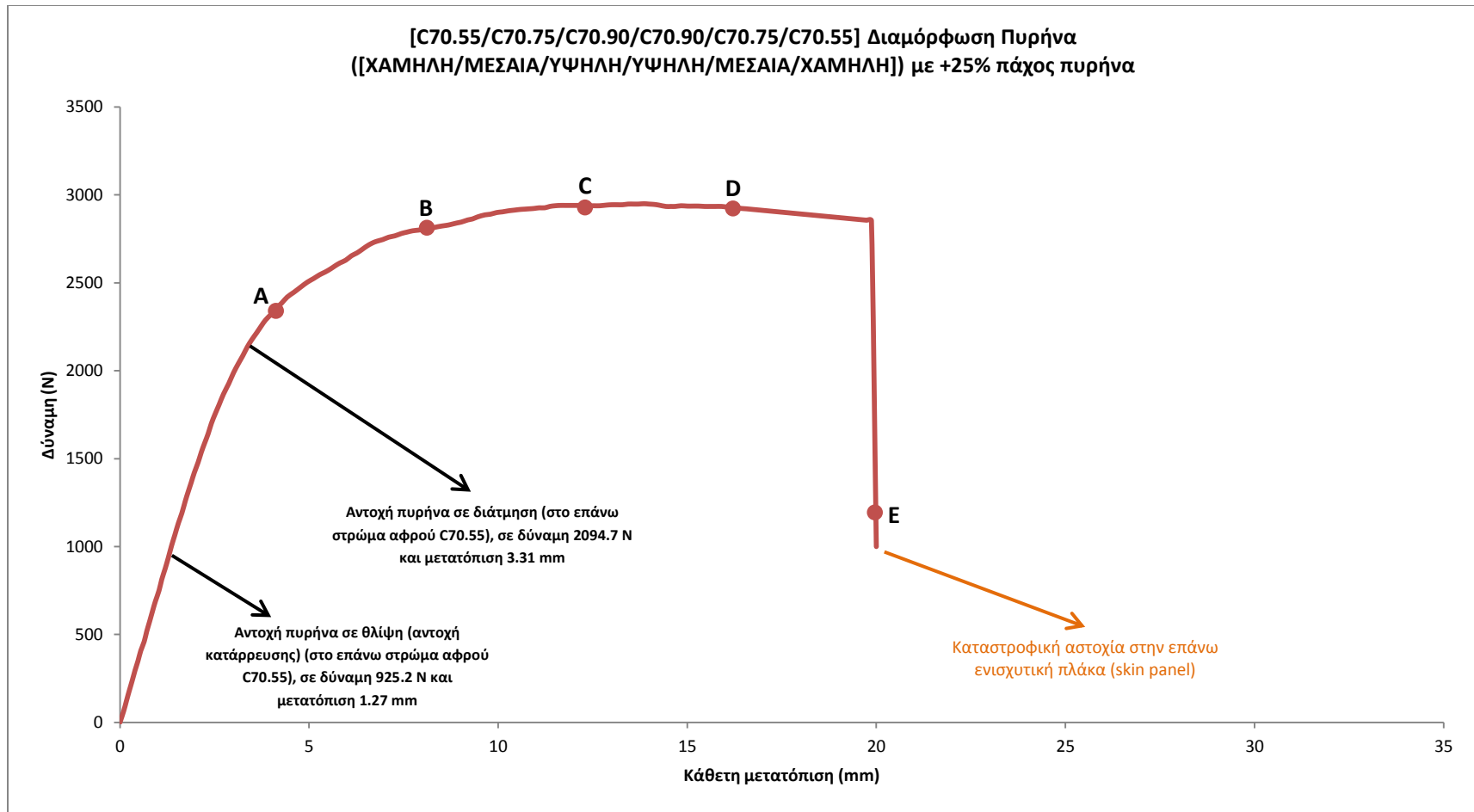
Σχήμα 5.21: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



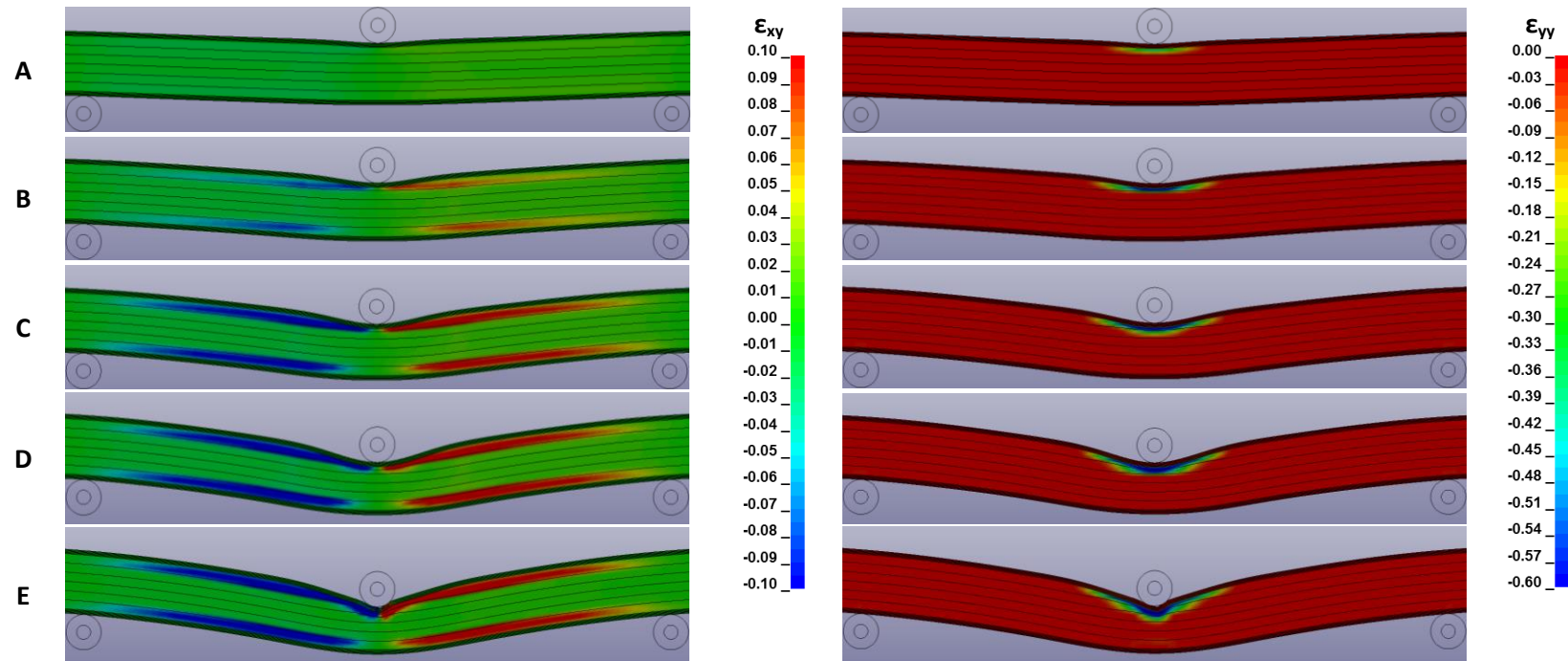
Σχήμα 5.22: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ], με πάχος πυρήνα ίσο με το αρχικό.



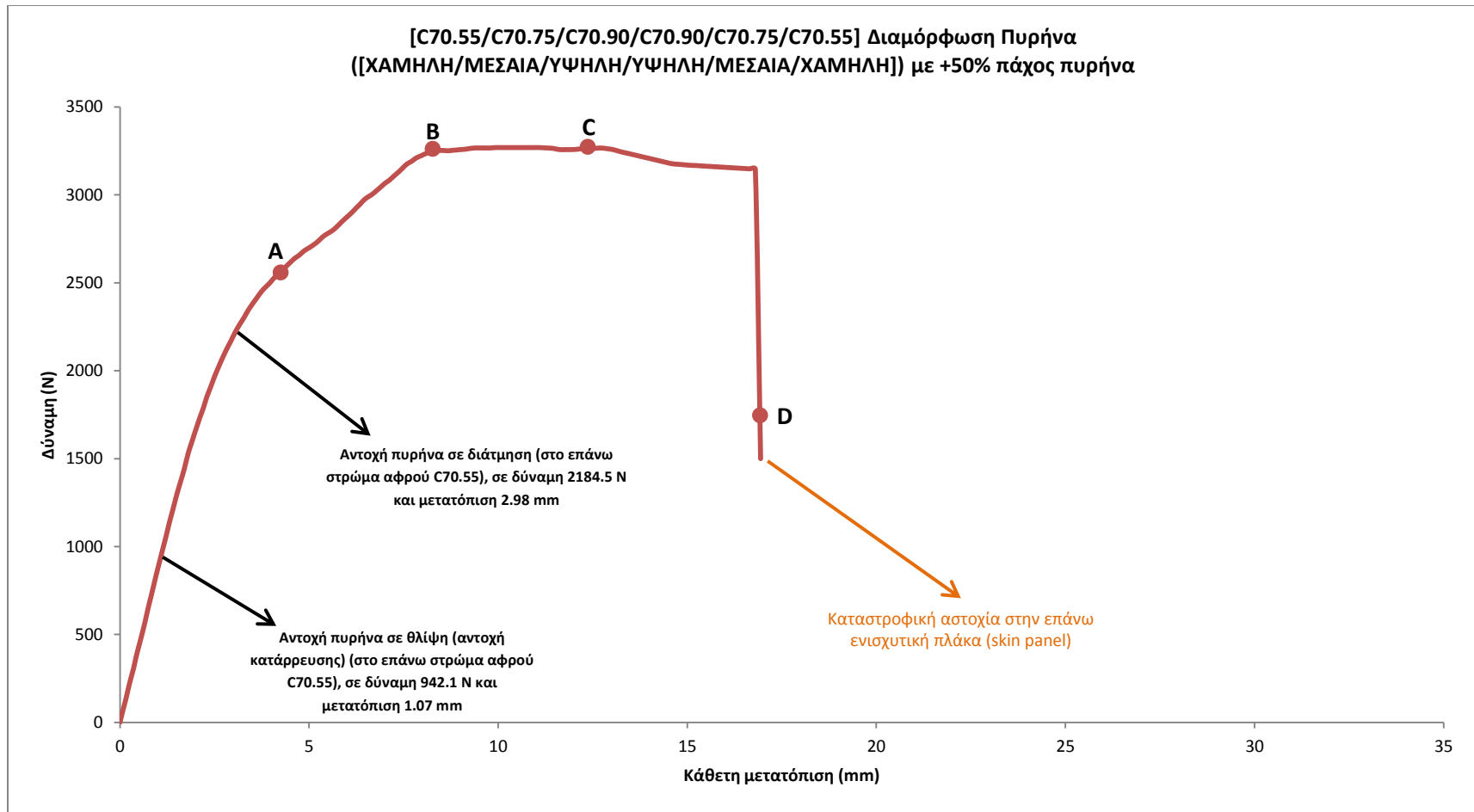
Σχήμα 5.23: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] με πάχος πυρήνα ίσο με το αρχικό, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



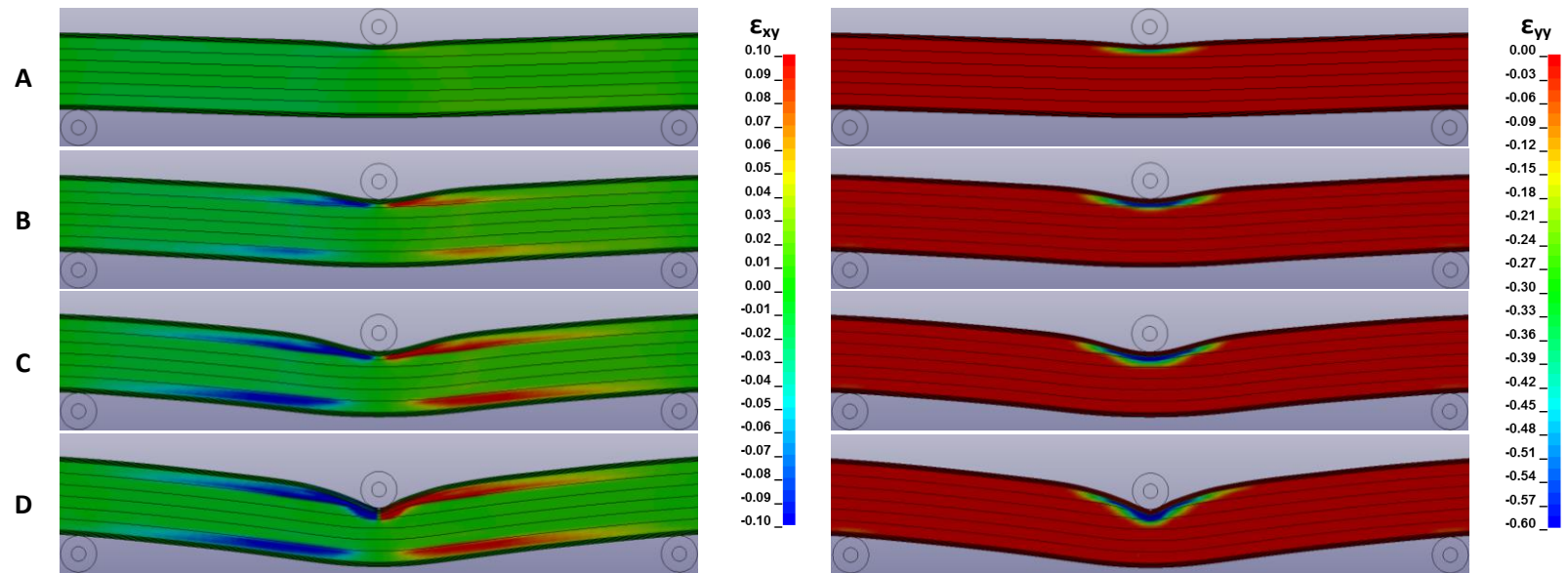
Σχήμα 5.24: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ], με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%.



Σχήμα 5.25: Εξέλιξη διαμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.

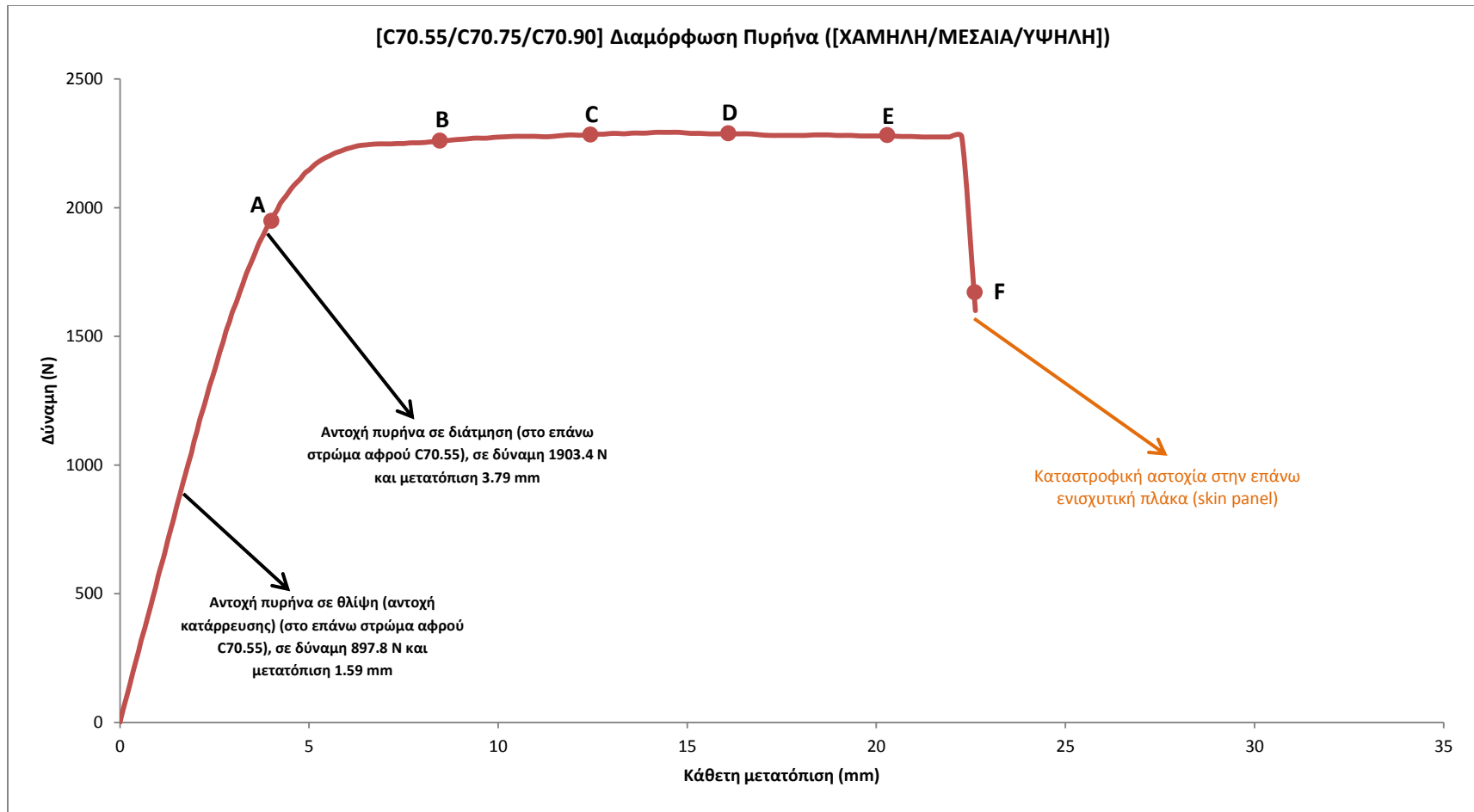


Σχήμα 5.26: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ], με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%.

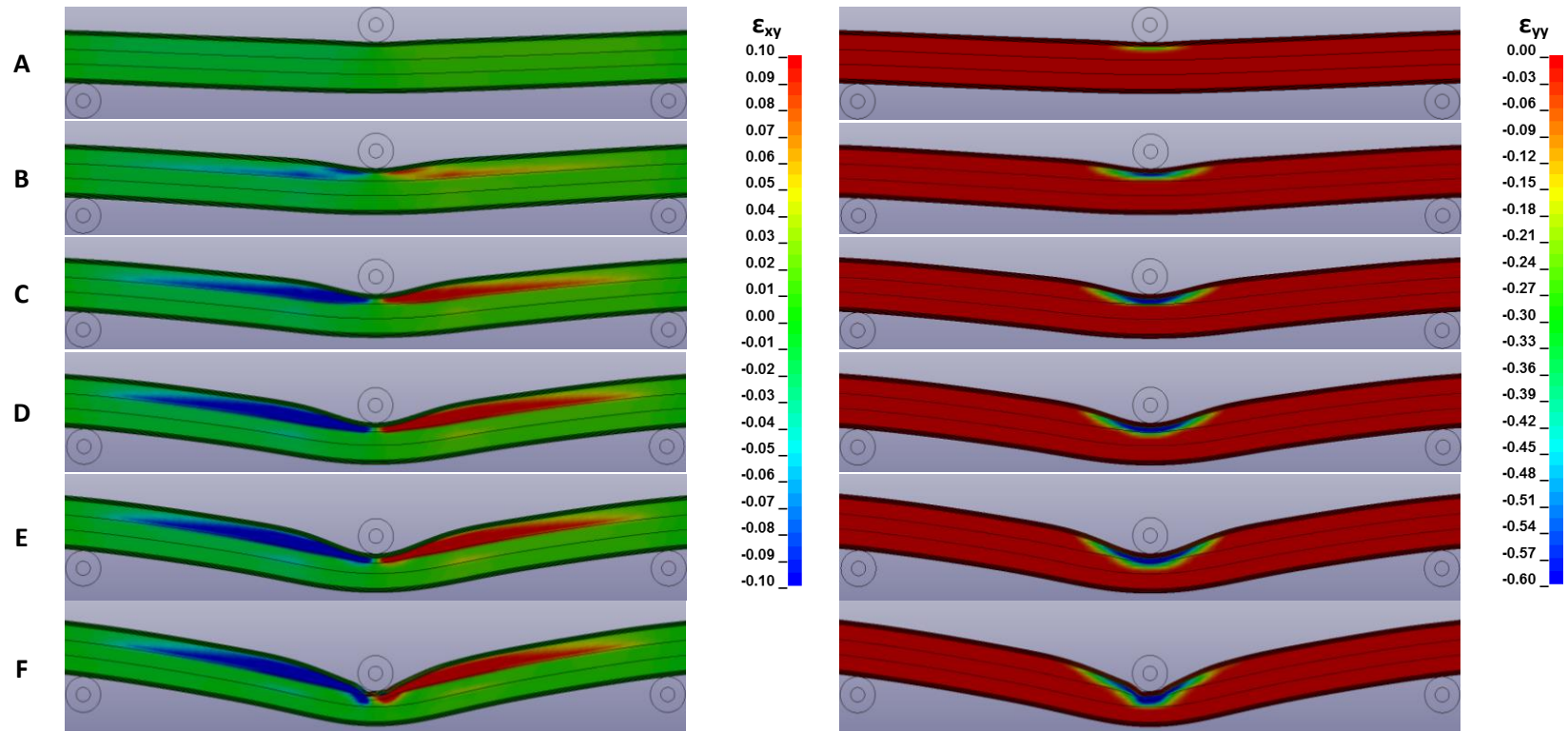


Σχήμα 5.27: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.

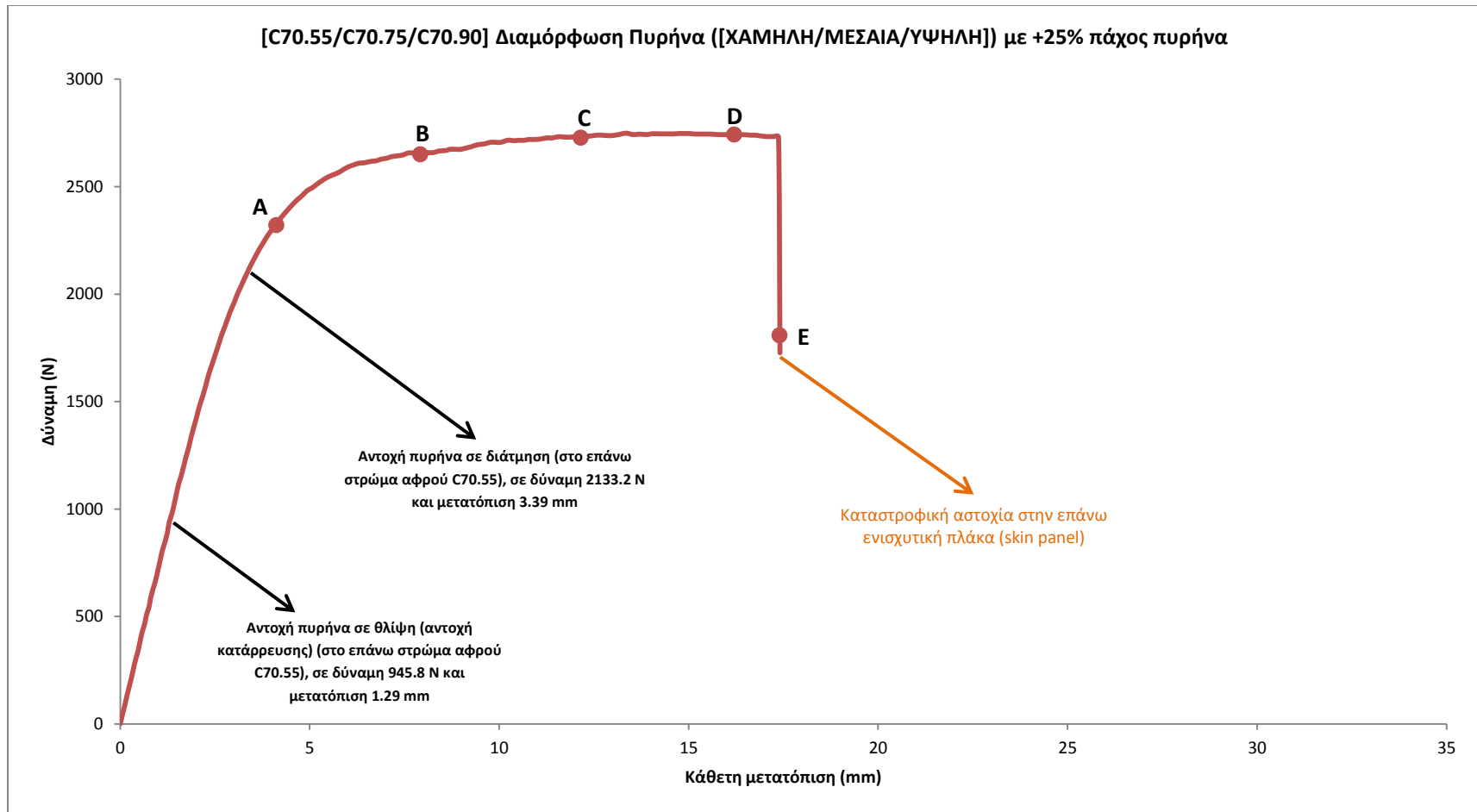




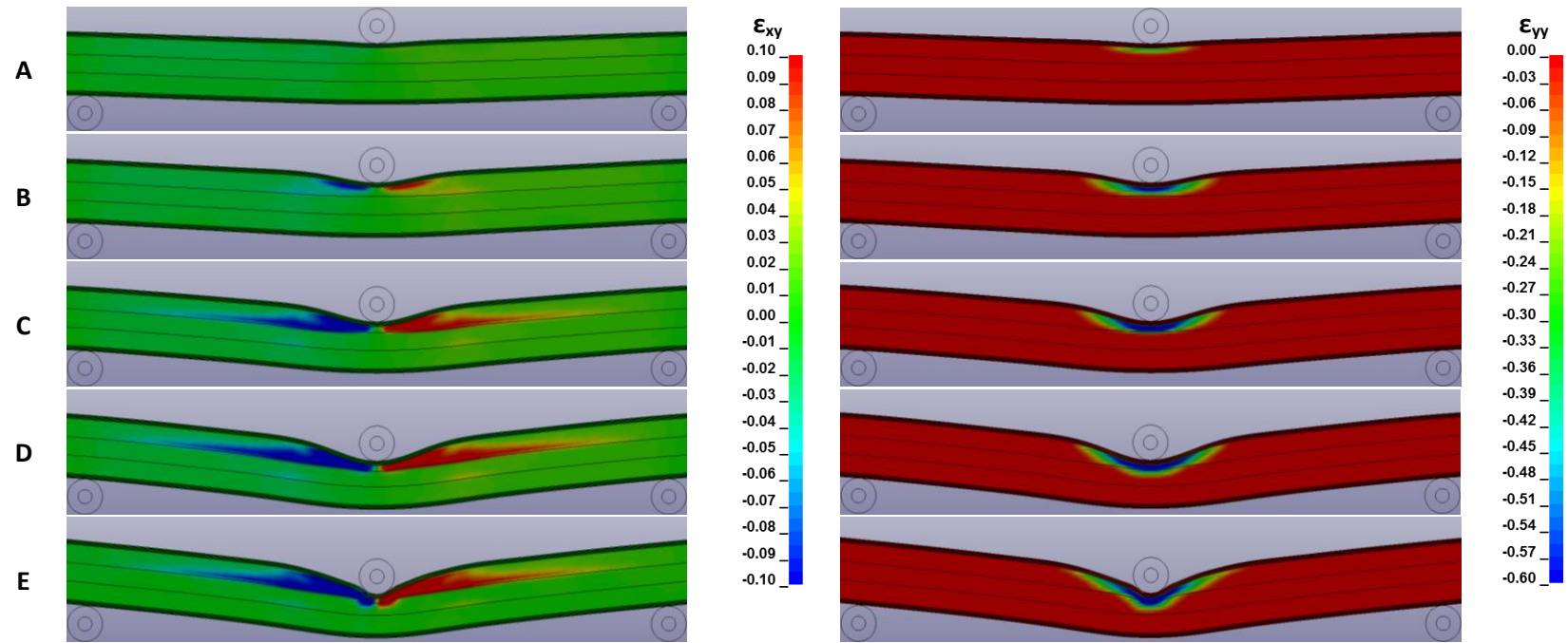
Σχήμα 5.28: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ], με πάχος πυρήνα ίσο με το αρχικό.



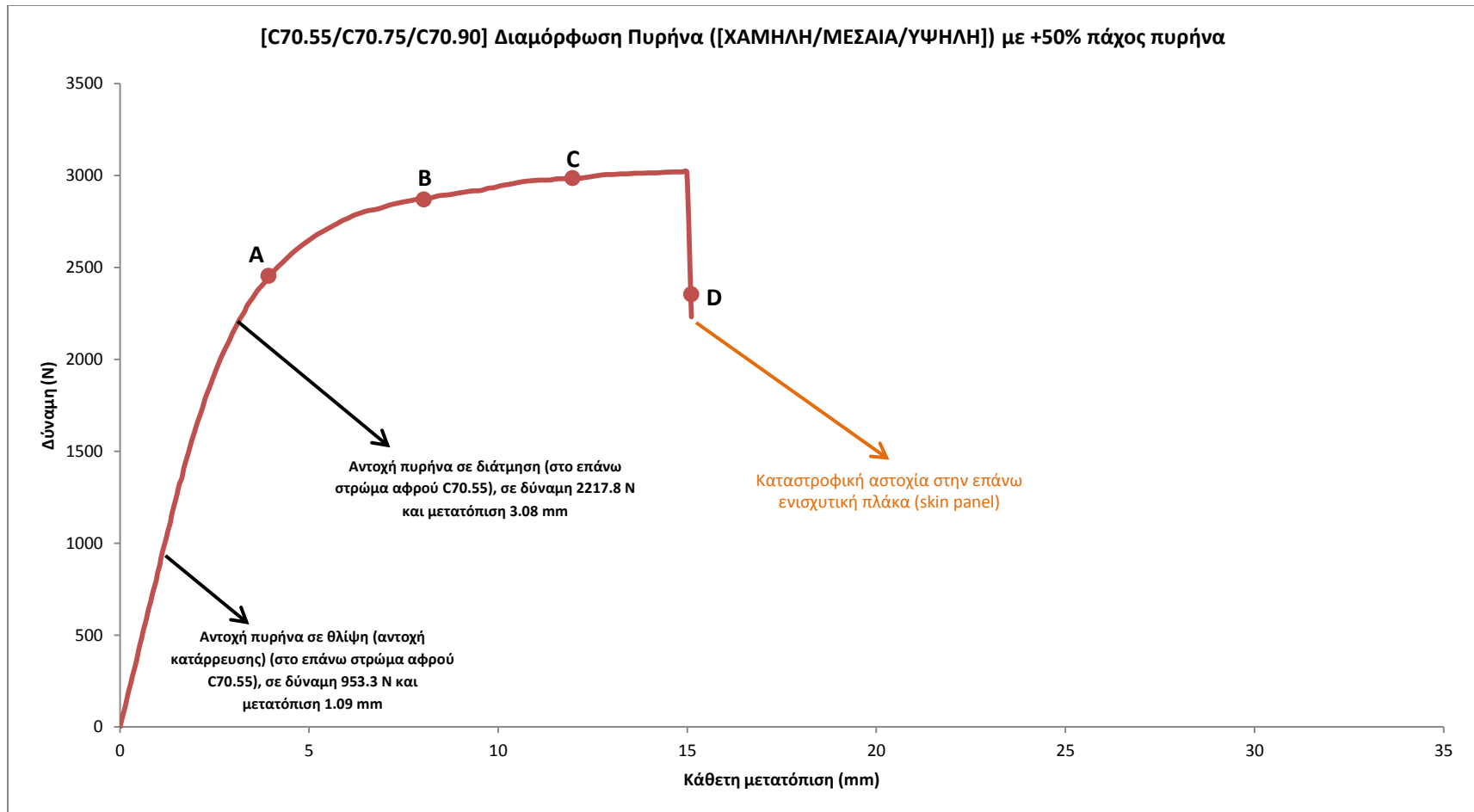
Σχήμα 5.29: Εξέλιξη διαμητρικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ] με πάχος πυρήνα ίσο με το αρχικό, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



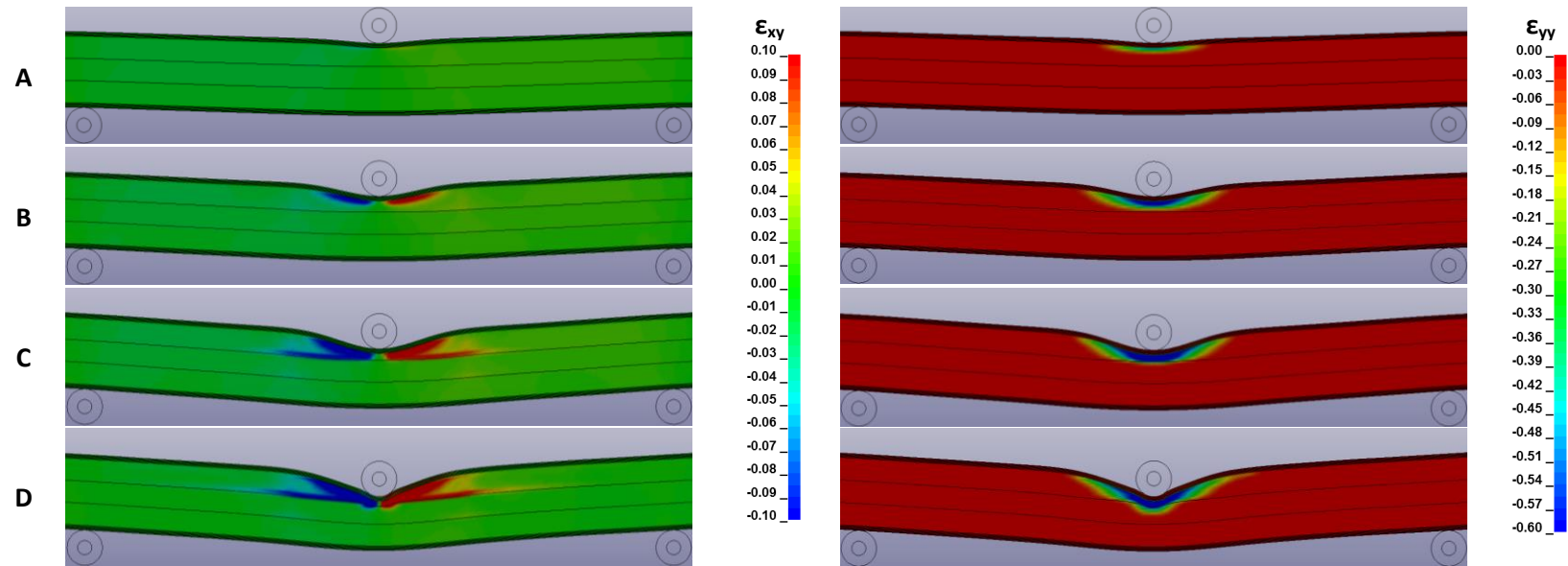
Σχήμα 5.30: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ], με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



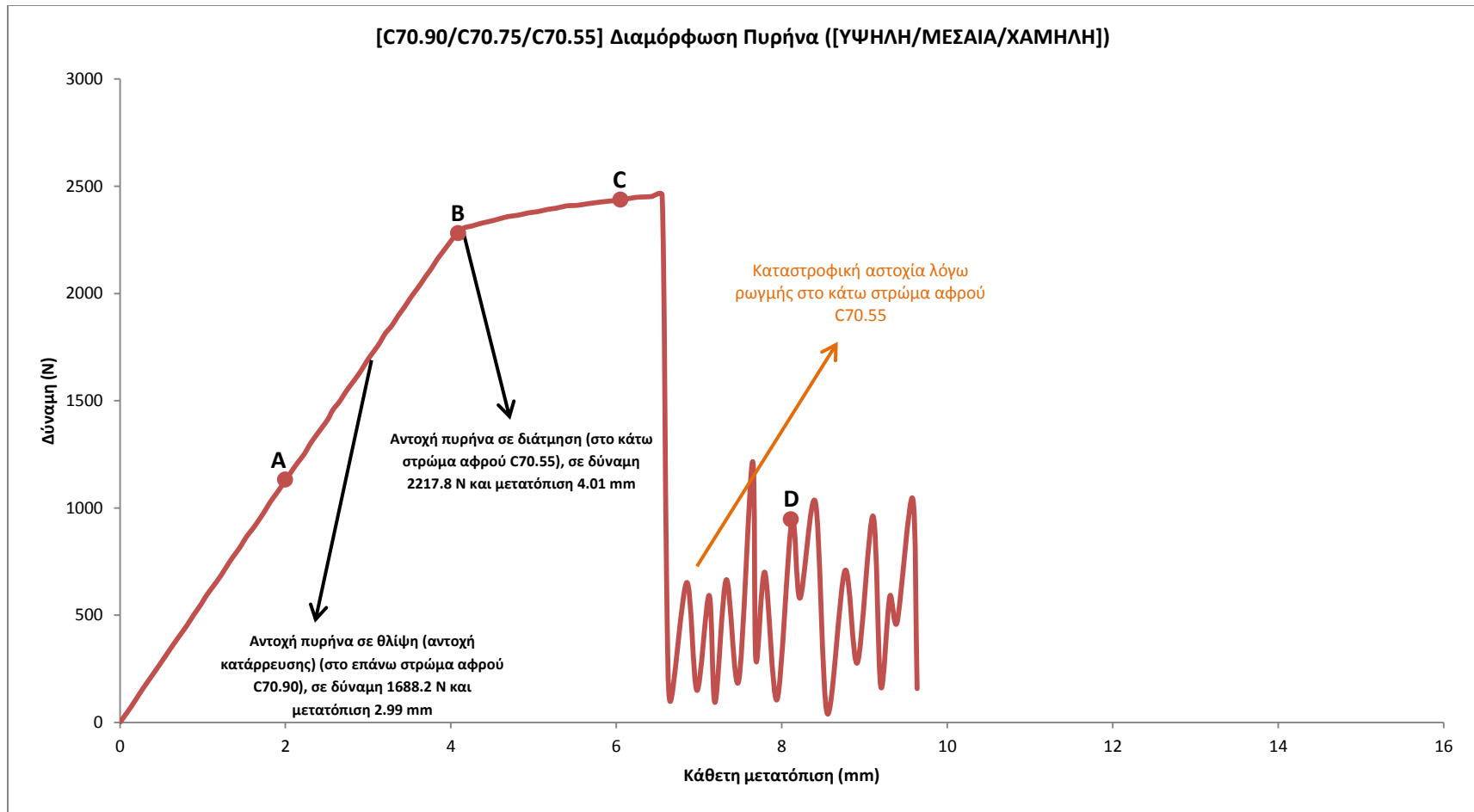
Σχήμα 5.31: Εξέλιξη διαμηθικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



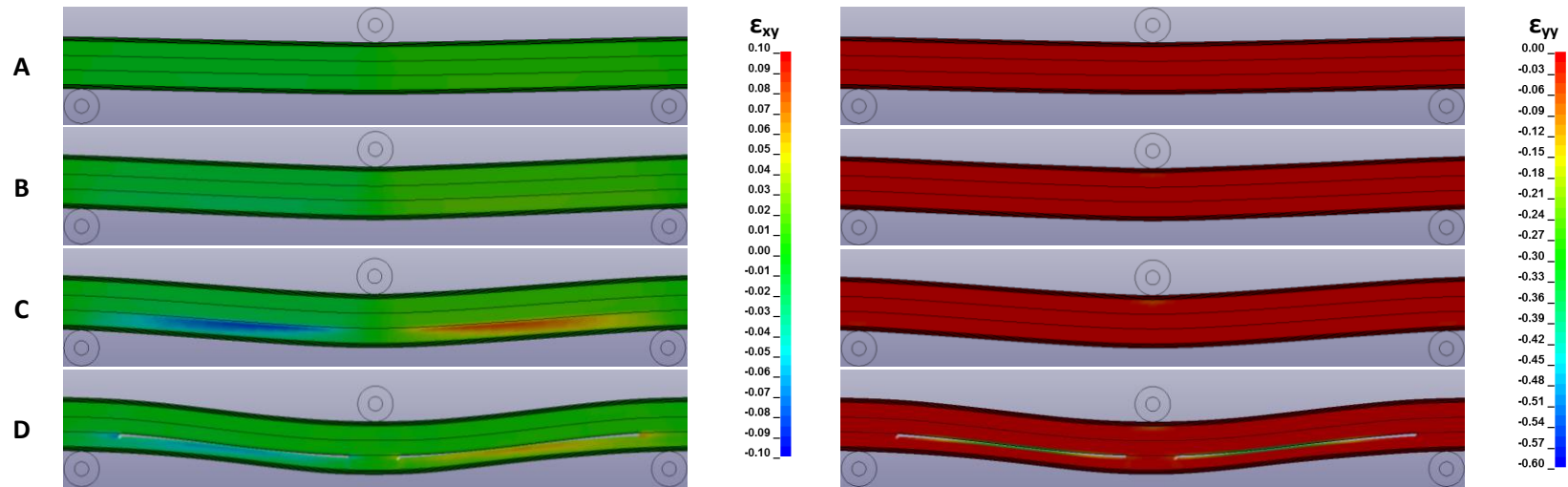
Σχήμα 5.32: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ], με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%.



Σχήμα 5.33: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.

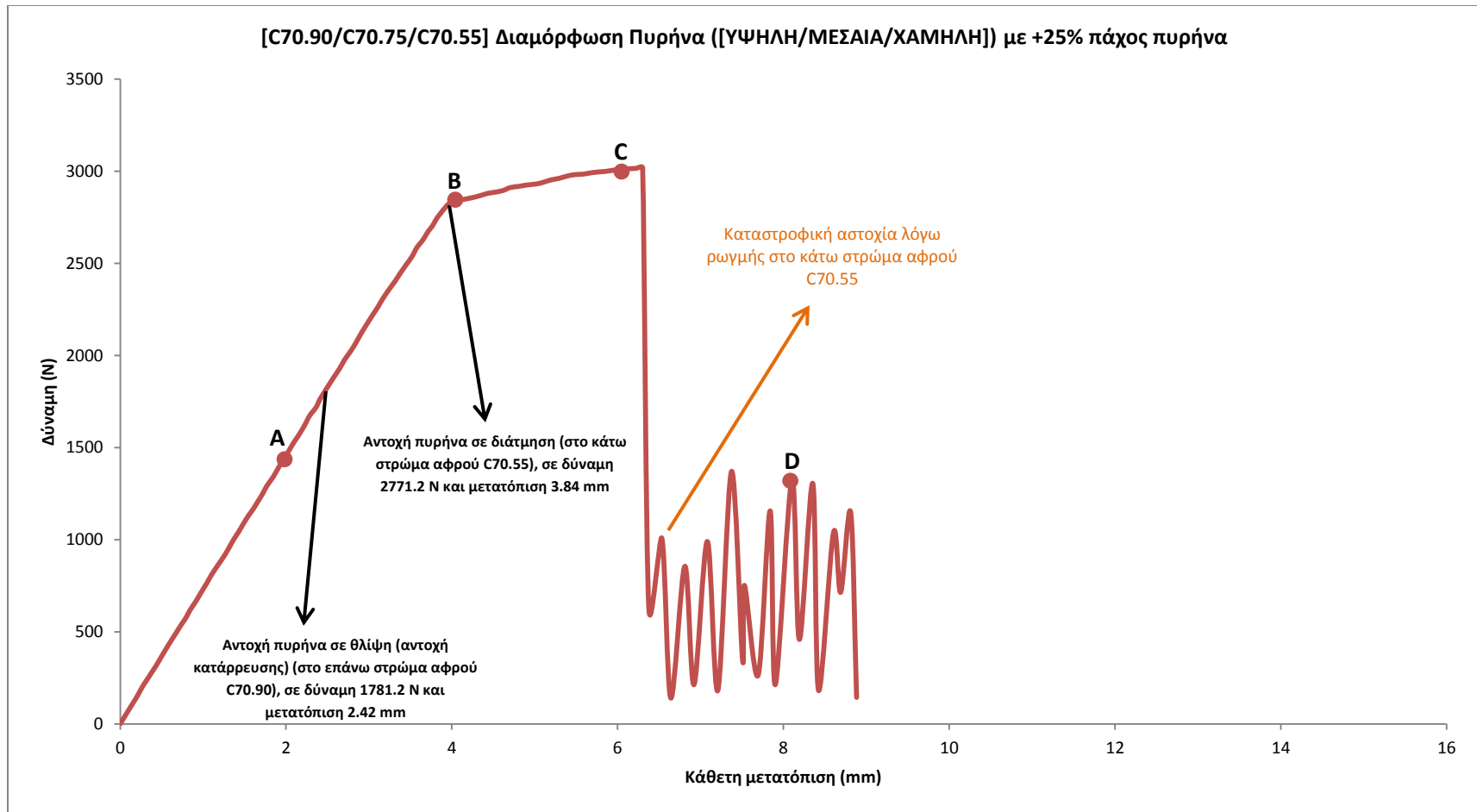


Σχήμα 5.34: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] με πάχος πυρήνα ίσο με το αρχικό.

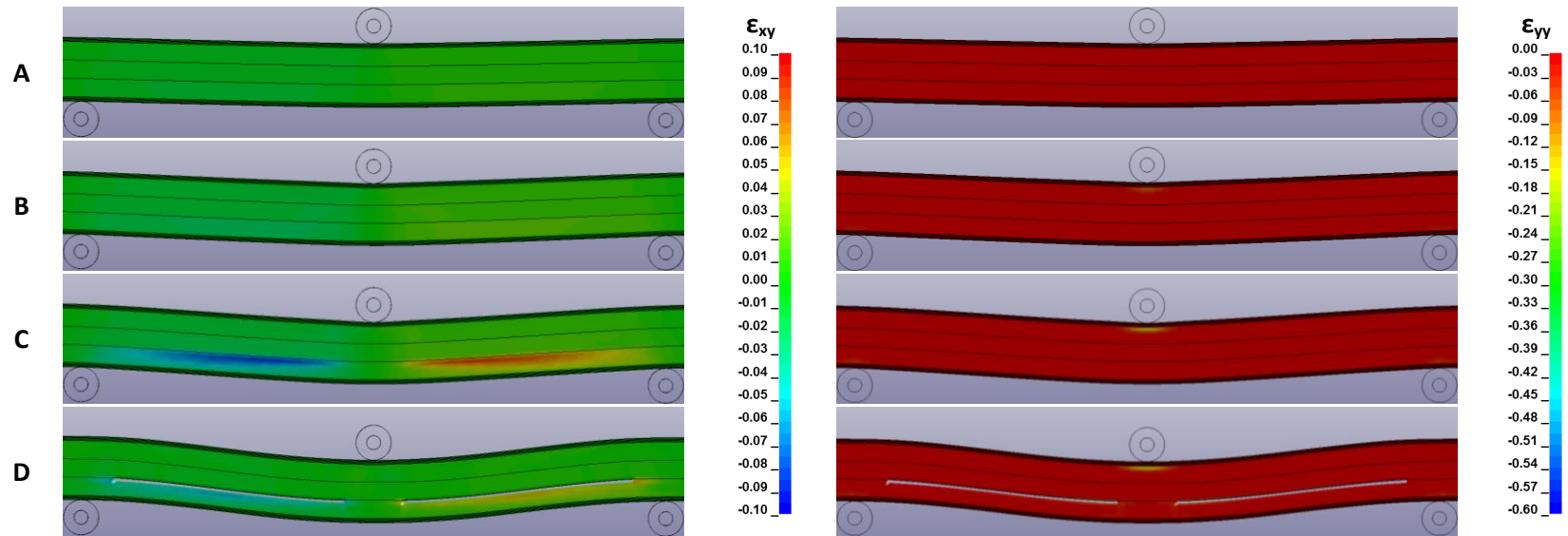


Σχήμα 5.35: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] με πάχος πυρήνα ίσο με το αρχικό, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.

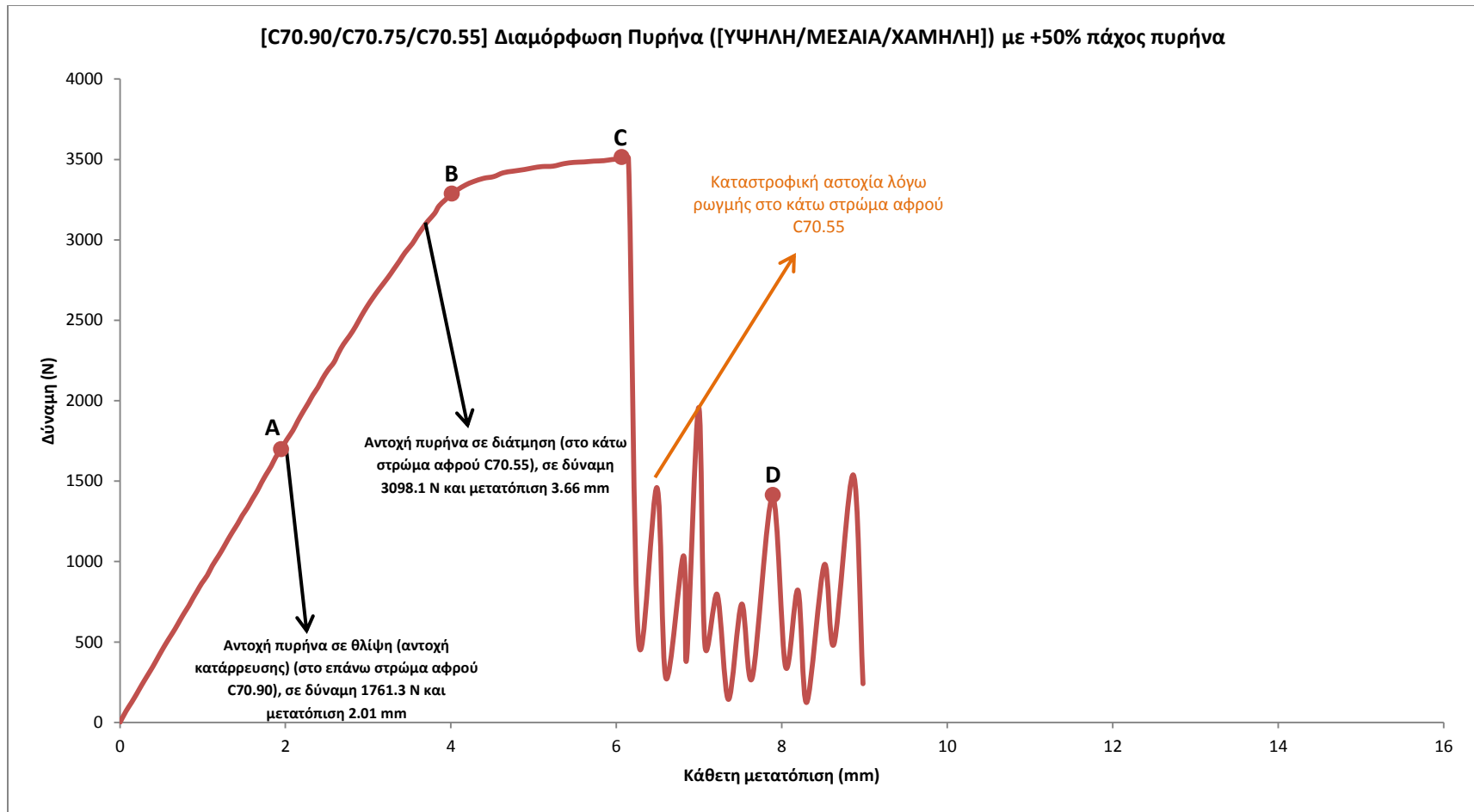




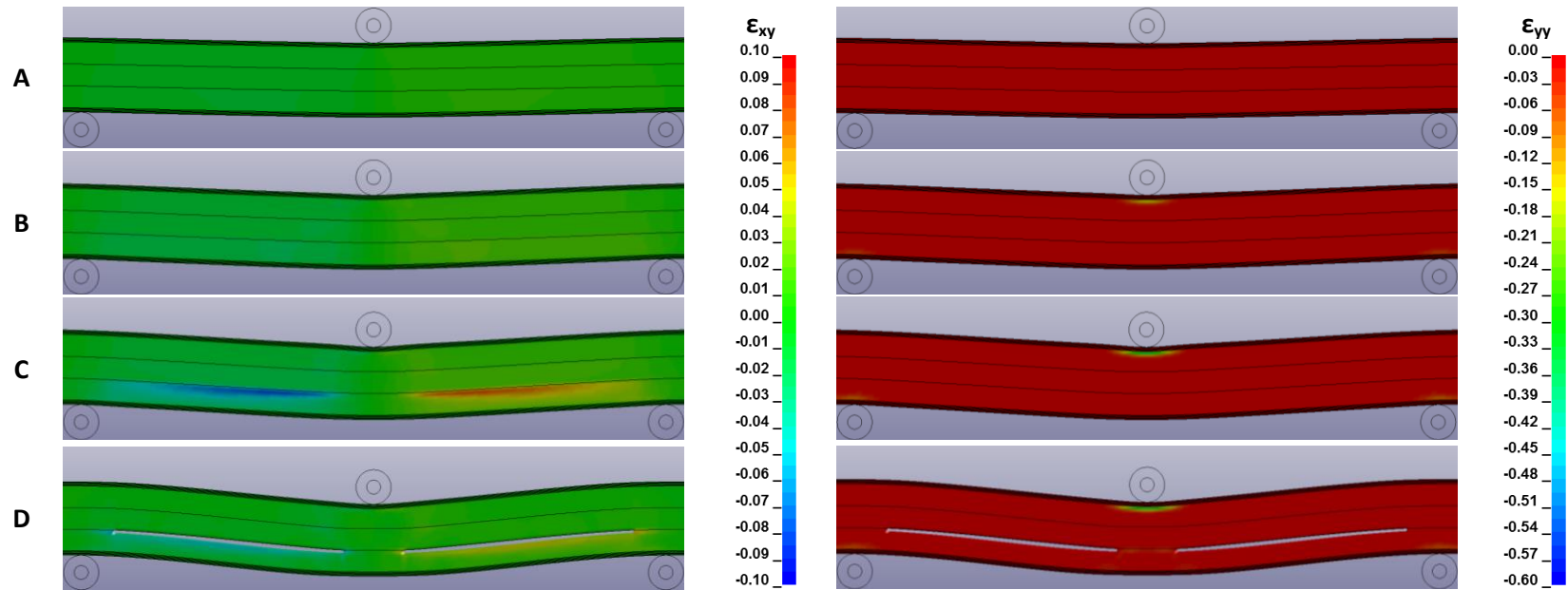
Σχήμα 5.36: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%.



Σχήμα 5.37: Εξέλιξη διαμηθικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.



Σχήμα 5.38: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης βάσει αριθμητικού μοντέλου για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση πυρήνα [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%.



Σχήμα 5.39: Εξέλιξη διατμητικών ανηγμένων παραμορφώσεων (αριστερά) και θλιπτικών παραμορφώσεων (δεξιά) κατά το πάχος του πυρήνα, για διαβαθμισμένη (graded) διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%, προερχόμενες από το αριθμητικό μοντέλο.

Στα διαγράμματα που παρατέθηκαν προηγουμένως, επισημάνθηκαν με βέλη τα επίπεδα φόρτισης στα οποία, βάσει των αριθμητικών μοντέλων, επέρχονται για πρώτη φορά η αστοχία σε θλίψη και διάτμηση του πυρήνα, ασχέτως του σε ποιο στρώμα αφρού συμβαίνει αυτό. Ωστόσο, σε όλο το εύρος του διαγράμματος δύναμης – μετατόπισης, επέρχονται αστοχίες σε θλίψη ή/και διάτμηση και σε άλλα στρώματα αφρού πέρα από αυτό στο οποίο συνέβησαν για πρώτη φορά. Για το λόγο αυτό, στους πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται λεπτομερή στοιχεία για όλα τα στρώματα αφρού και την συμπεριφορά τους από την αρχή της φόρτισης μέχρι και τη στιγμή της καταστροφικής αστοχίας της εκάστοτε sandwich κατασκευής. Σημειώνεται ότι οι πίνακες που κατασκευάζονται αφορούν όλο το εύρος των περιπτώσεων που εξετάστηκαν, αφενός δηλαδή τις αρχικές πειραματικές διαμορφώσεις αφετέρου δε τις επιπλέον διαμορφώσεις που εξετάστηκαν μόνο στα πλαίσια της αριθμητικής μελέτης. Όσον αφορά τις πειραματικές διαμορφώσεις, στα πλαίσια της αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας των αριθμητικών μοντέλων, χρησιμοποιήθηκαν για τους αφρούς C70.55 και C70.90 και οι ελάχιστες τιμές των αντοχών τους σε θλίψη και διάτμηση, εκτός από τους μέσους όρους βάσει κατασκευαστή. Στους πίνακες λοιπόν που αφορούν αυτές τις περιπτώσεις, δίνεται σε παρένθεση το στοιχείο που αφορά την περίπτωση χρήσης της μέσης τιμής των αντοχών σε θλίψη και διάτμηση, και σε παρένθεση ακολουθεί το στοιχείο για την περίπτωση χρήσης της ελάχιστης τιμής των αντοχών αυτών.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικές τιμές των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης προερχόμενων από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις ομοιογενείς διαμορφώσεις πυρήνων [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ].

		Φορτίο κατά την αστοχία σε θλίψη (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε θλίψη (mm)	Φορτίο κατά την αστοχία σε διάτμηση (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε διάτμηση (mm)
Διαστάσεις δοκιμίου ίδιες με τις πειραματικές	ΜΕΣΑΙΑ	1297.5	2.25	2398.4	4.41
	ΜΕΣΑΙΑ	2819.2	9.90	2526.7	4.74
	ΜΕΣΑΙΑ	Μη αστοχία		2661.1	5.20
Διαστάσεις δοκιμίου με +25% πάχος πυρήνα	ΜΕΣΑΙΑ	1319.8	1.82	2685.2	4.05
	ΜΕΣΑΙΑ	3241.5	9.81	2900.2	4.62
	ΜΕΣΑΙΑ	Μη αστοχία		3034.5	5.13
Διαστάσεις δοκιμίου με +50% πάχος πυρήνα	ΜΕΣΑΙΑ	1332.8	1.53	2285.2	2.72
	ΜΕΣΑΙΑ	3589.5	10.10	3219.0	4.74
	ΜΕΣΑΙΑ	Μη αστοχία		3372.7	5.52

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικές τιμές των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης προερχόμενων από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες (graded) διαμορφώσεις πυρήνων [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ].

		Φορτίο κατά την αστοχία σε θλίψη (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε θλίψη (mm)	Φορτίο κατά την αστοχία σε διάτμηση (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε διάτμηση (mm)
Διαστάσεις δοκιμίου ίδιες με τις πειραματικές	ΥΨΗΛΗ	1755.7 (1533.1)	2.96 (2.59)	2577.7 (2236.5)	9.62 (12.5)
	ΧΑΜΗΛΗ	1517.2 (1235.5)	2.56 (2.08)	2218.7 (1740.8)	3.82 (2.97)
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία (Μη αστοχία)		Μη αστοχία (Μη αστοχία)	
Διαστάσεις δοκιμίου με +25% πάχος πυρήνα	ΥΨΗΛΗ	1731.7	2.32	2870.2	5.78
	ΧΑΜΗΛΗ	1608.3	2.15	2562.8	3.52
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
Διαστάσεις δοκιμίου με +50% πάχος πυρήνα	ΥΨΗΛΗ	1728.0	1.91	3182.5	3.91
	ΧΑΜΗΛΗ	1697.6	1.89	2900.9	3.38
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικές τιμές των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης προερχόμενων από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες (graded) διαμορφώσεις πυρήνων [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ].

		Φορτίο κατά την αστοχία σε θλίψη (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε θλίψη (mm)	Φορτίο κατά την αστοχία σε διάτμηση (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε διάτμηση (mm)
Διαστάσεις δοκιμίου ίδιες με τις πειραματικές	ΧΑΜΗΛΗ	892.5 (759.1)	1.71 (1.45)	1869.1 (1869.8)	3.95 (3.12)
	ΥΨΗΛΗ	2182.5 (1911)	11.11 (13.95)	Μη αστοχία (Μη αστοχία)	
	ΧΑΜΗΛΗ	2231.3 (1936)	14.67 (16.5)	1990.2	4.40 (3.42)
Διαστάσεις δοκιμίου με +25% πάχος πυρήνα	ΧΑΜΗΛΗ	912.1	1.39	2026.5	3.54
	ΥΨΗΛΗ	2600.3	15.23	Μη αστοχία	
	ΧΑΜΗΛΗ	2623.5	14.20	2328.7	4.86
Διαστάσεις δοκιμίου με +50% πάχος πυρήνα	ΧΑΜΗΛΗ	9.16	1.17	2082.1	3.16
	ΥΨΗΛΗ	2935.5	13.67	Μη αστοχία	
	ΧΑΜΗΛΗ	2891.2	12.38	2550.0	5.2

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικές τιμές των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης προερχόμενων από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες διαμορφώσεις πυρήνων [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ].

		Φορτίο κατά την αστοχία σε θλίψη (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε θλίψη (mm)	Φορτίο κατά την αστοχία σε διάτμηση (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε διάτμηση (mm)
Διαστάσεις δοκιμίου ίδιες με τις πειραματικές	ΥΨΗΛΗ	2077.1	3.59	2652.2	13.05
	ΜΕΣΑΙΑ	2064.0	3.56	2477.2	6.58
	ΧΑΜΗΛΗ	1476.1	2.52	2253.2	3.92
	ΧΑΜΗΛΗ	2445.3	6.98	2238.8	3.89
	ΜΕΣΑΙΑ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
Διαστάσεις δοκιμίου με +25% πάχος πυρήνα	ΥΨΗΛΗ	1848.9	2.52	2997.0	6.72
	ΜΕΣΑΙΑ	2253.4	3.10	2736.8	3.92
	ΧΑΜΗΛΗ	1653.8	2.26	2616.2	3.66
	ΧΑΜΗΛΗ	2877.0	5.82	2656.5	3.74
	ΜΕΣΑΙΑ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
Διαστάσεις δοκιμίου με +50% πάχος πυρήνα	ΥΨΗΛΗ	1788.5	2.04	3260.3	4.26
	ΜΕΣΑΙΑ	2373.8	2.75	2967.0	3.54
	ΧΑΜΗΛΗ	1788.5	2.04	2916.7	3.49
	ΧΑΜΗΛΗ	3321.8	5.17	3024.8	3.64
	ΜΕΣΑΙΑ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	

Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικές τιμές των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης προερχόμενων από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες διαμορφώσεις πυρήνων [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ].

		Φορτίο κατά την αστοχία σε θλίψη (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε θλίψη (mm)	Φορτίο κατά την αστοχία σε διάτμηση (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε διάτμηση (mm)
Διαστάσεις δοκιμίου ίδιες με τις πειραματικές	ΧΑΜΗΛΗ	904.5	1.55	1899.1	3.56
	ΜΕΣΑΙΑ	2409.7	8.98	Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	2483.2	18.64	Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
	ΜΕΣΑΙΑ	2545.5	18.52	2475.7	10.82
	ΧΑΜΗΛΗ	2410.2	13.00	2040.0	4.02
Διαστάσεις δοκιμίου με +25% πάχος πυρήνα	ΧΑΜΗΛΗ	925.2	1.27	2094.7	3.31
	ΜΕΣΑΙΑ	2745.0	6.98	Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	2943.8	15.85	Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
	ΜΕΣΑΙΑ	Μη αστοχία		2817.1	8.61
	ΧΑΜΗΛΗ	Μη αστοχία		2391.7	4.37
Διαστάσεις δοκιμίου με +50% πάχος πυρήνα	ΧΑΜΗΛΗ	942.1	1.07	2184.5	2.98
	ΜΕΣΑΙΑ	2986.5	6.47	Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
	ΜΕΣΑΙΑ	Μη αστοχία		3189.5	7.89
	ΧΑΜΗΛΗ	Μη αστοχία		2685.2	5.01

Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικές τιμές των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης προερχόμενων από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες διαμορφώσεις πυρήνων [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ].

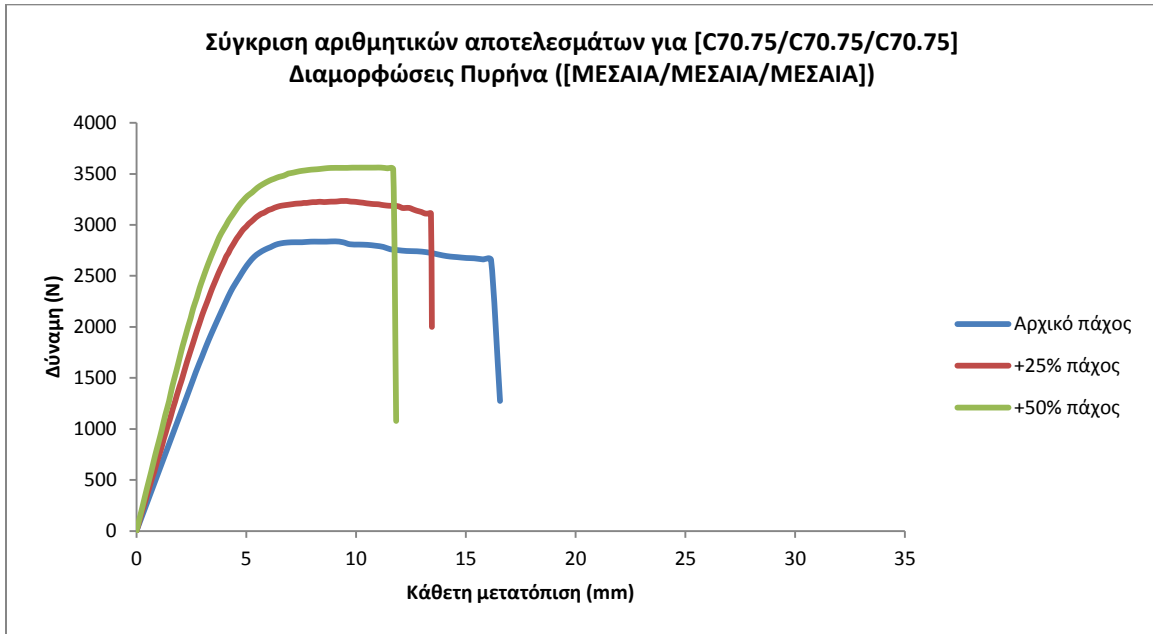
		Φορτίο κατά την αστοχία σε θλίψη (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε θλίψη (mm)	Φορτίο κατά την αστοχία σε διάτμηση (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε διάτμηση (mm)
Διαστάσεις δοκιμίου ίδιες με τις πειραματικές	ΧΑΜΗΛΗ	897.8	1.59	1903.5	3.79
	ΜΕΣΑΙΑ	2268.0	11.7	2384.2	13.62
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
Διαστάσεις δοκιμίου με +25% πάχος πυρήνα	ΧΑΜΗΛΗ	945.8	1.29	2133.2	3.39
	ΜΕΣΑΙΑ	2754.0	10.24	2642.3	7.26
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	
Διαστάσεις δοκιμίου με +50% πάχος πυρήνα	ΧΑΜΗΛΗ	953.3	1.09	2217.8	3.08
	ΜΕΣΑΙΑ	3021.8	10.39	Μη αστοχία	
	ΥΨΗΛΗ	Μη αστοχία		Μη αστοχία	

Πίνακας 5.7: Χαρακτηριστικές τιμές των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης προερχόμενων από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες διαμορφώσεις πυρήνων [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ].

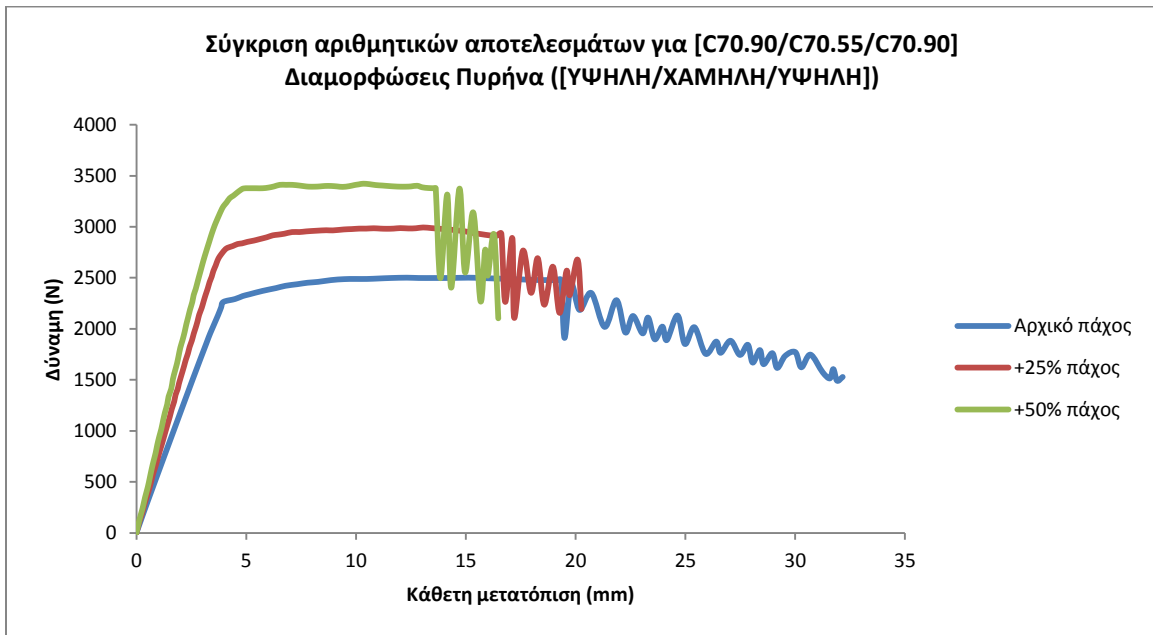
		Φορτίο κατά την αστοχία σε θλίψη (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε θλίψη (mm)	Φορτίο κατά την αστοχία σε διάτμηση (N)	Μετατόπιση κατά την αστοχία σε διάτμηση (mm)
Διαστάσεις δοκιμίου ίδιες με τις πειραματικές	ΥΨΗΛΗ	1688.3	2.99	Μη αστοχία	
	ΜΕΣΑΙΑ	2442.0	5.45	Μη αστοχία	
	ΧΑΜΗΛΗ	Μη αστοχία		2254.5	4.01
Διαστάσεις δοκιμίου με +25% πάχος πυρήνα	ΥΨΗΛΗ	1781.3	2.42	Μη αστοχία	
	ΜΕΣΑΙΑ	3117.8	6.05	3117.8	6.05
	ΧΑΜΗΛΗ	Μη αστοχία		2771.2	3.84
Διαστάσεις δοκιμίου με +50% πάχος πυρήνα	ΥΨΗΛΗ	1761.8	2.01	Μη αστοχία	
	ΜΕΣΑΙΑ	3649.5	6.08	3459.8	4.92
	ΧΑΜΗΛΗ	Μη αστοχία		3098.3	3.66



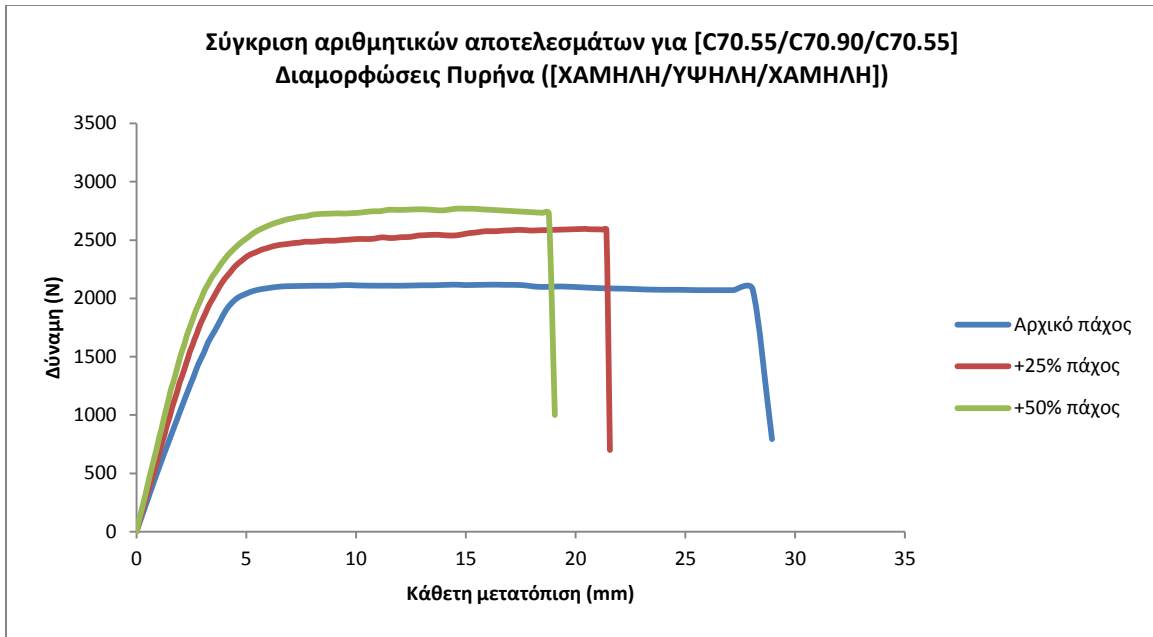
Τέλος, για λόγους σύγκρισης, παρατίθενται και κάποιιοι συνδυασμοί των διαγραμμάτων των Εικόνων 5.40 έως 5.49, με στόχο την ευκολότερη κατανόηση κάποιων αποτελεσμάτων και την σαφέστερη διατύπωση των συμπερασμάτων στο τέλος του Κεφαλαίου.



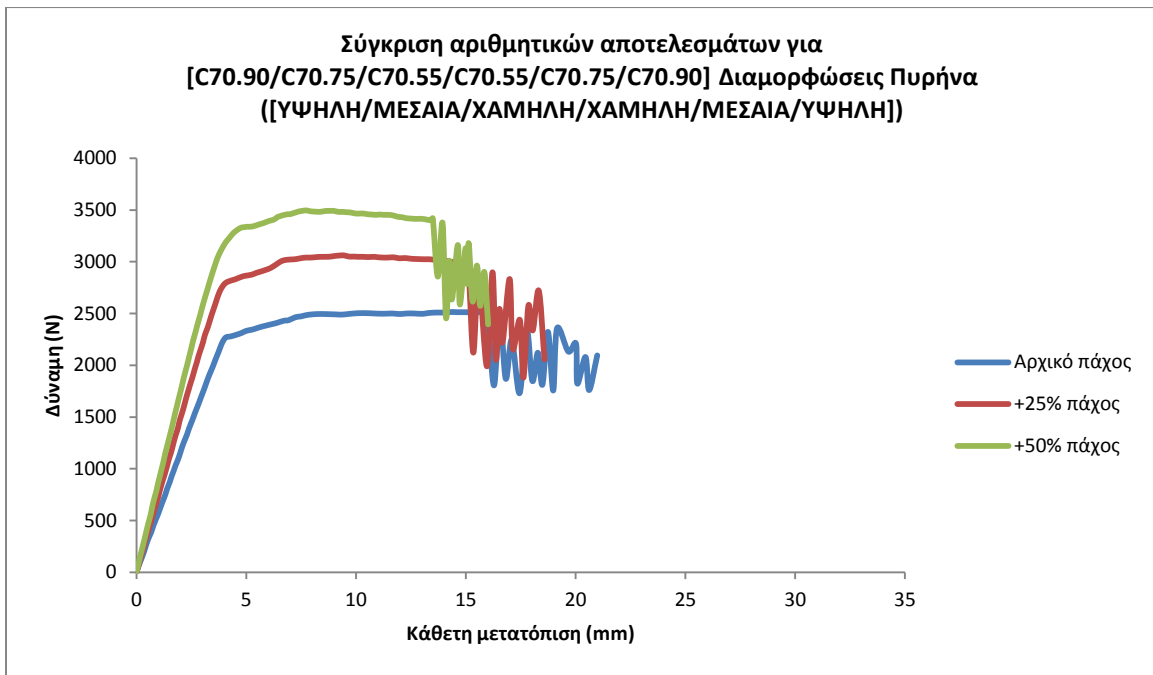
Σχήμα 5.40: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις ομοιογενείς διαμορφώσεις πυρήνων [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ].



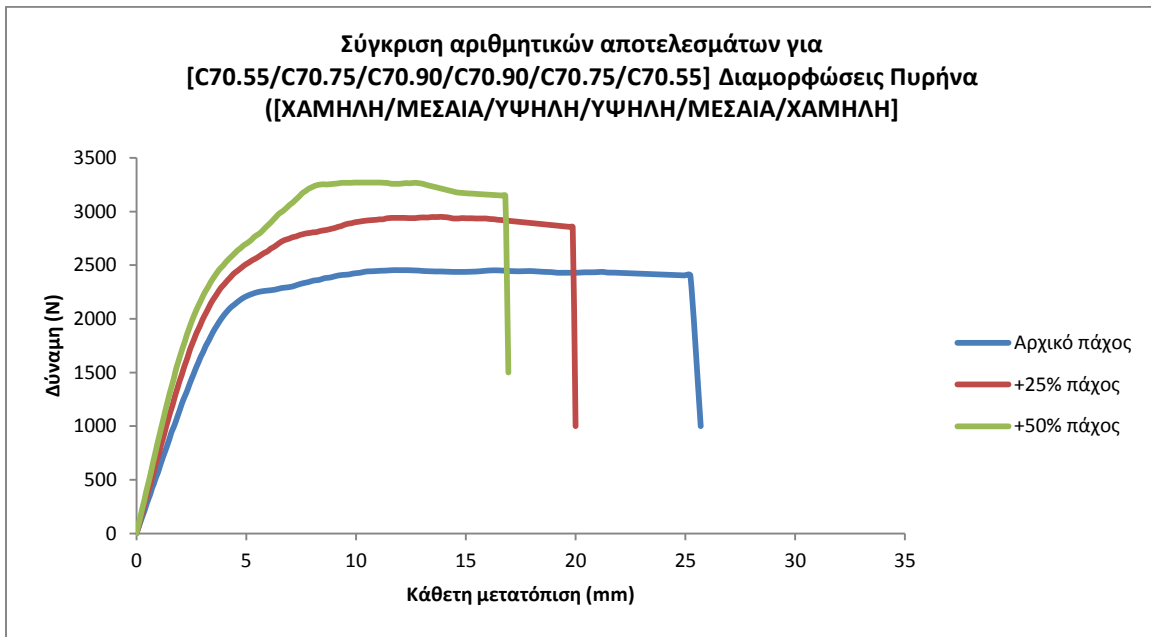
Σχήμα 5.41: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες (graded) διαμορφώσεις πυρήνων [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ].



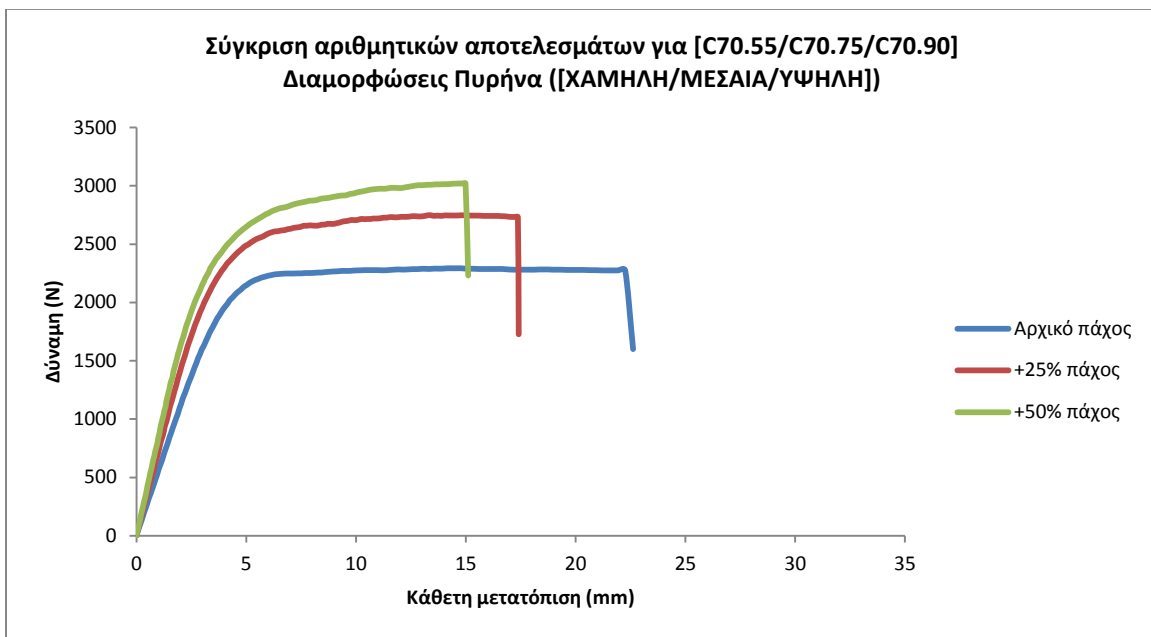
Σχήμα 5.42: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες (graded) διαμορφώσεις πυρήνων [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ].



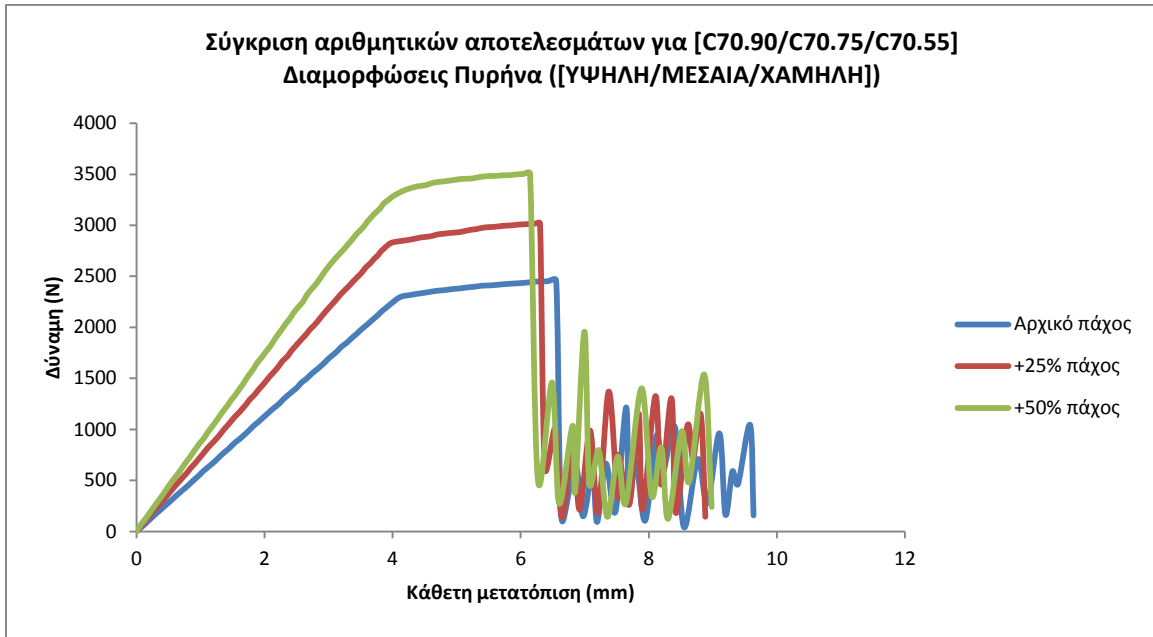
Σχήμα 5.43: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες (graded) διαμορφώσεις πυρήνων [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ].



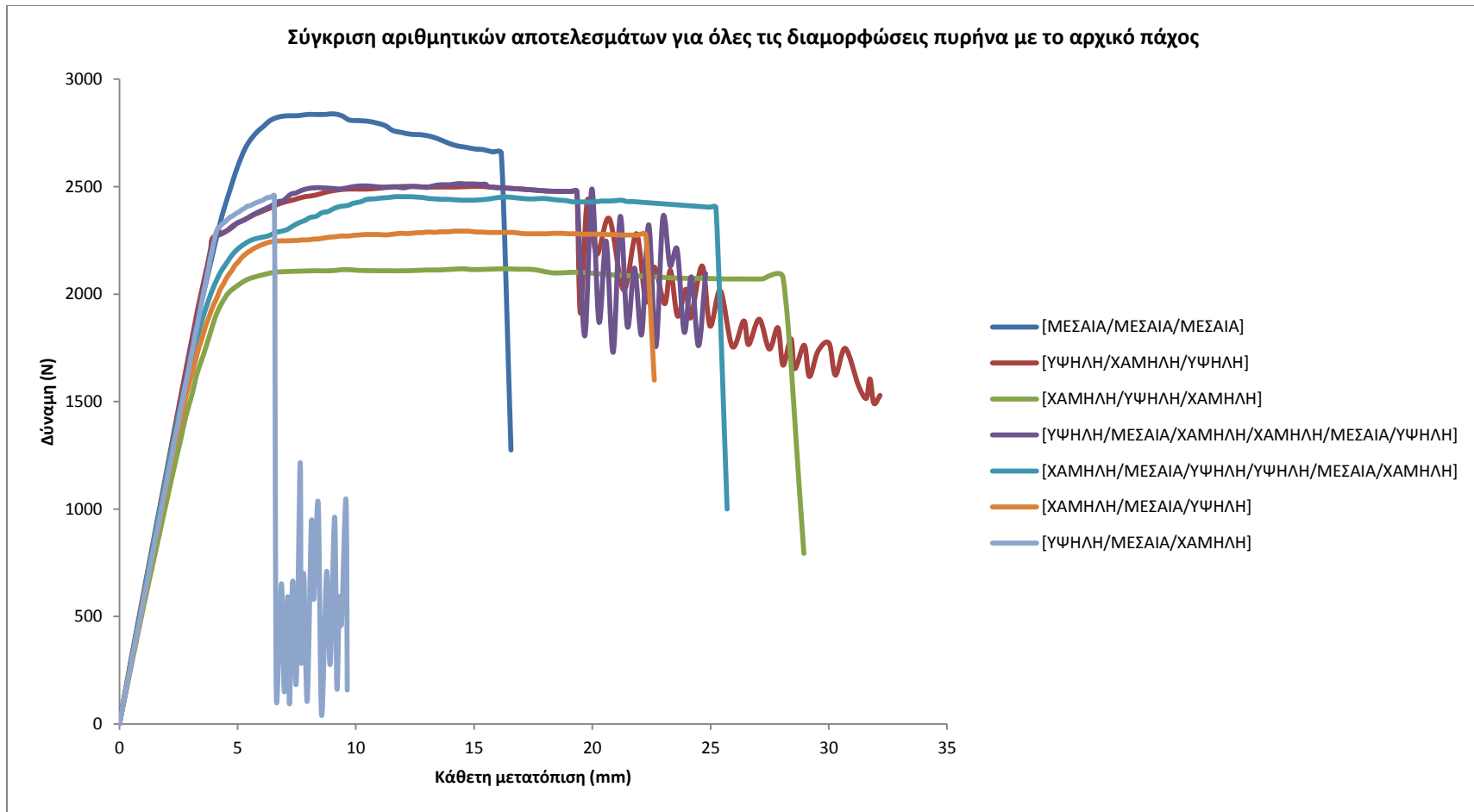
Σχήμα 5.44: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες (graded) διαμορφώσεις πυρήνων [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ].



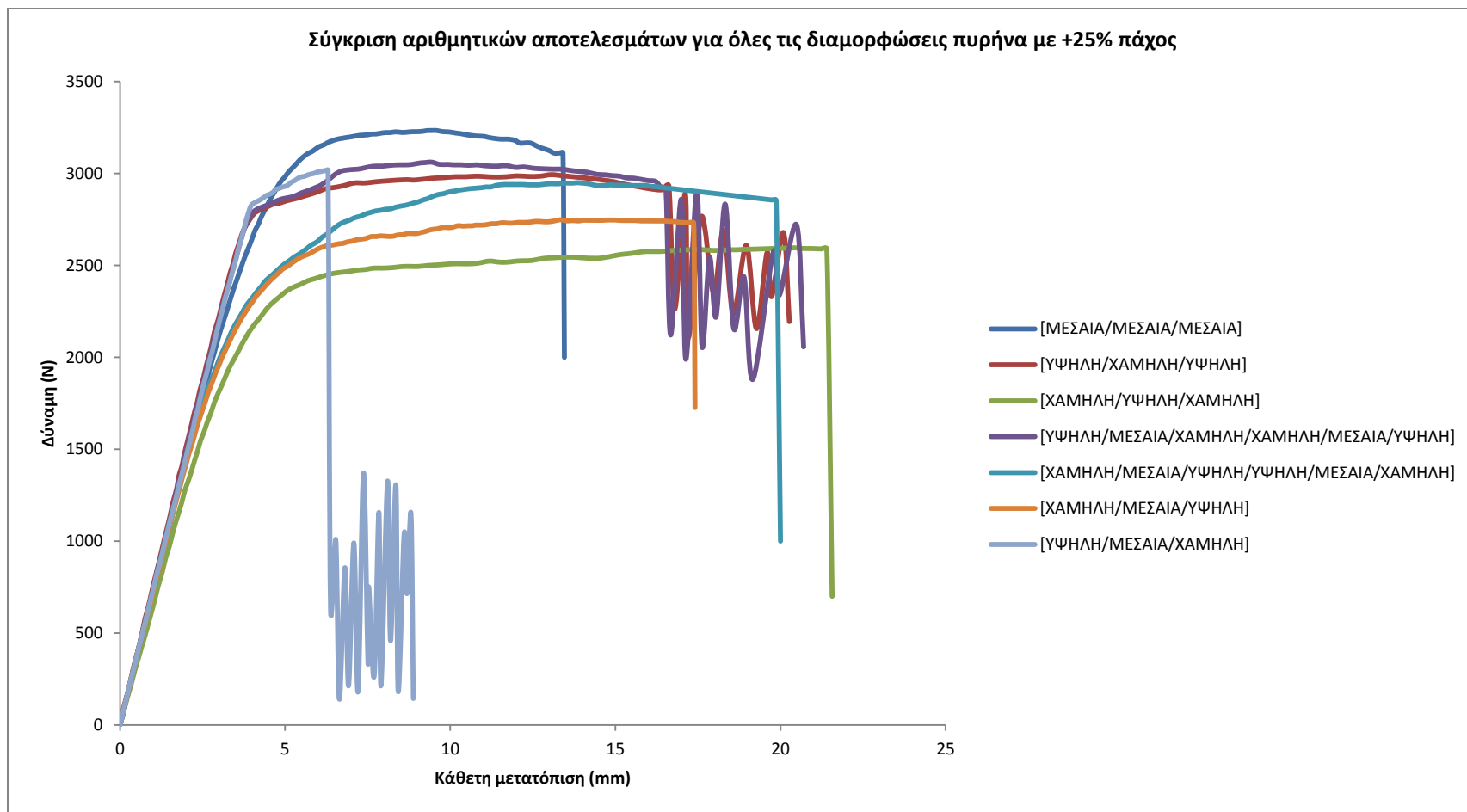
Σχήμα 5.45: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες (graded) διαμορφώσεις πυρήνων [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ].



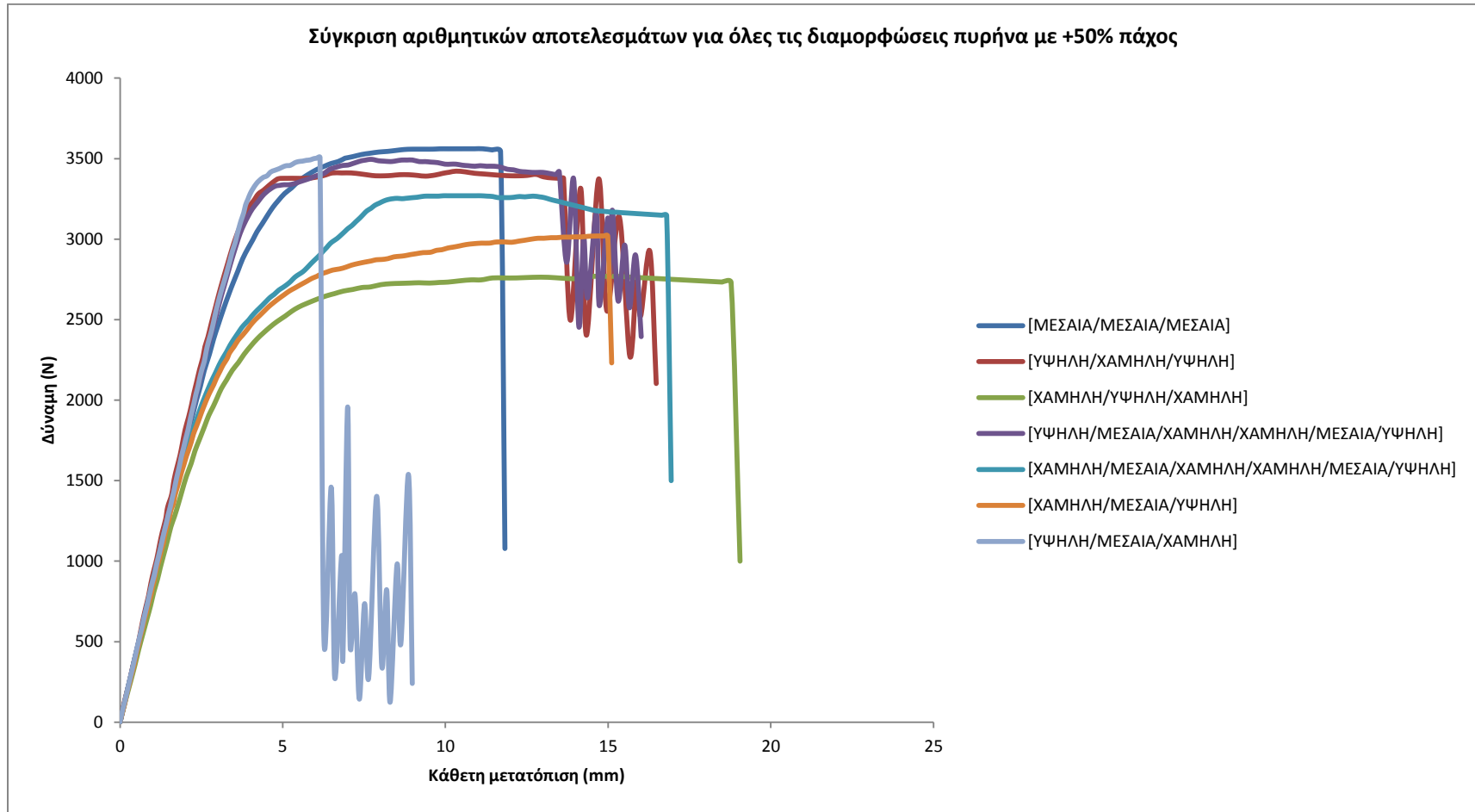
Σχήμα 5.46: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για τις διαβαθμισμένες (graded) διαμορφώσεις πυρήνων [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ].



Σχήμα 5.47: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για όλες τις διαμορφώσεις πυρήνων με πάχος ίσο με το αρχικό.



Σχήμα 5.48: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για όλες τις διαμορφώσεις πυρήνων με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 25%.



Σχήμα 5.49: Συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης, προερχόμενα από τα αριθμητικά μοντέλα, για όλες τις διαμορφώσεις πυρήνων με αυξημένο πάχος πυρήνα κατά 50%.

Από τη μελέτη συνολικά των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προηγήθηκαν, είτε πρόκειται περί διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης, είτε περί στιγμιοτύπων διατμητικών παραμορφώσεων / θλιπτικών παραμορφώσεων, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- α. Αύξηση πάχους πυρήνα αρχικών κατασκευών sandwich οδηγεί σε μεγαλύτερη συγκέντρωση των αναπτυσσόμενων θλιπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων στο κέντρο της κατασκευής, πέριξ του κυλίνδρου φόρτισης, καθώς και μεταβολή της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυρίαρχων φαινομένων τοπικής θλίψης (indentation) και διάτμησης που κυριαρχούν. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται η επιρροή των φαινομένων τοπικής θλίψης (indentation) έναντι των φαινομένων διάτμησης. Η επίδραση αυτή είναι πολύ περισσότερο εμφανής στην περίπτωση της ομοιογενούς διαμόρφωσης [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] και της διαβαθμισμένης (graded) [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ], όπου η επίδραση των φαινομένων τοπικής θλίψης (indentation) είναι πολύ πιο έντονη σε σχέση με την περίπτωση της διαβαθμισμένης (graded) διαμόρφωσης [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ] όπου επιδρά εντονότερα η διάτμηση του λιγότερο ισχυρού στρώματος αφρού του πυρήνα. Στο διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης η επίδραση αυτή αποτυπώνεται στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η μετάβαση από τη γραμμική στη μη γραμμική περιοχή του διαγράμματος. Η αύξηση της επίδρασης της θλιπτικής καταπόνησης οδηγεί σε ομαλότερη μετάβαση από τη γραμμική στη μη γραμμική περιοχή, ενώ όπου η διάτμηση κυριαρχεί, η μετάβαση πραγματοποιείται με μια απότομη "εκτροπή" του διαγράμματος.
- β. Αύξηση πάχους πυρήνα αρχικών κατασκευών sandwich οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα μέγιστων φορτίων στην κατασκευή. Ως εκ τούτου, και τα φορτία τη στιγμή της καταστροφικής αστοχίας αυξάνονται όταν αυξάνεται το πάχος του πυρήνα. Παρ' όλ' αυτά, οι τιμές μετατόπισης τη στιγμή της καταστροφικής αστοχίας ελαττώνονται όταν αυξάνεται το πάχος του πυρήνα. Το συμπέρασμα θα μπορούσε να τεθεί δηλαδή ως "η αύξηση του πάχους του πυρήνα επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερων φορτίων στην κατασκευή, αλλά την αναγκάζει να αστοχεί καταστροφικά νωρίτερα".
- γ. Η αύξηση του πάχους του πυρήνα των αρχικών κατασκευών sandwich επηρεάζει επίσης τις τιμές φορτίου - μετατόπισης στις οποίες εμφανίζονται οι αρχικές αστοχίες σε τοπική θλίψη (indentation) και διάτμηση. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους του πυρήνα οδηγεί στην εμφάνιση των αρχικών αυτών αστοχιών σε χαμηλότερα επίπεδα τιμών μετατόπισης, αλλά σε υψηλότερες τιμές φορτίων. Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι αναδεικνύει τη σημασία των μη γραμμικών αριθμητικών μοντέλων που



αναπτύχθηκαν, μιας και μπορούν να προσδιορίσουν τη μορφή του διαγράμματος δύναμης - μετατόπισης και μετά τις αρχικές αστοχίες. Π.χ. εάν μια ανάλυση περιοριζόταν στο να αξιολογήσει τις αρχικές αστοχίες των κατασκευών sandwich που εξετάζονται, τότε μια διαμόρφωση με μεγαλύτερο πάχος πυρήνα θα σταματούσε να μελετάται σε χαμηλότερη τιμή μετατόπισης σε σχέση με μια διαμόρφωση με μικρότερο πάχος πυρήνα. Με τη χρήση όμως των παρόντων αριθμητικών μοντέλων, το ζήτημα αυτό υπερβαίνεται, και οι διαμορφώσεις συνεχίζουν να μελετώνται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών μετατόπισης.

- δ. Στην περίπτωση της διαμόρφωσης έξι στρωμάτων αφρού στον πυρήνα σε διάταξη [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ], τα δύο στρώματα αφρού C70.55 που βρίσκονται στο κέντρο του πυρήνα έχουν συνολικά το πάχος που έχει το αντίστοιχο στρώμα αφρού C70.55 στην διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ]. Αποδεικνύεται από τη σύγκριση των στιγμιότυπων διατμητικών - θλιπτικών παραμορφώσεων και από το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης ότι η ύπαρξη διαφορετικών ισχυρών στρωμάτων αφρού γύρω από το ίδιου πάχους αδύναμο στρώμα έχει ελάχιστη επίδραση στις τιμές των φορτίων στα οποία επέρχονται οι αρχικές αστοχίες θλίψης και διάτμησης, καθώς και στις αντίστοιχες τιμές μετατοπίσεων. Επίσης, τα διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης είναι πάρα πολύ κοντά, με μικρές μόνο διαφορές στις μέγιστες τιμές των φορτίων. Μια περισσότερο σημαντική επίδραση υπάρχει στον τρόπο τελικής καταστροφικής αστοχίας, όπου η εμφάνιση καταστροφικής αστοχίας στον πυρήνα με ρωγή συνοδεύτηκε από συνακόλουθη θραύση της επάνω ενισχυτικής πλάκας στην περίπτωση της διαμόρφωσης έξι στρωμάτων αφρού, και η οποία δεν είχε εμφανιστεί στην περίπτωση της διαμόρφωσης [ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ]. Επομένως, βασικός ρυθμιστής της συμπεριφοράς της sandwich κατασκευής αποδεικνύεται το πιο αδύναμο στρώμα αφρού, ασχέτως του τι είδους άλλα ισχυρότερα στρώματα αφρού υπάρχουν πέριξ αυτού.
- ε. Στην περίπτωση της διαμόρφωσης έξι στρωμάτων αφρού στον πυρήνα σε διάταξη [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ], αναδείχθηκε η σημασία του πάχους των αδύναμων στρωμάτων αφρού, που στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν το μισό σε σχέση με την αρχική διαμόρφωση [ΧΑΜΗΛΗ/ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ]. Διαφαίνεται από τα αριθμητικά αποτελέσματα ότι οι αρχικές αστοχίες σε θλίψη και διάτμηση επέρχονται σε μικρότερες τιμές μετατόπισης σε σχέση με τη διαμόρφωση με τρία στρώματα αφρού, σε μεγαλύτερα επίπεδα φορτίων όμως. Παρ' όλ' αυτά, συνεχίζοντας στη μη γραμμική περιοχή του διαγράμματος δύναμης - μετατόπισης, φαίνεται ότι η

διαμόρφωση έξι στρωμάτων επιτυγχάνει καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά τα φορτία, αστοχεί καταστροφικά όμως σε μικρότερη τιμή μετατόπισης σε σχέση με την περίπτωση τριων στρωμάτων αφρού.

- στ. Η περίπτωση της ασύμμετρης διαμόρφωσης [ΧΑΜΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΥΨΗΛΗ], ανάγκασε την καταπόνηση σε θλίψη και διάτμηση να εστιαστεί συντριπτικά στο λιγότερο ισχυρό επάνω στρώμα αφρού. Το ενδιαφέρον στην περίπτωση αυτή έγκειται στην εμφάνιση αστοχιών στα άλλα δύο στρώματα αφρών, είτε υπό θλίψη είτε υπό διάτμηση. Παρατηρείται ότι το κατώτερο στρώμα αφρού C70.90 ΥΨΗΛΗΣ πυκνότητας παραμένει στην ελαστική του περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης, χωρίς να εμφανιστεί ούτε θλιπτική ούτε διατμητική αστοχία. Όσον αφορά το ενδιάμεσο στρώμα αφρού C70.75 ΜΕΣΑΙΑΣ πυκνότητας, χαρακτηριστική είναι εμφάνιση αστοχιών σε θλίψη και διάτμηση σε αρκετά μεγαλύτερες τιμές μετατόπισης από αυτές του στρώματος αφρού C70.55 που αστοχεί πρώτο (στην περίπτωση μάλιστα που το πάχος του πυρήνα αυξήθηκε κατά 50% σε σχέση με το αρχικό, το στρώμα αφρού C70.75 μεσαίας πυκνότητας δεν αστόχησε καθόλου σε διάτμηση, παρά μόνο σε θλίψη). Το σημαντικό στην περίπτωση αυτής λουπόν της κατασκευής είναι ότι ο φορέας των καταπονήσεων για μεγάλο μέρος της φόρτισης είναι ένα και μόνο στρώμα αφρού, με τα υπόλοιπα στρώματα να παραμένουν είτε τελείως ελαστικά ή να εμφανίζουν τις αστοχίες τους σε θλίψη ή/και διάτμηση σε αρκετά προχωρημένα επίπεδα φόρτισης, βαθιά στην μη γραμμική περιοχή.
- ζ. Η περίπτωση, τέλος, της ασύμμετρης διαμόρφωσης [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ] αποδείχτηκε εξίσου η πιο ιδιόμορφη από όλες τις υπόλοιπες. Το γεγονός ότι το πιο αδύναμο στρώμα αφρού, C70.55 βρισκόταν στην κάτω πλευρά της κατασκευής sandwich, με δύο ίσου πάχους ισχυρότερα στρώματα αφρού από επάνω του, οδήγησε σε μια έντονη διατμητική καταπόνηση του, σε όλο το μήκος από το κέντρο της κατασκευής μέχρι περίπου τα σημεία στήριξης. Όσον αφορά τα άλλα στρώματα αφρού, το ανώτερο με αφρό C70.90 και ενδιάμεσο με αφρό C70.75, αυτά μπορεί να εμφάνισαν αρχικές αστοχίες σε θλίψη και διάτμηση, οι οποίες όμως δεν εξελίχθηκαν σχεδόν καθόλου από εκεί και έπειτα, μεταφέροντας όλο το βάρος της καταπόνησης υπό μορφής σχεδόν καθαρής διάτμησης (pure shear) στο κατώτερο στρώμα αφρού C70.55. Όσον αφορά τη σχέση μέγιστων φορτίων και μετατοπίσεων, μόνο οι ομοιογενείς διαμορφώσεις [ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ/ΜΕΣΑΙΑ] απέδωσαν υψηλότερα επίπεδα φόρτισης από τη ασύμμετρη διαμόρφωση [ΥΨΗΛΗ/ΜΕΣΑΙΑ/ΧΑΜΗΛΗ]. Ωστόσο, η σχεδόν καθαρή διάτμηση που κυριάρχησε ως φαινόμενο, ανάγκασε την κατασκευή σε καταστροφική αστοχία σε πολύ μικρότερα επίπεδα μετατόπισης σε σχέση με κάθε άλλη διαμόρφωση.

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Κλείνοντας την παρούσα εργασία, πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο αυτό μια σύνοψη των όσων περιέχονται στα προηγούμενα Κεφάλαια.'

Από την αξιολόγηση της σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων του λογισμικού LS-DYNA© με τα πειραματικά αποτελέσματα που είχε στη διάθεσή του ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- α. Πολύ καλή ταύτιση στη γραμμική περιοχή των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι οι διεργασίες που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό των ελαστικών ιδιοτήτων των υλικών που αποτελούν τα δομικά στοιχεία των κατασκευών sandwich που μελετώνται απέδωσαν ικανοποιητικά.
- β. Ικανοποιητική ταύτιση στη μορφή των διαγραμμάτων δύναμης - μετατόπισης και στην μη γραμμική περιοχή. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που εμφανίζει κάθε διαμόρφωση πυρήνα, ομοιογενής ή διαβαθμισμένη, όσον αφορά το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης, προσομοιώθηκαν επιτυχώς από το λογισμικό LS-DYNA©. Ιδιαίτερη μνεία απαιτείται να γίνει στο γεγονός ότι στις περιπτώσεις των διαβαθμισμένων διαμορφώσεων πυρήνα, αρχικά υπολογίστηκαν από το αριθμητικό μοντέλο τιμές φορτίων στη μη γραμμική περιοχή υψηλότερες από τις πειραματικές. Τροποποιώντας ωστόσο τις ιδιότητες των υλικών των πυρήνων (λαμβάνοντας τις ελάχιστες τιμές αντοχής σε θλίψη και διάτμηση που παρέχονται από τον κατασκευαστή), μεταβλήθηκαν και οι τιμές των μέγιστων φορτίων προς τα κάτω σε αποδεκτά επίπεδα. Με τον τρόπο αυτό δεικνύεται ότι πιθανά το σφάλμα στην αρχική εκτίμηση των φορτίων στη μη γραμμική περιοχή να οφείλεται σε διαφορετικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται και όχι σε μη αποτελεσματικότητα του αριθμητικού μοντέλου.
- γ. Επιτυχημένη πρόβλεψη των αρχικών αστοχιών τοπικής θλίψης του πυρήνα (indentation) και διάτμησης (shear failure). Η σειρά εμφάνισης των αρχικών αυτών αστοχιών επετεύχθη στα αριθμητικά μοντέλα με την ίδια σειρά που εμφανίζεται και στα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και στα ίδια στρώματα αφρού του πυρήνα που συμβαίνει αυτό.
- δ. Επιτυχημένη πρόβλεψη της εξέλιξης των διατμητικών παραμορφώσεων (shear strain mapping) κατά το πάχος του πυρήνα.
- ε. Στις περιπτώσεις μοντελοποίησης καταστροφικής αστοχίας των δοκών sandwich:

- Όταν επρόκειτο για αστοχία στις ενισχυτικές πλάκες, τα μοντέλα υλικών MAT\_22 (MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE) και MAT\_54 (MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) απέδωσαν με παρόμοιο τρόπο, με μόνη διαφορά το ότι το μοντέλο MAT\_54 εμφάνιζε την καταστροφική του αστοχία σε επίπεδα βύθισης της δοκού sandwich ελαφρώς μεγαλύτερα από το μοντέλο MAT\_22. Δεδομένης της αβεβαιότητας που υπήρχε στις ιδιότητες των υλικών των δοκών sandwich, οι επιδόσεις τους στο κομμάτι της μοντελοποίησης της καταστροφικής αστοχίας κρίθηκε ικανοποιητική.
- Όταν επρόκειτο για αστοχία στα στρώματα αφρού του πυρήνα, η τεχνική διαγραφής των στοιχείων του αφρού όταν ικανοποιούνταν το κριτήριο μέγιστης κύριας ανηγμένης παραμόρφωσης (maximum principal strain) απέδωσε ικανοποιητικά στο κομμάτι που αφορούσε το σημείο έναρξης της καταστροφικής αστοχίας, και την αρχική διάδοση της, ενώ δεν απέδωσε ικανοποιητικά στην τελική μορφή της διαδρομής εξέλιξης της αστοχίας. Αυτό σημαίνει ότι τα αριθμητικά μοντέλα μπορούν να προβλέψουν τις κρίσιμες περιοχές του πυρήνα των δοκών sandwich που μελετήθηκαν, αλλά η προσεγγιστική φύση του κριτηρίου που χρησιμοποιήθηκε οδηγεί σε μειονεκτήματα όσον αφορά τη μελέτη συνολικά της διάδοσης της καταστροφικής αστοχίας. Ούτως ή άλλως, το γεγονός και μόνο ότι αποτελεί ένα κριτήριο το οποίο πρέπει να ρυθμιστεί (calibration) με βάση πειραματικά αποτελέσματα, και δεν είναι προβλέψιμο εκ των προτέρων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει ανάγκη για βελτίωση των τρεχόντων δυνατοτήτων του λογισμικού LS-DYNA© στο κομμάτι αυτό.

Από την ποιοτική ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων των τροποποιημένων δοκών sandwich που μελετήθηκαν (αύξηση του πάχους πυρήνα των αρχικών δοκών κατά 25% και 50% και χρήση τεσσάρων (4) επιπλέον μοτίβων διαβάθμισης (gradation patterns)), προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- α. Η αύξηση του πάχους του πυρήνα των αρχικών δοκών sandwich έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των φαινομένων τοπικής θλίψης (indentation) και διάτμησης στην περιοχή γύρω από τον κύλινδρο φόρτισης, χωρίς εκτεταμένη διάδοση προς τα σημεία στήριξης των δοκών sandwich. Επιπλέον, το αυξημένο πάχος οδηγεί σε ενίσχυση των φαινομένων τοπικής θλίψης έναντι των φαινομένων διάτμησης, η αλληλεπίδραση των οποίων κυριαρχεί στη μη γραμμική περιοχή, μεταβάλλοντας έτσι και την μορφή του διαγράμματος δύναμης – μετατόπισης (πιο ομαλή μετάβαση στη μη γραμμική

- περιοχή). Ακόμη, η αύξηση του πάχους οδήγησε στην επίτευξη υψηλότερων μέγιστων φορτίων στην κατασκευή, και επακόλουθα υψηλότερων φορτίων τη στιγμή της καταστροφικής αστοχίας. Ωστόσο, η μετατόπιση τη στιγμή της αστοχίας ήταν σε κάθε περίπτωση χαμηλότερη. Ένα άλλο σημείο στο οποίο επηρεάζει η αύξηση του πάχους του πυρήνα αφορά την εμφάνιση των αρχικών αστοχιών τοπικής θλίψης (indentation) και διάτμησης. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του πυρήνα, σε τόσο μικρότερες τιμές μετατόπισης εμφανίζονται οι αρχικές αυτές αστοχίες, σε μεγαλύτερα επίπεδα φορτίου παρ' όλ' αυτά (το γεγονός αυτό καταδεικνύει και τη σημασία των αριθμητικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν, ώστε η ανάλυση μιας δοκού sandwich να μη σταματάει στην εμφάνιση των πρώτων αστοχιών, ειδικά αν συμβαίνουν πολύ νωρίς στη φόρτιση, αλλά να μπορεί να συνεχίζει βαθιά στη μη γραμμική περιοχή).
- β. Η χρήση διαφορετικών μοτίβων διαβάθμισης (gradation) του πυρήνα έδειξε ότι ο βασικός ρυθμιστής της συμπεριφοράς της sandwich κατασκευής είναι πάντα το πιο αδύναμο στρώμα αφρού του πυρήνα, και ότι τα πέριξ αυτού στρώματα αφρού έχουν μόνο δευτερεύουσα σημασία. Το πάχος του αδύναμου στρώματος αφρού βέβαια, είναι αυτό που επηρεάζει τον τρόπο αλληλεπίδρασης των φαινομένων τοπικής θλίψης (indentation) και διάτμησης που κυριαρχούν στη μη γραμμική περιοχή. Η θέση του στον πυρήνα επίσης, σε σχέση με τα υπόλοιπα στρώματα αφρού, μεταβάλλει τον τρόπο αλληλεπίδρασης των φαινομένων που προαναφέρθηκαν.

Συνοπτικά, αποδεικνύεται και από τα αριθμητικά μοντέλα ότι ο κύριος ρόλος της χρήσης της βηματικής διαβάθμισης (step-wise gradation) στον πυρήνα των δοκών sandwich που μελετήθηκαν δεν είναι το να βελτιώνει συνολικά την απόδοση της κατασκευής, αλλά να λειτουργεί ρυθμιστικά, οδηγώντας της μηχανική συμπεριφορά σε επιθυμητές κατευθύνσεις, στους ακόλουθους τομείς:

- Την τοποθεσία εμφάνισης των αρχικών αστοχιών θλίψης και διάτμησης στον πυρήνα
- Τις τιμές φορτίου – μετατόπισης στις οποίες εμφανίζονται οι αρχικές αστοχίες
- Την αλληλεπίδραση των φαινομένων θλίψης και διάτμησης στη μη γραμμική περιοχή των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης, καθώς και τη γενική μορφή του διαγράμματος δύναμης – μετατόπισης
- Τον τρόπο παραμόρφωσης της δοκού sandwich, ιδίως στη μη γραμμική περιοχή
- Τη θέση εμφάνισης και το είδος της καταστροφικής αστοχίας της δοκού



## Κεφάλαιο 7: Προτάσεις για επιπλέον έρευνα

Είναι σαφές από τον τρόπο δόμησης των αριθμητικών μοντέλων ότι η παρούσα μελέτη χρήζει πολλής περισσότερης βελτίωσης, κυρίως λόγω του ότι δεν υπήρχε η δυνατότητα για την εκτέλεση πειραμάτων από τον συγγραφέα, και χρησιμοποιήθηκε η λύση της χρήσης πειράματος δημοσιευμένου από άλλη ερευνητική ομάδα. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο θέμα το οποίο πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι οι εξής:

- Δόμηση ενός συνόλου πειραμάτων με σκοπό το χαρακτηρισμό των υλικών κατασκευής των δοκών sandwich που μελετώνται. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται η πειραματική μελέτη τόσο των υλικών κατασκευής των ενισχυτικών πλακών, όσο και των αφρών PVC που χρησιμοποιήθηκαν. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται τα εξής:
  - Εξασφαλίζονται ακριβή πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία αφορούν το εκάστοτε υλικό που μελετάται. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη των αριθμητικών μοντέλων ώστε τα τελευταία να λειτουργήσουν με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται και η ανάγκη αναζήτησης πειραματικών αποτελεσμάτων σε βιβλιογραφικές πηγές ή δημιουργίας υποθέσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλματα των αριθμητικών μοντέλων, λόγω του ότι δεν συνάδουν με την πραγματική κατάσταση που επιχειρείται να προσομοιωθεί.
  - Διευρύνεται κατά πολύ ο αριθμός των μοντέλων υλικών που δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση των πραγματικών δομικών υλικών. Γνωρίζοντας τον τρόπο ορισμού του κάθε μοντέλου υλικού που επιθυμείται να χρησιμοποιηθεί, είναι δυνατό να οργανωθούν και τα κατάλληλα πειράματα που θα εξασφαλίσουν τα απαραίτητα δεδομένα για ενσωμάτωση στο λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί. Ως εκ τούτου:
    - Πιο εξελιγμένα μοντέλα υλικών δύνανται να χρησιμοποιηθούν, με στόχο την βέλτιστη μοντελοποίηση των φαινομένων που προσομοιώνονται.
    - Τα απλά μοντέλα υλικών, όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, μπορούν να αξιολογηθούν σε σχέση με τα πιο εξελιγμένα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να διαπιστωθεί σε τι βαθμό μπορούν να αντικαταστήσουν τα πιο εξελιγμένα μοντέλα υλικών, σε περιπτώσεις που και μια λιγότερο λεπτομερής προσομοίωση θα ήταν χρήσιμη, π.χ. κατά τη φάση προκαταρκτικής σχεδίασης μιας κατασκευής, ή ακόμα και

αναγκαία, σε περίπτωση π.χ. μη διαθεσιμότητας επαρκών υπολογιστικών πόρων.

- Εμβάθυνση σε αναλυτικό και υπολογιστικό επίπεδο στον τρόπο καταστροφικής αστοχίας των αφρών PVC, που στο πλαίσιο των εμπορικών λογισμικών Πεπερασμένων Στοιχείων πραγματοποιείται με προσεγγιστικό τρόπο. Απώτερος στόχος θα μπορούσε να είναι η δυνατότητα για εκ των προτέρων πρόβλεψη του τρόπου καταστροφικής αστοχίας των αφρών, ειδικά υπό σύνθετες καταπονήσεις, ώστε να μην απαιτείται η προσεγγιστική ρύθμιση (calibration) των αριθμητικών μοντέλων βάσει κάποιου πειράματος καταστροφικής αστοχίας.
- Χρήση επιπλέον εμπορικών λογισμικών Πεπερασμένων Στοιχείων, π.χ. ABAQUS®, για σύγκριση με το τρέχον LS-DYNA® και τον εντοπισμό συγκλίσεων και διαφορών.
- Αριθμητική μελέτη διαφορετικών (π.χ. κάμψη τεσσάρων (4) σημείων) ή/και πιο σύνθετων φαινομένων φόρτισης κατασκευών sandwich με διαβαθμισμένο (graded) πυρήνα. Ενδιαφέρον, κατά τη γνώμη του συγγραφέα, παρουσιάζουν δυναμικά προβλήματα, όπως κρούσης/διάτρησης, σε διαφόρων τύπων κατασκευές sandwich. Το πρόβλημα αυτό καθίσταται ακόμα πιο προκλητικό εάν μελετηθούν περιπτώσεις αριθμητικών μοντέλων που προσομοιώνουν πραγματικές περιπτώσεις κατασκευών, όπως π.χ. το πηδάλιο ενός αεροσκάφους ή το πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας.

Καθίσταται σαφές ωστόσο ότι τα πλαίσια ενός Μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών ίσως να μην είναι τόσο ευρέα ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί ένα σημαντικό μέρος των ανωτέρω προτάσεων. Θεωρείται πιο δόκιμη η ένταξή τους στα πλαίσια μιας Διδακτορικής διατριβής ή και μιας ομάδας Διδακτορικών διατριβών, με την πλήρη συνδρομή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο τμήμα των υποδομών, πειραματικών και υπολογιστικών, που είναι απολύτως απαραίτητη.



## Βιβλιογραφία

- [1] G. Udupa, S. Shirkantha Rao, K.V. Ganghadharan, **Functionally graded composite materials: An overview**, *International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering*, 2014
- [2] A.F. Avila, P.C.M. Rodrigues, E.A. Nogueira, **Experimental investigation on sandwich composites with functionally graded core**, *46<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASC/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, 2005
- [3] J. Zhou, Z.W. Guan, W.J. Cantwell, **The impact response of graded foam sandwich structures**, *Composite Structures*, 97, 370-377, 2013
- [4] A. Rajaneesh, I. Sridhar, S. Rajendran, **Relative performance of metal and polymeric foam sandwich plates under low velocity impact**, *International Journal of Impact Engineering*, 65, 126-136, 2014
- [5] X.R. Liu, X.G. Tian, T.J. Lu, B. Liang, **Sandwich plates with functionally graded metallic foam core subjected to air blast loading**, *International Journal of Mechanical Sciences*, 84, 61-72, 2014
- [6] C. Kaboglu, S. Pimenta, A. Morris, J. P. Dear, **Strain visualization of composite sandwich structures with core material for wind turbine blades**, *Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials*, 2015
- [7] **AIREX C70 Universal Structural Foam Data Sheet**, 2011
- [8] ASTM Standard C393-00, **Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions**, 2000.
- [9] M. Styles, P. Compston, S. Kalyanasundaram, **Finite element modelling of core thickness effects in aluminium foam/composite sandwich structures under flexural loading**, *Composite Structures*, 86, 227-232, 2008
- [10] A.G. Mamalis, K.N. Spentzas, D.P. Papapostolou, N. Pantelelis, **Finite element investigation of the influence of material properties on the crushing characteristics of in-plane loaded composite sandwich panels**, *Thin-Walled Structures*, 63, 163-174, 2013
- [11] C. Menna, A. Zinno, D. Asprone, A. Prota, **Numerical assessment of the impact behavior of honeycomb sandwich structures**, *Composite Structures*, 106, 326-339, 2013

- [12] F.K. Chang, K. Y. Chang, **Post-failure analysis of bolted composite joints in tension and shear-out mode failure**, *Journal of Composite Materials*, 21, 809-833, 1987
- [13] F.K. Chang, K.Y. Chang, **A progressive damage model for laminated composites containing stress concentration**, *Journal of Composite Materials*, 21, 834-855, 1987
- [14] J. O. Hallquist, **LS-DYNA Theory Manual**, 2006
- [15] J.O. Hallquist, **LS-DYNA Keyword User's Manual Volume II – Material Models**, 2014
- [16] A.G. Mamalis, D.E. Manolacos, M.B. Ioannidis, D.P. Papapostolou, **Finite element modelling of the crushing response of composite sandwich panels with FRP tubular reinforcements**, *International Journal of Crashworthiness*, 11, 177-188, 2006
- [17] H.M. Elsanadedy, Y.A. Al-Salloum, S.H. Alsayed, R.A. Iqbal, **Experimental and numerical investigation of size effects in FRP-wrapped concrete columns**, *Construction and Building Materials*, 29, 56-72, 2012
- [18] E. Sevkat, B. Liaw, F. Delale, **Drop-weight impact response of hybrid composites impacted by impactor of various geometries**, *Material and Design*, 52, 67-77, 2013
- [19] M. Ghalami-Ghoobar, M. Sadighi, **Investigation of high-velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber-metal laminates skins and polyurethane core**, *Aerospace Science and Technology*, 32, 142-152, 2014
- [20] A. Hashin, **Failure criteria for unidirectional fiber composites**, *Journal of Applied Mechanics*, 47, 329, 1980
- [21] G.S. Dhaliwal, G.M. Newaz, **Experimental and numerical investigation of flexural behavior of carbon fiber reinforced aluminum laminates**, *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 35, 945-956, 2016
- [22] F.A. Tavarez, L.C. Bank, M.E. Plesha, **Analysis of fiber-reinforced polymer composite grid reinforced concrete beams**, *ACI Structural Journal*, 100, 250-258, 2003
- [23] P. Feraboli, F. Deleo, B. Wade, M. Rassaian, M. Higgins, A. Byar, M. Reggiani, A. Bonfatti, L. DeOto, A. Masini, **Predictive modeling of an energy-absorbing sandwich structural concept using the building block approach**, *Composites: Part A*, 41, 774-786, 2010
- [24] [www.matweb.com](http://www.matweb.com), τελευταία επίσκεψη 20/5/2018
- [25] [www.azom.com](http://www.azom.com), τελευταία επίσκεψη 12/5/2018

- [26] **Gurit Prime 20 LV Epoxy Infusion System Data Sheet**, 2015
- [27] K.A. Brown, R. Brooks, N.A. Warrior, P.P. Kulandaivel, **Predictive modeling of the impact response of thermoplastic composite sandwich structures**, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 12, 449-476, 2010
- [28] A.G. Hanssen, O.S. Hopperstadt, M. Langseth, **Crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler – numerical analyses**, *Transactions on the Built Environment*, 32, 1998
- [29] A.K. Toksoy, M. Guden, **Partial Al foam filling of commercial 1050H14 Al crash boxes: The effect of box column thickness and foam relative density on energy absorption**, *Thin-Walled Structures*, 48, 482-494, 2010
- [30] A. Rajaneesh, I. Sridhar, S. Rajendran, **Impact modeling of foam cored sandwich plates with ductile or brittle faceplates**, *Composite Structures*, 94, 1745-1754, 2012
- [31] A. Rajaneesh, I. Sridhar, S. Rajendran, **Simplified failure analysis of circular composite sandwich plates under bending**, *International Journal of Mechanical Sciences*, Accepted Manuscript (available only online, 2014)
- [32] Y.Y. Tay, C.S. Lim, H.M. Lankarani, **A finite element analysis of high-energy absorption cellular materials in enhancing passive safety of road vehicles in side-impact accidents**, *International Journal of Crashworthiness*, 19, 288-300, 2014
- [33] I. Elnasri, H. Zhao, **Impact perforation of sandwich panels with aluminum foam core: A numerical and analytical study**, *International Journal of Impact Engineering*, 96, 50-60, 2016
- [34] J.-M. Berthelot, E. Lolive, **Non-linear behavior of foam cores and sandwich materials, Part 1: Materials and modeling**, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 4, 219-247, 2002
- [35] G.T. Lim, V. Altstadt, **Understanding the compressive behavior of linear and cross-linked poly(vinyl chloride) foams**, *Journal of Cellular Plastics*, 45, 419-439, 2009
- [36] M. Kelly, **Comparing the blast tolerance of different composite structures**, *PhD Thesis*, Imperial College of London, 2016
- [37] E.E. Gdoutos, I.M. Daniel, K.-A. Wang, **Failure of cellular foams under multiaxial loading**, *Composites: Part A*, 33, 163-176, 2002
- [38] J.O. Hallquist, **LS-DYNA Keyword User's Manual Volume I**, 2014

