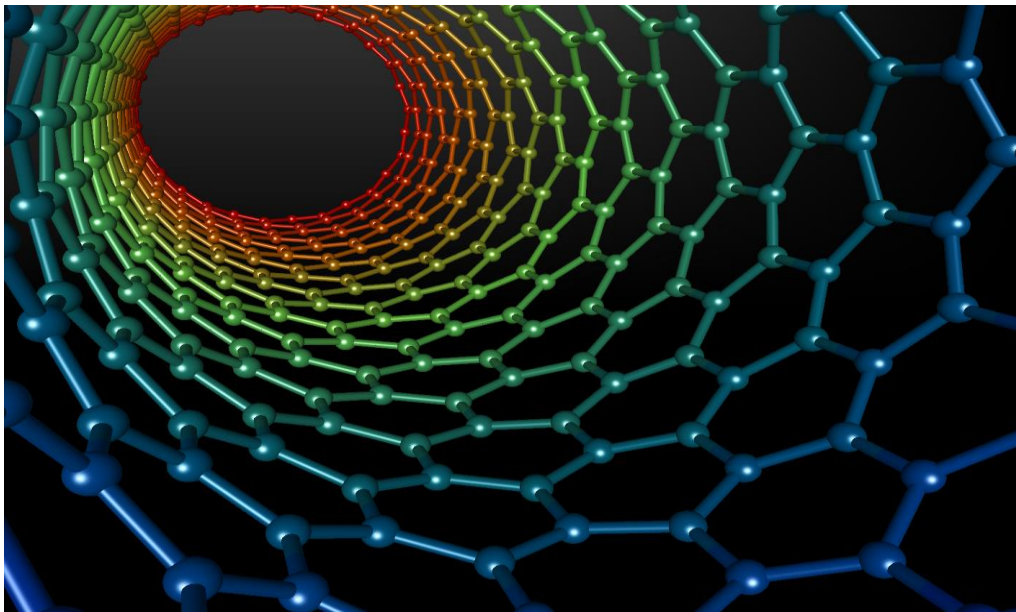




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών

Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ



Διπλωματική Εργασία
Φίλιππος Γαλούκας

CV11051

Επιβλέπων: Βησσαρίων Παπαδόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

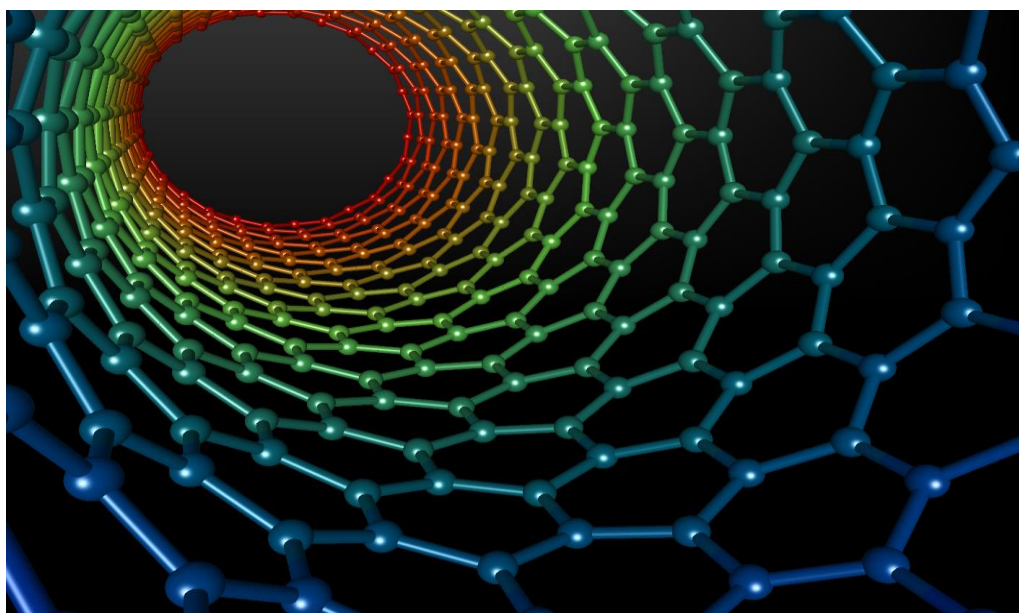


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών

**Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΗ
ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ
ΑΝΘΡΑΚΑ**



Διπλωματική Εργασία
Φίλιππος Γαλούκας

CV11051

Επιβλέπων: Βησσαρίων Παπαδόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

Copyright © Φίλιππος Γαλούκας, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Filippos Galoukas, 2016
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Φίλιππος Γαλούκας (2016)

Η επιρροή της γεωμετρικής μη γραμμικότητας στις ιδιότητες σύνθετων υλικών ενισχυμένων με
νανοσωλήνες άνθρακα

Διπλωματική Εργασία CV11051

Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Filippos Galoukas (2016)

Diploma Thesis CV11051

The influence of geometric nonlinearity on the properties of composite materials reinforced with
carbon nanotubes

Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research, National Technical University of Athens,
Greece

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε αυτή την προσπάθεια καθοριστική υπήρξε η συμβολή, η καθοδήγηση και η στήριξη ορισμένων ανθρώπων που βρέθηκαν δίπλα μου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βησσαρίων Παπαδόπουλο, επίκουρο καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π., που μου έδωσε τη δυνατότητα να διεκπεραιώσω την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψή του δείχνοντας εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου. Η συστηματική καθοδήγηση και οι ποιοτικές παρατηρήσεις του διαδραμάτισαν σπουδαίο ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ.κ. Γιάννη Καλογερή, Γιώργο Σοϊμοίρη και Δημήτρη Σάββα, για τη σημαντική βοήθειά τους στην επίλυση αποριών αλλά και για το χρόνο που μου διέθεσαν μέχρι να ολοκληρωθεί η εργασία.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να σταθώ και στα πρόσωπα που με στηρίζουν καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων. Ευχαριστώ τους γονείς μου, Θωμά και Μαρία, την αδερφή μου, Κάτια, και τους συμφοιτητές και φίλους μου για τη συμπαράσταση και την αγάπη τους.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
CV11051

**Η επιρροή της γεωμετρικής μη γραμμικότητας στις ιδιότητες σύνθετων υλικών ενισχυμένων με νανοσωλήνες άνθρακα
Φίλιππος Γαλούκας**

Επιβλέπων: Βησσαρίων Παπαδόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η επιρροή της γεωμετρικής μη γραμμικότητας στις ιδιότητες σύνθετων υλικών ενισχυμένων με νανοσωλήνες άνθρακα. Σε πρώτη φάση έγινε η εισαγωγή σε βασικές έννοιες απαραίτητες για την κατανόηση των νανοσωλήνων άνθρακα (CNT) καθώς και της πολυαιθερικής κετόνης (PEEK) η οποία χρησιμοποιήθηκε σαν μήτρα. Επιπλέον έγινε επεξήγηση του τρόπου μοντελοποίησης σε θεωρητικό επίπεδο καθώς και των βασικών αρχών της μη γραμμικής ανάλυσης. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε το σύνθετο υλικό στο λογισμικό Abaqus. Πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν και εξετάστηκαν 16 μοντέλα. Από αυτά το ένα περιελάμβανε μόνο το υλικό της μήτρας ενώ τα υπόλοιπα ήταν μοντέλα με ποσοστά όγκου 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10% του CNT ως προς το PEEK για τρεις διαφορετικές καμπυλότητες. Οι περιπτώσεις καμπυλοτήτων που εξετάστηκαν ήταν η ευθύγραμμη, αυτή με τις 2 καμπύλες και αυτή με τη 1 καμπύλη. Τέλος έγινε μη γραμμική ανάλυση στα μοντέλα αυτά και παρουσιάστηκαν διάφορα αποτελέσματα, ενώ από συγκρίσεις που έγιναν προέκυψαν ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL ANALYSIS AND ANTISEISMIC RESEARCH

DIPLOMA THESIS
CV11051

**The influence of geometric nonlinearity on the properties of composite materials
reinforced with carbon nanotubes**

Filippos Galoukas

Supervisor: Vissarion Papadopoulos, Assistant Professor N.T.U.A.

ABSTRACT

Purpose of this thesis is the influence of geometric nonlinearity on the properties of composite materials reinforced with carbon nanotubes. In first place, basic concepts necessary for the understanding of carbon nanotubes (CNT) and poly-ether-ether ketone (PEEK) - which was the "host" element - were introduced. Furthermore, the modelling method was explained in theoretical and academic basis, as well as the basic principles of nonlinear analysis. Following that, the way that the composite material was modelled with Abaqus software was presented in detail. More specifically, 16 models were created and tested. One of these contained only the matrix material, while the rest were those with volume fraction 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10% of the CNT regarding PEEK for three different curvatures.

The curvature cases examined were the following: the straight one, the double-curve one and the one-curve one. Finally, non-linear analysis took place for the above mentioned models and several results were demonstrated, while taking into consideration specific assessments and associations some really remarkable findings emerged.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο και στόχος της διπλωματικής εργασίας	1
1.2	Δομή	1
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	3
2.1	Εισαγωγή	3
2.2	Βασικές έννοιες για τα CNTs και το PEEK	3
2.2.1	Δομή των νανοσωλήνων άνθρακα	3
2.2.2	Μέθοδοι προσομοίωσης των CNTs	6
2.2.3	Δομική μοριακή μηχανική	6
2.2.4	Ισοδύναμο στοιχείο δοκού (EBE)	7
2.2.5	Πολυαιθερική Κετόνη (PEEK)	9
2.2.6	Τεχνική Ενσωματωμένου Στοιχείου (The embedded element technique)	11
2.3	Βασικές έννοιες μη γραμμικής ανάλυσης	13
2.3.1	Αλγόριθμοι αριθμητικής επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων	13
2.3.2	Πλήρης μέθοδος Newton-Raphson	15
2.3.3	Παραλλαγές της πλήρους μεθόδου Newton-Raphson	17
2.3.4	Οι μέθοδοι ελέγχου φορτίου (load control) και μετακίνησης (displacement control)	19
2.3.5	Οι μέθοδοι μήκους τόξου (arc-length)	19
3	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΒΑQUS	23
3.1	Εισαγωγή	23
3.2	Μοντελοποίηση στο Abaqus	23
3.2.1	Εισαγωγή του PEEK	24
3.2.2	Εισαγωγή του CNT	28
3.2.2.1	Εισαγωγή του CNT (Ευθύγραμμο)	30
3.2.2.2	Εισαγωγή του CNT (2 καμπύλες)	33
3.2.2.3	Εισαγωγή του CNT (1 καμπύλη)	34
3.2.3	Ενσωμάτωση του CNT στο PEEK	36
3.2.4	Συνθήκες στήριξης και ασκούμενο φορτίο	37
3.2.5	Ανάλυση	40
4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	43
4.1	Εισαγωγή	43
4.2	Στοιχεία των μοντέλων και αποτελέσματα αυτών	43
4.2.1	Μοντέλο χωρίς ύπαρξη υλικού CNT	44
4.2.2	Μοντέλο με αναλογία όγκου 0,5%	47
4.2.2.1	Ευθύγραμμο CNT	47

4.2.2.2	CNT 2 καμπύλες	49
4.2.2.3	CNT 1 καμπύλη	51
4.2.2.4	Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης	53
4.2.3	Μοντέλο με αναλογία όγκου 1%.....	54
4.2.3.1	Ευθύγραμμο CNT	54
4.2.3.2	CNT 2 καμπύλες	56
4.2.3.3	CNT 1καμπύλη	58
4.2.3.4	Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης	60
4.2.4	Μοντέλο με αναλογία όγκου 2%.....	61
4.2.4.1	Ευθύγραμμο CNT	61
4.2.4.2	CNT 2 καμπύλες	63
4.2.4.3	CNT 1καμπύλη	65
4.2.4.4	Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης	67
4.2.5	Μοντέλο με αναλογία όγκου 5%.....	68
4.2.5.1	Ευθύγραμμο CNT	68
4.2.5.2	CNT 2 καμπύλες	70
4.2.5.3	CNT 1καμπύλη	72
4.2.5.4	Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης	74
4.2.6	Μοντέλο με αναλογία όγκου 10%.....	75
4.2.6.1	Ευθύγραμμο CNT	75
4.2.6.2	CNT 2 καμπύλες	77
4.2.6.3	CNT 1 καμπύλη	79
4.2.6.4	Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης	81
4.3	Σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών ποσοστών αναλογίας όγκου	82
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	85
6	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	87
6.1	Εισαγωγή	87
6.2	Πίνακες υπολογισμών	87
6.2.1	ΡΕΕΚ χωρίς ύπαρξη υλικού CNT.....	87
6.2.2	Αναλογία όγκου 0.5%	88
6.2.3	Αναλογία όγκου 1%.....	91
6.2.4	Αναλογία όγκου 2%.....	94
6.2.5	Αναλογία όγκου 5%.....	97
6.2.6	Αναλογία όγκου 10%.....	100
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και στόχος της διπλωματικής εργασίας

Οι νανοσωλήνες αποτελούν τις τελευταίες δεκαετίες ένα ιδιαίτερα σημαντικό ερευνητικό πεδίο, στο οποίο έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους πολλές επιστημονικές ομάδες, κι αυτό λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των αναπτυσσόμενων υλικών. Οι μηχανικές, ηλεκτρικές, θερμοδυναμικές και οπτικές ιδιότητες των νανοσωλήνων, τους καθιστούν δυνητικά ως τις βέλτιστες λύσεις σε πλήθος εφαρμογών.

Έχει υπολογισθεί ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα παρουσιάζουν πολύ μεγάλη μεγάλη δυσκαμψία της τάξης του 1TPa. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον λοιπόν παρουσιάζει η συμπεριφορά τους όταν βρίσκονται ενσωματωμένοι μέσα σε ένα άλλο υλικό καθώς επίσης και οι μεταβολές που εμφανίζονται στις ιδιότητές τους λόγω της καμπυλότητάς τους. Σημαντικό μέρος αυτής της εργασίας είναι επίσης και ο τρόπος προσομοίωσης αυτής της ενσωμάτωσης του νανοσωλήνα άνθρακα μέσα στη μήτρα πολυαιθερικής κετόνης.

Το Abaqus είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται σε πολύ μεγάλο βαθμό για αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία και προσφέρει ολοκληρωμένες λύσεις σε μεγάλο φάσμα προβλημάτων των μηχανικών.

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των νανοσωλήνων άνθρακα σε ένα σύνθετο υλικό. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η επιρροή της γεωμετρικής μη γραμμικότητας στις ιδιότητες σύνθετων υλικών ενισχυμένων με νανοσωλήνες άνθρακα. Για την επίτευξη αυτού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Abaqus και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

1.2 Δομή

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή της διπλωματικής εργασίας και περιγράφεται συνοπτικά το κάθε κεφάλαιο.

– ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται βασικές έννοιες που χρειάζονται για να γίνει η κατανόηση του θέματος των νανοσωλήνων άνθρακα και της πολυαιθερικής κετόνης που χρησιμοποιήθηκε ως μήτρα ενώ γίνεται επίσης και μία εισαγωγή σε κάποιες εισαγωγικές έννοιες της μη γραμμικής ανάλυσης.

– ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Λογισμικό Abaqus

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο έγινε η μοντελοποίηση στο Abaqus.

– ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αριθμητικές εφαρμογές - Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα δεδομένα του κάθε μοντέλου καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν.

– ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα όλων των μοντέλων.

– ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παράρτημα Α

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι πίνακες μορφής Excel οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή των διαγραμμάτων συνισταμένης δύναμης-χρόνου σε διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρειάζεται για να γίνει κατανοητό το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες σχετικά με τους νανοσωλήνες άνθρακα και της μήτρας που χρησιμοποιήθηκε. Στόχος του είναι να κατανοηθούν θέματα σχετικά με τη δομή των νανοσωλήνων άνθρακα καθώς και για τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η προσομοίωσή τους. Επιπλέον γίνεται και μια μικρή εισαγωγή στην έννοια της μήτρας που χρησιμοποιήθηκε (πολυαιθερική κετόνη).

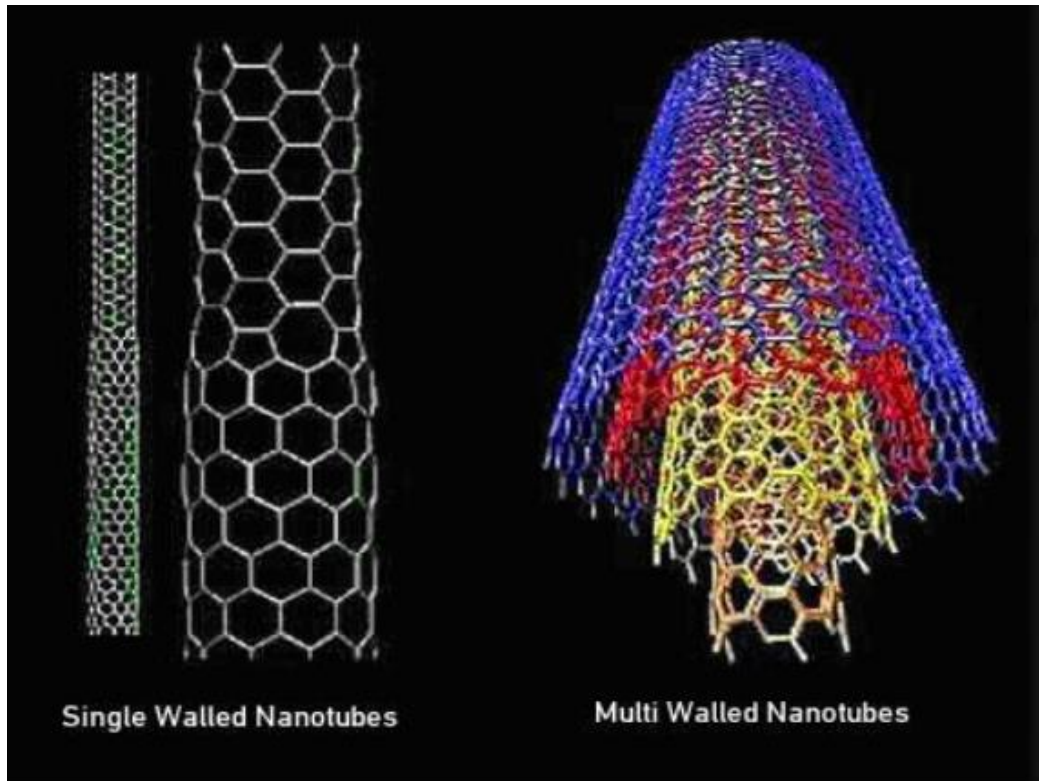
Στο δεύτερο σκέλος του κεφαλαίου αναλύονται βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την εισαγωγή στη μη γραμμική ανάλυση. Σκοπός του είναι να επεξηγηθούν διάφορες μέθοδοι επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων με πεπερασμένα στοιχεία ώστε να γίνει κατανοητή η μέθοδος ελέγχου των μετακινήσεων (displacement control) η οποία χρησιμοποιήθηκε και στη συγκεκριμένη εργασία.

Το θεωρητικό υπόβαθρο που παρουσιάζεται έγινε κατανοητό από την διδακτορική διατριβή του Δημήτρη Σάββα καθώς και από δημοσιεύσεις του με τον επιβλέποντα καθηγητή Β. Παπαδόπουλο και τον κ. Μ. Παπαδρακάκη. Πολύ σημαντική βοήθεια έδωσαν και οι σημειώσεις του καθηγητή Χ. Γαντέ από το μάθημα της μη γραμμικής ανάλυσης για την κατανόηση του δεύτερου μέρους.

2.2 Βασικές έννοιες για τα CNTs και το PEEK

2.2.1 Δομή των νανοσωλήνων άνθρακα

Οι νανοσωλήνες άνθρακα διακρίνονται σε μονότοιχους νανοσωλήνες άνθρακα (SWCNT) που προσομοιώνονται με μια σωληνοειδή κατασκευή αποτελούμενη από ένα μοναδικό φύλλο γραφενίου και σε πολύτοιχους νανοσωλήνες άνθρακα (MWCNTs) οι οποίοι αποτελούνται από ομόκεντρους μονότοιχους νανοσωλήνες άνθρακα διαφορετικών ακτίνων.



Εικόνα 2-1: Μονότοιχοι και πολύτοιχοι νανοσωλήνες άνθρακα

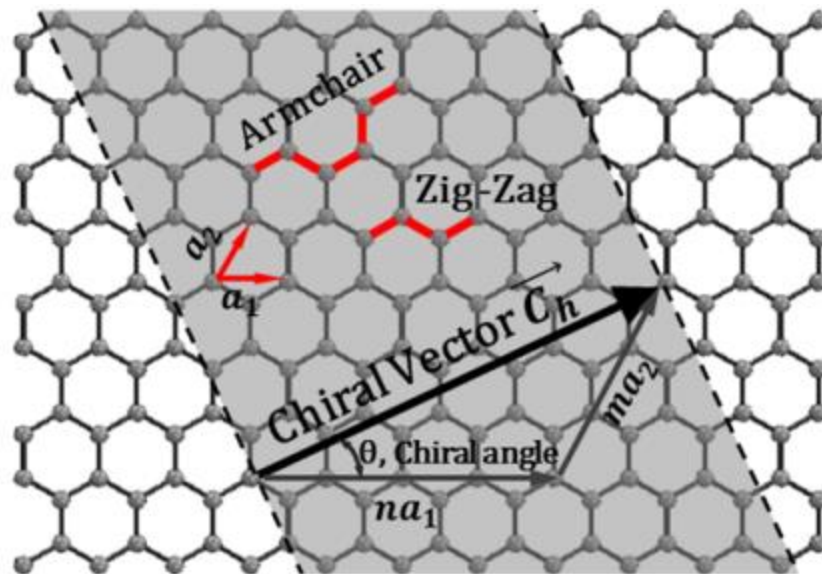
Η ατομική δομή του νανοσωλήνα προσδιορίζεται από ένα χαρακτηριστικό διάνυσμα \vec{C}_h (chiral vector), το οποίο μαζί με τη γωνία θ (chiral angle) καθορίζει τη διεύθυνση διπλώσης του φύλλου γραφενίου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-2, ένας νανοσωλήνας με chirality (n, m) προκύπτει κόβοντας το φύλλο γραφενίου κατά μήκος των διακεκομμένων γραμμών και διπλώνοντάς το κατά τη διεύθυνση του χαρακτηριστικού διανύσματος. Το διάνυσμα αυτό ορίζεται ως εξής:

$$\vec{C}_h = n \vec{a}_1 + m \vec{a}_2$$

Και η γωνία θ του χαρακτηριστικού διανύσματος δίνεται από την εξίσωση

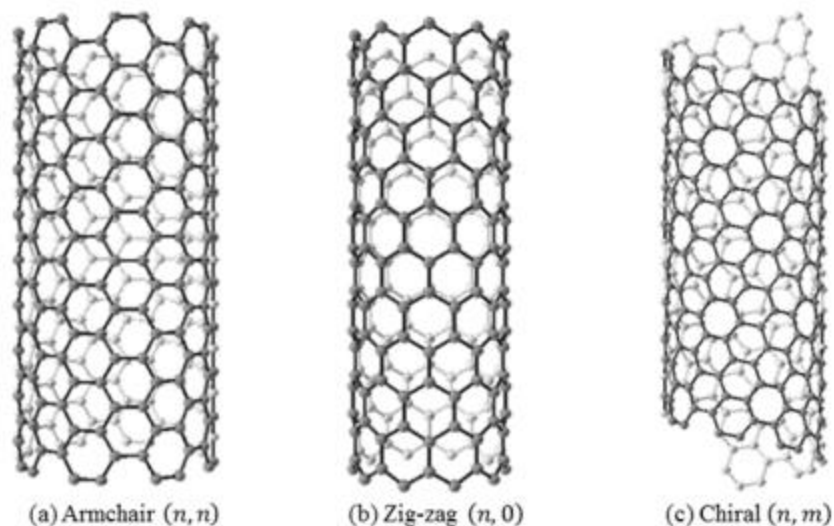
$$\theta = \text{atan}\left(\frac{m\sqrt{3}}{2n+m}\right)$$

όπου \vec{a}_1 και \vec{a}_2 είναι τα διανύσματα βάσης που φαίνονται στην Εικόνα 2-2 ενώ (n, m) είναι οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν το chirality του νανοσωλήνα.



Εικόνα 2-2: Ατομικό πλέγμα φύλλου γραφενίου: Προσδιορισμός του chiral vector \vec{C}_h από τα διανύσματα βάσης \vec{a}_1 και \vec{a}_2

Ανάλογα με τις τιμές του ζεύγους (n, m) οι νανοσωλήνες είναι και διαφορετικού τύπου. Συνεπώς, για $n=m$ ο νανοσωλήνας χαρακτηρίζεται ως «armchair» και η γωνία θ είναι 30° ενώ για $n \neq 0, m=0$ ο νανοσωλήνας χαρακτηρίζεται ως «zig-zag» και η γωνία θ είναι 0° . Για οποιοδήποτε άλλο συνδυασμό τιμών των παραμέτρων n και m η γωνία $\theta \in (0^\circ, 30^\circ)$ και ο νανοσωλήνας χαρακτηρίζεται ως «chiral». Στην Εικόνα 2-3 παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικοί τύποι νανοσωλήνων.



Εικόνα 2-3: Ατομική δομή νανοσωλήνα τύπου: a) armchair, b) zig-zag και c) chiral

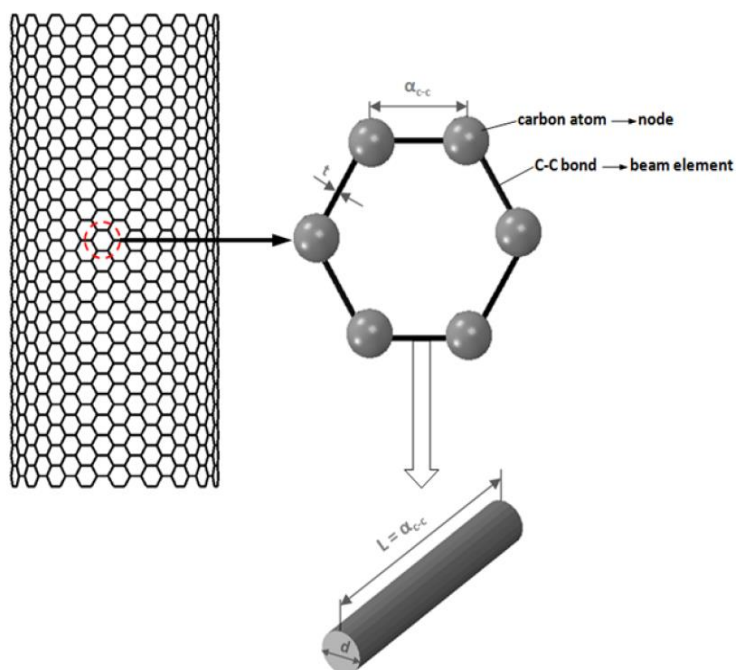
2.2.2 Μέθοδοι προσομοίωσης των CNTs

Υπάρχουν τρεις κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των νανοσωλήνων άνθρακα:

- Μοριακή προσομοίωση
- Προσομοίωση συνεχούς μέσου
- Υβριδική μέθοδος (συνδυασμός των προηγούμενων δύο)

2.2.3 Δομική μοριακή μηχανική

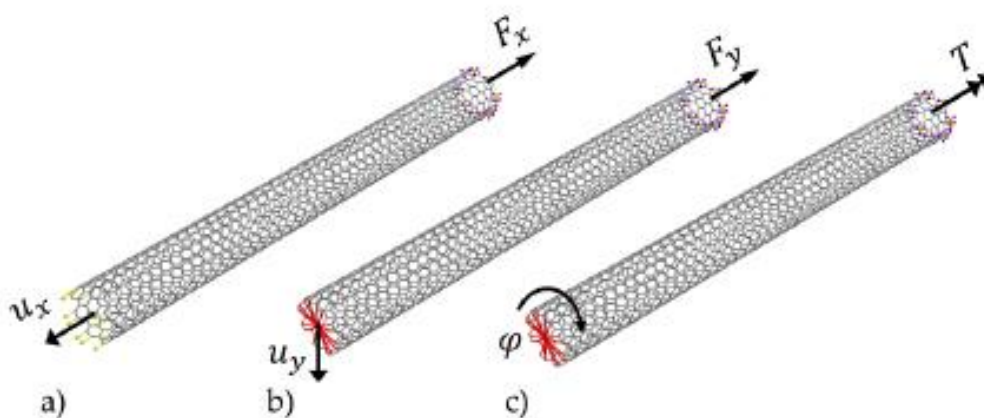
Μία μέθοδος προσομοίωσης των νανοσωλήνων άνθρακα είναι η δομική μοριακή μηχανική Molecular structural mechanics (MSM). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αντικατάσταση των αλληλεπιδράσεων του χημικού ομοιοπολικού δεσμού άνθρακα-άνθρακα (C-C) με ένα ισοδύναμο δομικό στοιχείο, συγκεκριμένα με μία ενεργειακά ισοδύναμη δοκό. Η Εικόνα 2-4 απεικονίζει τη δομή ενός νανοσωλήνα άνθρακα που είναι μοντελοποιημένος με την μέθοδο της δομικής μοριακής μηχανικής, όπου διακρίνεται η διάταξη ενός εξαγωνικού δικτύου δοκών.



Εικόνα 2-4: Δομή ενός νανοσωλήνα άνθρακα που είναι μοντελοποιημένος με την μέθοδο της δομικής μοριακής μηχανικής

2.2.4 Ισοδύναμο στοιχείο δοκού (ΕΒΕ)

Παρότι η μέθοδος της δομικής μοριακής μηχανικής υπερτερεί ως προς τον υπολογιστικό φόρτο έναντι των υπολοίπων ο υπολογιστικός φόρτος συνεχίζει να είναι πολύ μεγάλος. Για παράδειγμα ένας νανοσωλήνας άνθρακα διαμέτρου 14nm και μήκους 1μm αντιστοιχεί σε αριθμητικό πρόβλημα με βαθμούς ελευθερίας της τάξης 10^7 . Συνεπώς η ανάλυση σύνθετων υλικών ενισχυμένων με νανοσωλήνες άνθρακα είναι μια υπερβολικά απαιτητική διαδικασία υπολογισμών. Για τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου της μεθόδου της δομικής μοριακής μηχανικής, το χωρικό πλαίσιο που σχηματίζουν οι δοκοί που αναπαριστούν τους χημικούς δεσμούς, προσομοιώνεται πλέον από ένα ισοδύναμο στοιχείο δοκού (ΕΒΕ). Οι σταθερές ακαμψίας ενός ισοδύναμου στοιχείου δοκού προσδιορίζονται υποβάλλοντας το χωρικό πλαίσιο σε αξονικό εφελκυσμό, καθαρή κάμψη και στρέψη. Στην Εικόνα 2-5 φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες και τα φορτία που εφαρμόζονται στο χωρικό πλαίσιο του νανοσωλήνα άνθρακα για κάθε μία από τις περιπτώσεις φόρτισης.



Εικόνα 2-5: Διακριτοποίηση και συνοριακές συνθήκες με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για a) εφελκυσμό b) κάμψη c) στρεπτική φόρτιση στο μοντέλο του νανοσωλήνα άνθρακα

Ειδικότερα, η αξονική ακαμψία του νανοσωλήνα άνθρακα υπολογίζεται επιβάλλοντας μία αξονική μετακίνηση u_x στην άκρη του, ενώ είναι προσομοιωμένος με ένα χωρικό πλαίσιο μήκους L_0 με τη μέθοδο της δομικής μοριακής μηχανικής. Το άλλο άκρο στο οποίο υπάρχει και υπολογίζεται η δύναμη αντίδρασης F_x είναι δεσμευμένο. Έτσι η αξονική δυσκαμψία υπολογίζεται:

$$(EA)_{eq} = \frac{F_x L_0}{u_x} \quad (1)$$

Σε ότι αφορά την περίπτωση της κάμψης, εφαρμόζεται μια εγκάρσια μετακίνηση u_y στο κέντρο του άκρου του νανοσωλήνα άνθρακα, όπου όλοι οι κόμβοι αυτού του άκρου είναι κινηματικά περιορισμένοι

όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-5b. Το άλλο άκρο στο οποίο υπάρχει και υπολογίζεται η δύναμη αντίδρασης F_y θεωρείται δεσμευμένο. Η ισοδύναμη καμπτική ακαμψία δίνεται:

$$(EI)_{eq} = \frac{F_y}{3u_y} L_0^3 \quad (2)$$

Ομοίως, για την περίπτωση της στρέψης, μία στρεπτική ροπή T εφαρμόζεται στο κέντρο του άκρου του ναοσωλήνα άνθρακα, όπου όλοι οι κόμβοι αυτού του άκρου είναι κινηματικά περιορισμένοι όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-5c. Οι κόμβοι στη διατομή του άλλου άκρου είναι δεσμευμένοι. Η γωνία περιστροφής ϕ του κεντρικού υπολογίζεται με τη βοήθεια της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η ισοδύναμη στρεπτική ακαμψία του ναοσωλήνα άνθρακα δίνεται:

$$(GJ)_{eq} = \frac{T}{\phi} L_0 \quad (3)$$

Για τον καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας από τις υπολογισμένες δυσκαμψίες πρέπει να γίνει η επιλογή ενός προφίλ της διατομής του ισοδύναμου στοιχείου δοκού. Για παράδειγμα, αν επιλεγεί το προφίλ ενός σωλήνα οι ιδιότητες της διατομής δίνονται:

$$A_{eq} = \frac{\pi}{4} \left[(d_{eq} + t)^2 - (d_{eq} - t)^2 \right] \quad (4)$$

$$I_{eq} = \frac{\pi}{64} 2 \left[(d_{eq} + t)^4 - (d_{eq} - t)^4 \right] \quad \text{and} \quad J_{eq} = 2I_{eq} \quad (5)$$

όπου η ισοδύναμη διάμετρος d_{eq} υπολογίζεται από τις αξονικές και καμπτικές ακαμψίες για ένα τυχαία επιλεγμένο πάχος t της δοκού:

$$d_{eq} = \sqrt{8 \frac{(EI)_{eq}}{(EA)_{eq}} - t^2} \quad (6)$$

2.2.5 Πολυαιθερική Κετόνη (PEEK)

Πρόκειται για ένα πολυμερές υλικό και συγκεκριμένα για την πολυαιθερική κετόνη poly-ether-ether-ketone (PEEK). Είναι ένα κρυσταλλικό θερμοπλαστικό υλικό με αξιοσημείωτες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοπλαστικά υλικά έχουν τρία βασικά πλεονεκτήματα: α) μικρό ειδικό βάρος, β) μικρές απαιτήσεις ενέργειας και γ) χαμηλό κόστος παραγωγής. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς παραγωγής όπως αυτοκινητοβιομηχανία, παραγωγή αθλητικών ειδών, ηλεκτρονικών και σε πολλά άλλα πεδία.

Αν και τα θερμοπλαστικά υλικά έχουν υψηλότερη αντοχή αναλογικά με το βάρος από το αλουμίνιο και τον χάλυβα, έχουν ένα βασικό μειονέκτημα το οποίο είναι η χαμηλή δυσκαμψία αναλογικά με το βάρος ειδικά σε αυξημένες θερμοκρασίες. Για να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες είναι αναγκαία η ενίσχυσή τους, ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν σε μία ποικιλία εφαρμογών

Polymer	Density (g cm ⁻³)	Young's modulus (20°C 100s) (GPa)	Tensile strength (MPa)	Fracture toughness (20°C) (MPa m ^{1/2})	Glass temperature T_G (K)	Softening expansion temperature T_s (K)	Thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Polyethylene, PE	0.91-0.94	0.15-0.24	7-17	1-2	270	355	0.35
Polypropylene, PP	0.91	1.2-1.7	50-70	3.5	253	31	0.2
Polystyrene, PS	1.1	3.0-3.3	35-68	2	370	370	0.1-0.15
Polyvinyl, PVC	1.4	2.4-3.0	40-60	2.4	350	370	0.15
Poly-ether-ether-ketone, PEEK	1.3-1.4	2.7-3.5	80-100	-	416	426	-

Εικόνα 2-6: Ιδιότητες θερμοπλαστικών πολυμερών

Στην διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ο τύπος PEEK 450g του οποίου τα χαρακτηριστικά φαίνονται παρακάτω στην Εικόνα 2-7.

	Condition	Test Method	Units	Unfilled			
				PEEK 90G	PEEK 151G	PEEK 381G	PEEK 450G
Mechanical Properties							
Tensile Strength	Yield, 73°F	ISO 527	psi	16,000	16,000	14,500	14,500
	Break, 73°F						
	Break, 257°F						
	Break, 347°F						
	Break, 527°F						
Tensile Elongation	73°F	ISO 527	%	15	25	40	45
Tensile Modulus	73°F	ISO 527	psi	540,000	540,000	540,000	540,000
Flexural Strength	73°F	ISO 178	psi	26,100	25,400	24,700	23,900
	257°F			13,800	13,100	13,100	12,900
	347°F			2,900	2,800	2,600	2,600
	527°F			2,000	1,900	1,900	1,900
Flexural Modulus	73°F	ISO 178	psi	620,000	620,000	610,000	590,000
Compressive Strength	73°F	ISO 604	psi	17,400	17,400	17,400	17,400
	248°F			10,200	10,200	10,200	10,200
	392°F						
	482°F						
Charpy Impact Strength	Notched, 73°F	ISO 179/1eA	ft-lb/in ²	1.9	1.9	2.9	3.3
	Unnotched, 73°F	ISO 179/1U		no break	no break	no break	no break
Izod Impact Strength	Notched, 73°F	ISO 180/A	ft-lb/in ²	2.1	2.4	3.1	3.6
	Unnotched, 73°F	ISO 180/U		no break	no break	no break	no break
Thermal Properties							
Melting Point		ISO 3146	°F	649	649	649	649
Glass Transition (T _g)	Onset	ISO 3146	°F	289	289	289	289
Coefficient of Thermal Expansion	Along flow <T _g	ISO 11359	ppm/°F	25	25	25	25
	Average <T _g			31	31	31	31
	Along flow >T _g			67	67	67	67
	Average >T _g			78	78	78	78
Heat Deflection Temperature	260 psi	ISO 75A-f	°F	313	313	306	306
Thermal Conductivity	73°F	ISO/CD 22007-4	W/mK	0.29	0.29	0.29	0.29
RTI	Electrical	UL 746B	°C		260	260	260
	Mechanical without Impact				240	240	240
	Mechanical with Impact				180	180	180
Flow Properties							
Melt Viscosity	750°F	ISO 11443	poise	900	1300	3000	3500
	790°F						
Other Properties							
Specific Gravity	73°F	ISO 1183		1.30	1.30	1.30	1.30
Density	73°F	ISO 1183	lb/in ³	0.047	0.047	0.047	0.047
Electrical Properties							
Dielectric Strength	0.1 inch thickness	IEC 60243-1	V/mil	630	630	630	630
Comparative Tracking Index	73°F	IEC 60112	V	150	150	150	150
Loss Tangent	73°F, 1MHz	IEC 60250	n/a	0.003	0.003	0.003	0.003
Dielectric Constant	73°F, 1kHz	IEC 60250	n/a	3.3	3.3	3.2	2.8
Volume Resistivity	73°F	IEC 60093	Ω-in	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁴
Recommended Processing Conditions							
Temperature Settings	nozzle - hopper		°F	680-660	690-660	700-660	705-670
Mold Temperature (max 480°F)			°F	320-390	320-390	340-390	340-390
Spiral Flow	0.04 inch wall thickness		Inch	9.6	8.7	5.1	4.3
	0.12 inch wall thickness						
Mold Shrinkage	Along flow	ISO 294-4	%	1.0	1.0	1.0	1.0
	Across flow		%	1.3	1.3	1.3	1.3

Εικόνα 2-7: Χαρακτηριστικά διαφόρων PEEK

2.2.6 Τεχνική Ενσωματωμένου Στοιχείου (The embedded element technique)

Για να αποφευχθούν πολύπλοκες διακριτοποιήσεις στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων στην περίπτωση σύνθετων υλικών χρησιμοποιείται μια μέθοδος η οποία ονομάζεται τεχνική ενσωματωμένου στοιχείου. Συγκεκριμένα η τεχνική του ενσωματωμένου στοιχείου χρησιμοποιείται όταν ένα μεμονωμένο ή ένα σύνολο από στοιχεία είναι ενσωματωμένο μέσα σε ένα στοιχείο «δέκτη». Πρόκειται για μία τεχνική η οποία έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές για τη μοντελοποίηση των σιδέρων που οπλίζουν το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή γίνεται αναζήτηση για γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των κόμβων του ενσωματωμένου στοιχείου και του στοιχείου «δέκτη». Σε περίπτωση που κάποιος κόμβος του ενσωματωμένου στοιχείου συμπίπτει με κάποιον κόμβο του στοιχείου «δέκτη», οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας του κόμβου εξαλείφονται και δημιουργείται ένας «ενσωματωμένος κόμβος». Οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας του ενσωματωμένου κόμβου περιορίζονται στις παρεμβαλλόμενες τιμές των αντίστοιχων βαθμών ελευθερίας του στοιχείου «δέκτη». Στα ενσωματωμένα στοιχεία τους επιτρέπεται να έχουν στροφικούς βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι δεν δεσμεύονται από την ενσωμάτωση. Η δυσκαμψία του ισοδύναμου στοιχείου δοκού υπολογίζεται στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων από την εξίσωση:

$$K^B = T^T k^b T = T^T \left[\int_{V_e} B^T D B dV_e \right] T \quad (7)$$

Όπου T είναι ο πίνακας μετατροπής με τους κινηματικούς περιορισμούς, k^b είναι ο πίνακας τοπικής ακαμψίας, D είναι ο τανυστής του υλικού και το B περιέχει τις παραγώγους των συναρτήσεων σχήματος που συνδέουν τις παραμορφώσεις με τις μετακινήσεις και τις στροφές της δοκού. Για παράδειγμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-8 όταν μία δοκός θεωρείται ενσωματωμένο στοιχείο (embedded beam element) μέσα στο 8 κομβικό στερεό στοιχείο (solid element), οι βαθμοί ελευθερίας σχετίζονται με τις επικόμβιες μετακινήσεις σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ v_i \\ v_j \\ w_i \\ w_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N^M & 0 & 0 \\ 0 & N^M & 0 \\ 0 & 0 & N^M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^M \\ V^M \\ W^M \end{bmatrix} \quad (8)$$

Όπου

$$N^M = \begin{bmatrix} N_{1(i)} \dots N_{8(i)} \\ N_{1(j)} \dots N_{8(j)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

είναι οι συναρτήσεις σχήματος του στερεού στοιχείου εκτιμώμενοι στα σημεία i και j όπου πέφτουν οι κόμβοι της δοκού

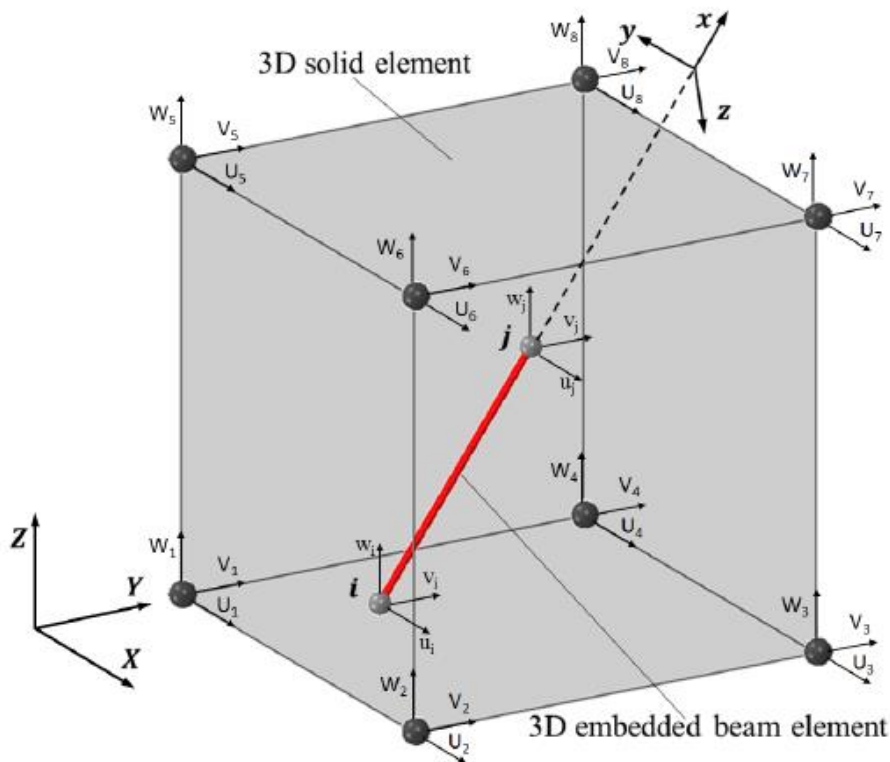
$$U^M = [U_1 \dots U_8]^T, V^M = [V_1 \dots V_8]^T, W^M = [W_1 \dots W_8]^T \quad (10\alpha)$$

είναι οι επικόμβιες μετακινήσεις του στερεού στοιχείου δέκτη.

Τροποποιώντας τον πίνακα παραμορφώσεων B με την εξίσωση (7), ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση (8), παράγεται ένα εκτεταμένο μητρώο (30 x 30) για την ακαμψία της δοκού \bar{K}^B , που έχει 24 μεταφορικούς [UM, VM, WM] βαθμούς ελευθερίας του στοιχείου δέκτη και 6 στροφικούς βαθμούς ελευθερίας [θXi, θYi, θZi, θXj, θYj, θZj] του στοιχείου δοκού για τις εξωτερικές εφαρμοζόμενες μοναδιαίες επικόμβιες δυνάμεις και ροπές. Τελικά, ο πίνακας ακαμψίας που προκύπτει από το ενσωματωμένο και το στοιχείο δέκτη για το συνολικό πλέον στοιχείο είναι ο εξής:

$$K_{(30 \times 30)} = \begin{bmatrix} K^M + \bar{K}_{TT}^B & \bar{K}_{TR}^B \\ \bar{K}_{RT}^B & \bar{K}_{RR}^B \end{bmatrix} \quad (10\beta)$$

Όπου K^M είναι το μητρώο δυσκαμψίας του στερεού στοιχείου, \bar{K}_{TT}^B αντιπροσωπεύει το εκτεταμένο μητρώο ακαμψίας της δοκού μόνο με τους μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας, \bar{K}_{RR}^B μόνο με τους στροφικούς βαθμούς ελευθερίας, \bar{K}_{TR}^B και \bar{K}_{RT}^B που περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταφορικών και των στροφικών βαθμών ελευθερίας.



Εικόνα 2-8: Απεικόνιση του ενσωματωμένου στοιχείου δοκού μέσα στο "host" στερεό στοιχείο

2.3 Βασικές έννοιες μη γραμμικής ανάλυσης

2.3.1 Αλγόριθμοι αριθμητικής επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων

Γίνεται η υπόθεση ότι για την περιγραφή ενός φυσικού προβλήματος που πρόκειται να εξεταστεί έχει υιοθετηθεί ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με συνθήκη ισορροπίας εκφρασμένη από την σχέση:

$${}^tR - {}^tF = 0 \quad (11)$$

όπου το διάνυσμα tR είναι οι εξωτερικές επικόμβιες δράσεις στο χρόνο t και το διάνυσμα tF είναι οι επικόμβιες δυνάμεις που αντιστοιχούν στις αναπτυσσόμενες τάσεις των στοιχείων στην ίδια θέση παραμόρφωσης.

Στην περίπτωση της μη γραμμικής ανάλυσης με στόχο η απόκριση να μπορεί να προσεγγιστεί ως γραμμική σε κάθε βήμα φόρτισης, γίνεται μια σταδιακή επιβολή του φορτίου. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία επίλυσης μη γραμμικών εξισώσεων, η οποία ονομάζεται επαυξητική βήμα προς βήμα επίλυση, θεωρείται γνωστή η λύση στο χρόνο t και αναζητείται η λύση τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$, όπου Δt είναι μια επαύξηση του χρόνου, στην οποία αντιστοιχεί μια κατάλληλα επιλεγόμενη επαύξηση του φορτίου. Επομένως, θεωρώντας την εξίσωση (11) για χρόνο $t+\Delta t$ η συνθήκη ισορροπίας είναι:

$${}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F = 0 \quad (12)$$

όπου ${}^{t+\Delta t}R$ είναι το διάνυσμα των εξωτερικών δράσεων και ${}^{t+\Delta t}F$ το διάνυσμα των εσωτερικών δυνάμεων που αντιστοιχούν στις εσωτερικές τάσεις των στοιχείων στο χρόνο $t+\Delta t$, το οποίο εκφράζεται ως επαύξηση του αντίστοιχου διανύσματος στο χρόνο t :

$${}^{t+\Delta t}F = {}^tF + F \quad (13)$$

όπου F είναι η επαύξηση των επικόμβιων δράσεων που αντιστοιχούν στην επαύξηση των μετατοπίσεων και των τάσεων από το χρόνο t στο χρόνο $t+\Delta t$. Αυτό το διάνυσμα μπορεί να προσεγγιστεί από το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας tK , το οποίο αντιστοιχεί στις γεωμετρικές συνθήκες και στις συνθήκες του υλικού στο χρόνο t :

$$F = {}^tKU \quad (14)$$

Στην εξίσωση (14), U είναι ένα διάνυσμα επαυξητικών επικόμβιων μετατοπίσεων μεταξύ των χρονικών στιγμών t και $t+\Delta t$, και το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας tK αντιστοιχεί στην παράγωγο των εσωτερικών επικόμβιων δράσεων tF ως προς τις επικόμβιες μετατοπίσεις tU :

$${}^t\mathbf{K} = \frac{\partial {}^t\mathbf{F}}{\partial {}^t\mathbf{U}} \quad (15)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (13) και (14) στην εξίσωση (12), προκύπτει:

$${}^t\mathbf{K}\mathbf{U} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^t\mathbf{F} \quad (16)$$

Επιλύοντας την πιο πάνω εξίσωση ως προς \mathbf{U} μπορεί να υπολογιστεί μια προσεγγιστική έκφραση των μετατοπίσεων στο χρόνο $t+\Delta t$:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U} = {}^t\mathbf{U} + \mathbf{U} \quad (17)$$

Επισημαίνεται ότι οι ακριβείς μετατοπίσεις στο χρόνο $t+\Delta t$ είναι εκείνες που αντιστοιχούν στα εφαρμοζόμενα εξωτερικά φορτία ${}^t\mathbf{R}$, ενώ στην εξίσωση (17) εισάγεται η προσέγγιση λόγω χρήσης της εξίσωσης (14).

Έχοντας υπολογίσει προσεγγιστικά τις μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στο χρόνο $t+\Delta t$, μπορούν να υπολογιστούν, επίσης προσεγγιστικά, οι τάσεις και οι αντίστοιχες εσωτερικές επικόμβιες δράσεις στο χρόνο $t+\Delta t$ και να συνεχιστεί η διαδικασία αυτή για το επόμενο χρονικό βήμα. Όμως, λόγω της παραδοχής που γίνεται στην εξίσωση (14), μια τέτοια λύση μπορεί να επιφέρει σημαντικά σφάλματα και ανάλογα με τα μεγέθη των χρονικών βημάτων ενδέχεται να είναι ασταθής ως προς τη σύγκλιση της. Έτσι, απαιτείται να γίνουν επαναλήψεις μέχρι η λύση της εξίσωσης (12) να επιτευχθεί με ικανοποιητική ακρίβεια.

Οι πιο γνωστές επαναληπτικές μέθοδοι στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν παραλλαγές της μεθόδου Newton-Raphson. Αυτή η μέθοδος είναι επέκταση της απλής επαυξητικής μεθόδου των εξισώσεων (16) και (17). Οι βασικές εξισώσεις της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson είναι:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}^{(i-1)}\Delta\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)} \quad (18)$$

όπου i είναι ο αριθμός της τρέχουσας επανάληψης, ${}^t\mathbf{K}^{(i-1)}$ είναι το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας και $\Delta\mathbf{U}^{(i)}$ είναι μια επαύξηση του τρέχοντος διανύσματος μετατοπίσεων από το χρόνο t στο χρόνο $t+\Delta t$:

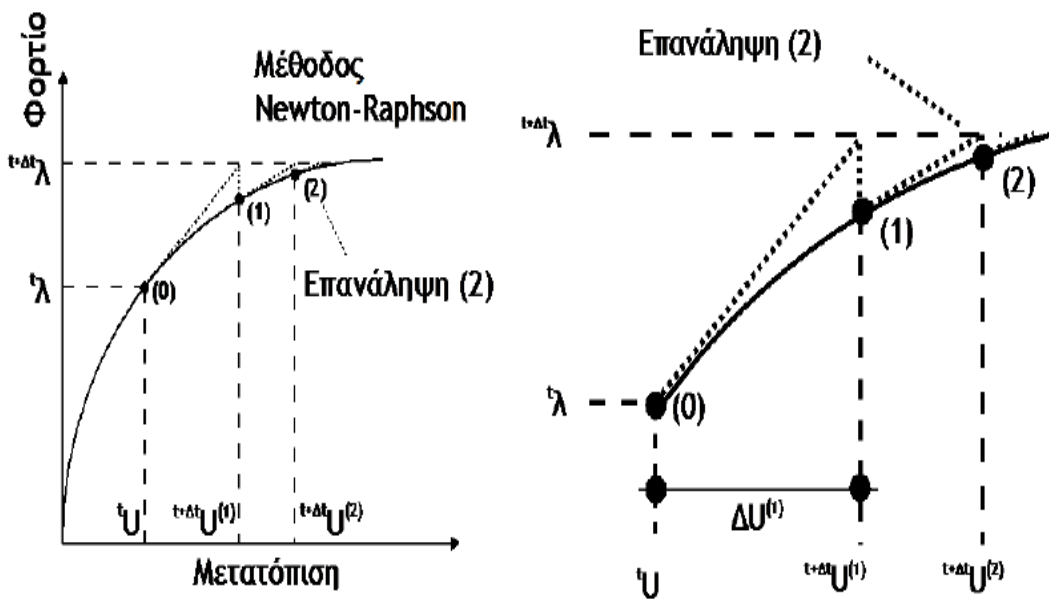
$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{U}^{(i)} \quad (19)$$

με τις αρχικές συνθήκες:

$${}^{t+\Delta t}U^{(0)} = {}^tU, \quad {}^{t+\Delta t}K^{(0)} = {}^tK, \quad {}^{t+\Delta t}F^{(0)} = {}^tF \quad (20)$$

2.3.2 Πλήρης μέθοδος Newton-Raphson

Η πλήρης μέθοδος Newton-Raphson είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 2-9: Η μέθοδος Full Newton-Raphson και μεγέθυνση στο τρέχον βήμα

Η απαίτηση για ισορροπία του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί την εύρεση της λύσης του ακόλουθου συστήματος εξισώσεων:

$$f(\bar{U}) = {}^{t+\Delta t}R(\bar{U}) - {}^{t+\Delta t}F(\bar{U}) = 0 \quad (21)$$

όπου \bar{U} είναι το διάνυσμα της λύσης, το οποίο περιέχει μετατοπίσεις και στροφές. Δεδομένου ότι το πρόβλημα επιλύεται επαναληπτικά και ότι έχει υπολογιστεί στην επανάληψη $i-1$ το διάνυσμα ${}^{t+\Delta t}U^{(i-1)}$, αναπτύσσοντας την εξίσωση ισορροπίας (21) σε σειρά Taylor λαμβάνεται:

$$f(\bar{U}) = f({}^{t+\Delta t}U^{(i-1)}) + \left[\frac{\partial f}{\partial U} \right]_{{}^{t+\Delta t}U^{(i-1)}} (\bar{U} - {}^{t+\Delta t}U^{(i-1)}) + O\left((\bar{U} - {}^{t+\Delta t}U^{(i-1)})^2 \right) \quad (22)$$

Αν αντικατασταθεί η εξίσωση (21) στην (22) προκύπτει:

$$\left[\frac{\partial f}{\partial \mathbf{U}} \right]_{\mathbf{t}+\Delta t, \mathbf{U}^{(i-1)}} \left(\bar{\mathbf{U}} - \mathbf{t}+\Delta t \mathbf{U}^{(i-1)} \right) + \mathcal{O} \left(\left(\bar{\mathbf{U}} - \mathbf{t}+\Delta t \mathbf{U}^{(i-1)} \right)^2 \right) = \mathbf{t}+\Delta t \mathbf{R} - \mathbf{t}+\Delta t \mathbf{F}^{(i-1)} \quad (23)$$

όπου έχει θεωρηθεί ότι τα εξωτερικά φορτία είναι ανεξάρτητα της παραμόρφωσης.

Αν στην εξίσωση (23) αμεληθούν οι όροι ανώτερης τάξης προκύπτει:

$$\mathbf{t}+\Delta t \mathbf{K}^{(i-1)} \Delta \mathbf{U}^{(i)} = \mathbf{t}+\Delta t \mathbf{R} - \mathbf{t}+\Delta t \mathbf{F}^{(i-1)} \quad (24)$$

Όπου $\mathbf{t}+\Delta t \mathbf{K}^{(i-1)}$ είναι το εφαπτομενικό μητρώο της κατασκευής.

$$\mathbf{t}+\Delta t \mathbf{K}^{(i-1)} = \left[\frac{\partial f}{\partial \mathbf{U}} \right]_{\mathbf{t}+\Delta t, \mathbf{U}^{(i-1)}} \quad (25)$$

Τότε η βελτιωμένη λύση στην επόμενη επανάληψη είναι :

$$\mathbf{t}+\Delta t \mathbf{U}^{(i)} = \mathbf{t}+\Delta t \mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta \mathbf{U}^{(i)} \quad (26)$$

Οι σχέσεις (24) και (26) αποτελούν τα βασικά βήματα της διαδικασίας επίλυσης Full Newton-Raphson. Επειδή η επίλυση γίνεται επαναληπτικά με βήμα Δt , οι αρχικές συνθήκες αυτής της επανάληψης είναι $\mathbf{t}+\Delta t \mathbf{K} = \mathbf{t}_K$, $\mathbf{t}+\Delta t \mathbf{U}^{(0)} = \mathbf{t}_U$ και $\Delta \mathbf{t} \mathbf{F}^{(0)} = \mathbf{t}_F$. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να ικανοποιηθούν κάποια κατάλληλα κριτήρια σύγκλισης, τα βασικότερα από τα οποία είναι τα ακόλουθα:

– Κριτήριο μετατοπίσεων

$$\frac{\| \Delta \mathbf{U}^{(i)} \|_2}{\| \mathbf{t}+\Delta t \mathbf{U} \|_2} \leq \epsilon_D \quad (27)$$

όπου σαν $\mathbf{t}+\Delta t \mathbf{U}$ χρησιμοποιείται η τελευταία υπολογιζόμενη τιμή $\mathbf{t}+\Delta t \mathbf{U}^{(i)}$ και $\| \dots \|_2$ είναι κάποια κατάλληλη νόρμα, όπως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων ή το άθροισμα των απολύτων τιμών.

– Κριτήριο δυνάμεων

$$\|{}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i)}\|_2 \leq \epsilon_F \|{}^{t+\Delta t}R - {}^tF\|_2 \quad (28)$$

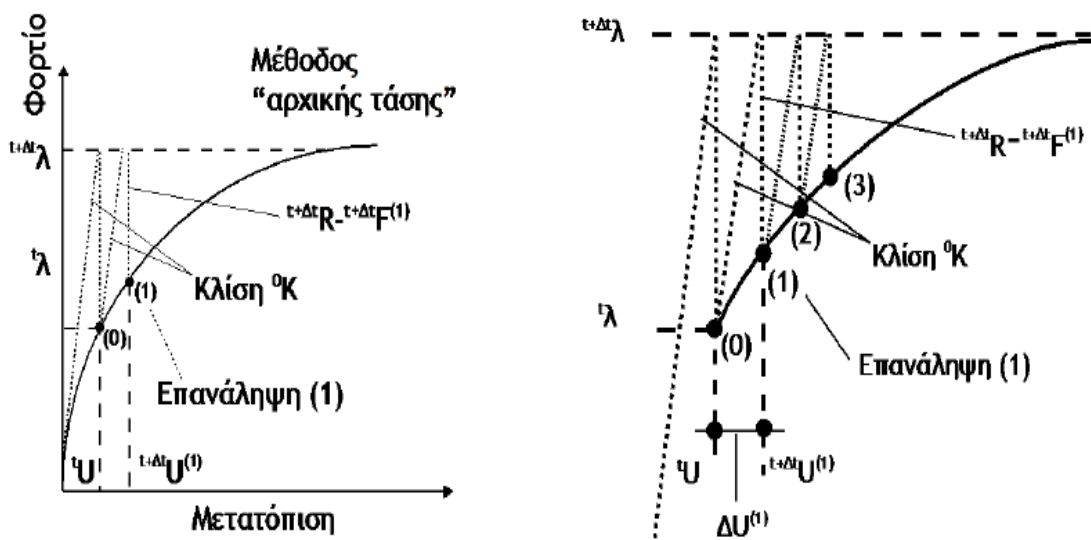
– Κριτήριο ενέργειας

$$\Delta U^{(i)T} ({}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i+1)}) \leq \epsilon_E (\Delta U^{(i)T} ({}^{t+\Delta t}R - {}^tF)) \quad (29)$$

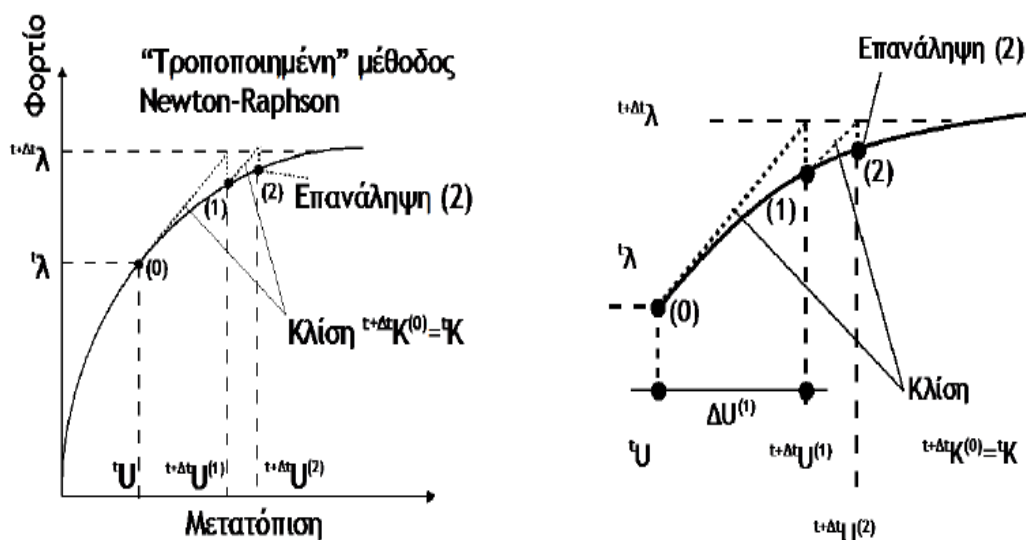
Στα παραπάνω τρία κριτήρια οι σταθερές ϵ_D , ϵ_F , ϵ_E είναι οι ανοχές σύγκλισης και η επιλογή τους προκύπτει από την ανάγκη συμβιβασμού μεταξύ της ακρίβειας της λύσης και της οικονομίας του χρόνου ή της εφικτότητας της λύσης.

2.3.3 Παραλλαγές της πλήρους μεθόδου Newton-Raphson

Το πιο χρονοβόρο μέρος σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας Full Newton-Raphson είναι ο υπολογισμός και η παραγοντοποίηση του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας. Προκειμένου να βελτιωθεί η ταχύτητα της μεθόδου έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διάφορες παραλλαγές της, από τις οποίες εδώ αναφέρονται δυο: η μέθοδος αρχικής τάσης (initial stress method) και η τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson (modified Newton Raphson). Σχηματικά οι δυο αυτές μέθοδοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 2-10 και στην Εικόνα 2-11.



Εικόνα 2-10: Η μέθοδος αρχικής τάσης και μεγέθυνση στο τρέχον βήμα



Εικόνα 2-11: Η μέθοδος Modified Newton-Raphson και μεγέθυνση στο τρέχον βήμα

Σύμφωνα με τη μέθοδο «αρχικής τάσης», το μητρώο δυσκαμψίας υπολογίζεται μόνο μια φορά, στην αρχική θέση του συστήματος πεπερασμένων στοιχείων. Το σύστημα εξισώσεων που πρέπει να επιλυθεί είναι:

$${}^0K\Delta U^{(i)} = t+\Delta t R - t+\Delta t F^{(i-1)} \quad (30)$$

με αρχικές συνθήκες $t+\Delta t F^{(0)} = {}^tF$, $t+\Delta t U^{(0)} = {}^tU$.

Η τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ της πλήρους Newton-Raphson και της μεθόδου αρχικής τάσης. Επιλύεται το σύστημα:

$${}^0K\Delta U^{(i)} = t+\Delta t R - t+\Delta t F^{(i-1)} \quad (31)$$

με αρχικές συνθήκες $t+\Delta t F^{(0)} = {}^tF$, $t+\Delta t U^{(0)} = {}^tU$, που αντιστοιχεί σε μια από τις αποδεκτές θέσεις ισορροπίας στους χρόνους $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$, ή t .

Στην τροποποιημένη μέθοδο Newton-Raphson πραγματοποιούνται λιγότεροι ανασχηματισμοί του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας από ότι στην πλήρη Newton-Raphson. Για την ικανοποίηση των κριτηρίων σύγκλισης απαιτείται μεγαλύτερο πλήθος επαναλήψεων, αλλά το υπολογιστικό κόστος ανά επανάληψη είναι αισθητά μικρότερο, με αποτέλεσμα ο συνολικός χρόνος επίλυσης να είναι συνήθως μικρότερος. Η επιλογή της συχνότητας ανασχηματισμού του μητρώου δυσκαμψίας εξαρτάται από το βαθμό της μη γραμμικότητας του προβλήματος. Όσο πιο έντονα μη γραμμική γίνεται η συμπεριφορά, τόσο πιο συχνά θα πρέπει να εκτελείται ο ανασχηματισμός. Στη συνηθισμένη μορφή εφαρμογής της μεθόδου, ο ανασχηματισμός πραγματοποιείται μία φορά σε κάθε χρονικό βήμα, κατά την πρώτη επανάληψη.

2.3.4 Οι μέθοδοι ελέγχου φορτίου (load control) και μετακίνησης (displacement control)

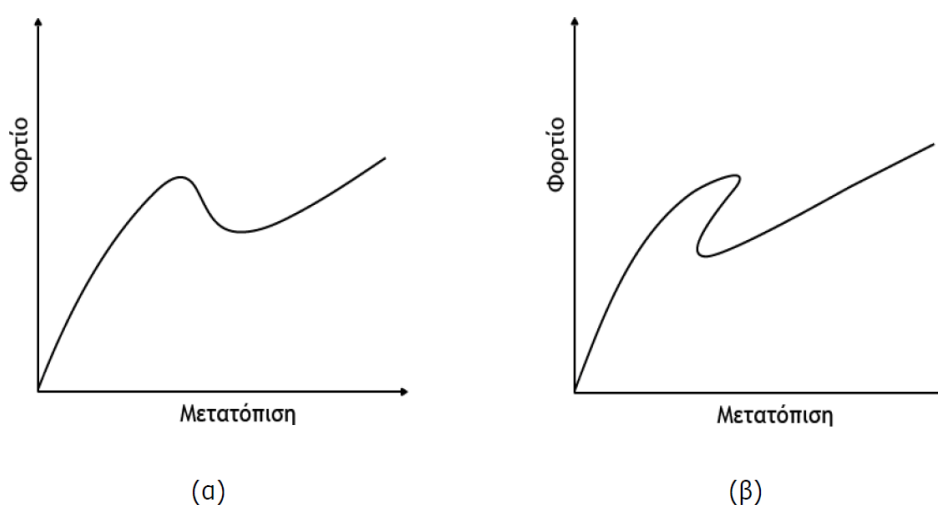
Πρόκειται για δύο μεθόδους που χρησιμοποιούν την μέθοδο Newton-Raphson. Σε ότι αφορά τη μέθοδο φορτίου (load control) γίνεται μία σταδιακή προσαύξηση του φορτίου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newton-Raphson για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων και τον επανυπολογισμό του μητρώου δυσκαμψίας σε κάθε βήμα. Η επίλυση σταματά όταν υπάρξει σύγκλιση όπως έχει περιγραφεί παραπάνω.

Κατά τη μέθοδο των μετακινήσεων (displacement control) σαν φορτίο ασκείται πλέον μια αρχική μετακίνηση. Όμοια με τη μέθοδο του φορτίου (load control) γίνεται μία σταδιακή προσαύξηση της μετακίνησης που ασκείται. Και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τη μέθοδο Newton-Raphson ώστε να επιλύσει τις μη γραμμικές εξισώσεις που προκύπτουν και τελειώνει με την σύγκλιση των κριτηρίων.

Η μέθοδος ελέγχου της μετακίνησης πλεονεκτεί έναντι της μεθόδου του φορτίου, διότι με τη μέθοδο του φορτίου δεν γίνεται να υπερπηδηθούν οι θέσεις ισορροπίας τύπου snap through το οποίο επιτυγχάνεται με τη μέθοδο των μετακινήσεων.

2.3.5 Οι μέθοδοι μήκους τόξου (arc-length)

Οι μέθοδοι μήκους τόξου (arc-length methods) είναι μέθοδοι επίλυσης στις οποίες δίνεται περιορισμός στο μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου. Στόχος τους είναι η υπερπήδηση οριακών σημείων ισορροπίας. Συγκεκριμένα κάποιες θέσεις στις οποίες αντιστοιχούν τοπικά μέγιστα ή τοπικά ελάχιστα φορτία όπως αυτά που φαίνονται στην Εικόνα 2-12. Θέσεις ισορροπίας τύπου snap-through δεν μπορούν να υπερπηδηθούν με επαναληπτικές μεθόδους στις οποίες προσαυξάνεται σταδιακά το φορτίο, παρά μόνον μέσω σταδιακής προσαύξησης των μετατοπίσεων. Και αυτή όμως η διαδικασία δεν προσφέρεται στις περισσότερες περιπτώσεις, δεδομένου ότι απαιτεί να προ-αποφασιστεί το σήμα παραμόρφωσης του φορέα. Θέσεις ισορροπίας τύπου snap-through και στη συνέχεια snap-back δεν μπορούν να υπερπηδηθούν μέσω σταδιακής προσαύξησης ούτε των φορτίων ούτε των μετατοπίσεων.

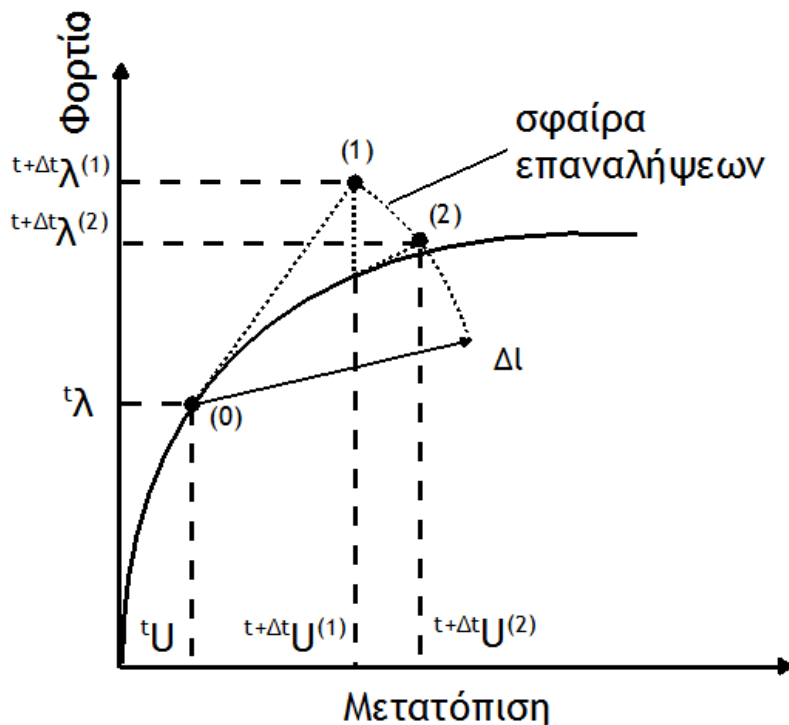


Εικόνα 2-12: Τυπικοί μη γραμμικοί δρόμοι ισορροπίας τύπου snap-through (α) και snap-through με snap-back (β)

Δύο αρχικές παραλλαγές της μεθόδου τύπου μήκους τόξου αναπτύχθηκαν περί το 1990 παράλληλα και ανεξάρτητα από τους Crisfield και Riks, ενώ αργότερα προτάθηκαν από άλλους ερευνητές και άλλες παραλλαγές, με στόχο τη βελτιστοποίηση της σύγκλισης και της ταχύτητας. Σχηματικά η μέθοδος του σφαιρικού μήκους τόξου που προτάθηκε από τον Crisfield απεικονίζεται στην Εικόνα 2-13. Αφετηρία της μεθόδου αυτής αποτελούν οι μη γραμμικές εξισώσεις ισορροπίας, οι οποίες γράφονται υπό τη μορφή:

$$G(U, \lambda) = {}^{t+\Delta t}\lambda R - {}^{t+\Delta t}F({}^{t+\Delta t}U) = 0 \quad (32)$$

Στην εξίσωση (32) R είναι το διάνυσμα της εξωτερικής φόρτισης, ${}^{t+\Delta t}\lambda$, είναι ένας πολλαπλασιαστικός συντελεστής της φόρτισης τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$, ${}^{t+\Delta t}F$ είναι το διάνυσμα των ισοδύναμων εσωτερικών δράσεων και ${}^{t+\Delta t}U$ είναι το διάνυσμα των μετατοπίσεων.



Εικόνα 2-13: Η μέθοδος σφαιρικού τόξου του Crisfield για μη γραμμικά προβλήματα

Σε μια μη γραμμική ανάλυση με σταδιακή αύξηση του φορτίου, η ανάλυση θα συναντούσε δυσκολίες κοντά στο οριακό σημείο, αφού σε αυτή την περιοχή δεν θα υπήρχε θέση ισορροπίας που να αντιστοιχεί στο επόμενο επίπεδο φόρτισης. Με τη μέθοδο μήκους τόξου επιδιώκεται η εύρεση της διασταύρωσης των εξισώσεων ισορροπίας (32) με ένα τόξο σταθερού μήκους S , το οποίο ορίζεται ως:

$$S = \int dS \quad (33)$$

$$dS = \sqrt{dU^T dU + d\lambda^2 \psi^2 R^T R} \quad (34)$$

Όπου dU είναι η διαφορική μεταβολή των μετατοπίσεων, $d\lambda$ είναι η διαφορική μεταβολή του συντελεστή φόρτισης και ψ είναι ένας συντελεστής κλίμακας. Σε μία επαυξητική μορφή επίλυσης του μη γραμμικού προβλήματος, η διαφορική εξίσωση (34) μπορεί να αντικατασταθεί από μια επαυξητική εξίσωση της μορφής:

$$\mathbf{a} = \mathbf{U}^{(i)T} \mathbf{U}^{(i)} + [({}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)} - {}^t\lambda) + \Delta\lambda^{(i)}]^2 \psi^2 \mathbf{R}^T \mathbf{R} - \Delta l^2 = 0 \quad (35)$$

όπου Δl είναι μια σταθερή «ακτίνα» της επιθυμητής διασταύρωσης με το δρόμο ισορροπίας, η οποία αποτελεί μια προσέγγιση του επαυξητικού μήκους τόξου, ${}^{t+\Delta t}U^{(i)} - {}^tU = U^{(i)}$ είναι η επαυξητική μεταβολή της μετατόπισης στην επανάληψη i του τρέχοντος βήματος και $\Delta\lambda^{(i)}$ είναι η μεταβολή του συντελεστή φόρτισης στην επανάληψη i του τρέχοντος βήματος.

Με την εισαγωγή της εξίσωσης (35), ο αριθμός των N άγνωστων μετατοπίσεων αυξάνεται σε $N+1$, όπου ο επιπρόσθετος άγνωστος είναι η μεταβολή του συντελεστή φόρτισης $\Delta\lambda^{(i)}$. Αν αναπτύξουμε τις εξισώσεις (32) και (35) σε σειρά Taylor ως προς την θέση ισορροπίας της προηγούμενης επανάληψης $i-1$ και κρατήσουμε μόνον όρους μέχρι πρώτης τάξης, έχουμε:

$$\mathbf{G}^{(i)} = \mathbf{G}^{(i-1)} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{U}} \delta \mathbf{U} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \lambda} \delta \lambda = \mathbf{G}^{(i-1)} + \mathbf{K}_t \Delta \mathbf{U}^{(i)} - \mathbf{R} \Delta \lambda^{(i)} = 0 \quad (36)$$

$$\mathbf{a}^{(i)} = \mathbf{a}^{(i-1)} + 2\mathbf{U}^{(i-1)T} \Delta \mathbf{U}^{(i)} + 2 \left[({}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)} - {}^t\lambda) \right]^T \Delta \lambda^{(i)} \psi^2 \mathbf{R}^T \mathbf{R} = 0 \quad (37)$$

Οι εξισώσεις (36) και (37) μπορούν να συνδυαστούν και να δώσουν τη λύση για τα $\Delta \mathbf{U}^{(i)}$ και $\Delta \lambda^{(i)}$:

$$\begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{U}^{(i)} \\ \Delta \lambda^{(i)} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{K}_t & -\mathbf{R} \\ 2\mathbf{U}^{(i-1)T} & 2 \left[({}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)} - {}^t\lambda) \right]^T \psi^2 \mathbf{R}^T \mathbf{R} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{G}^{(i-1)} \\ \mathbf{a}^{(i-1)} \end{Bmatrix} \quad (38)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι το επαυξημένο μητρώο δυσκαμψίας της εξίσωσης (38), σε αντίθεση με το μητρώο \mathbf{K}_t , δεν είναι ούτε συμμετρικό ούτε καλά δομημένο, με αποτέλεσμα ο απαιτούμενος για την επίλυση υπολογιστικός φόρτος να είναι μεγαλύτερος.

Όπως προαναφέρθηκε, παραλλαγές της παραπάνω διαδικασίας έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές. Μεταξύ αυτών ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέθοδοι αυτόματης μεταβολής του φορτίου, με στόχο η πυκνότητα των υπολογιζόμενων σημείων ισορροπίας να προσαρμόζεται στη μη γραμμικότητα του προβλήματος. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται μέσω συσχέτισης του μεγέθους της μεταβολής με την καμπυλότητα του μη γραμμικού δρόμου ισορροπίας ή με το πλήθος των επαναλήψεων που απαιτήθηκαν στο προηγούμενο βήμα.

3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΒΑQUS

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η μοντελοποίηση με τη βοήθεια του λογισμικού Abaqus. Συγκεκριμένα περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία με την οποία προσομοιώθηκε το μοντέλο του PEEK και του CNT στο πρόγραμμα καθώς και ο τρόπος με τον οποίο δόθηκαν στο Abaqus δεδομένα όπως οι συνθήκες στήριξης και το είδος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε.

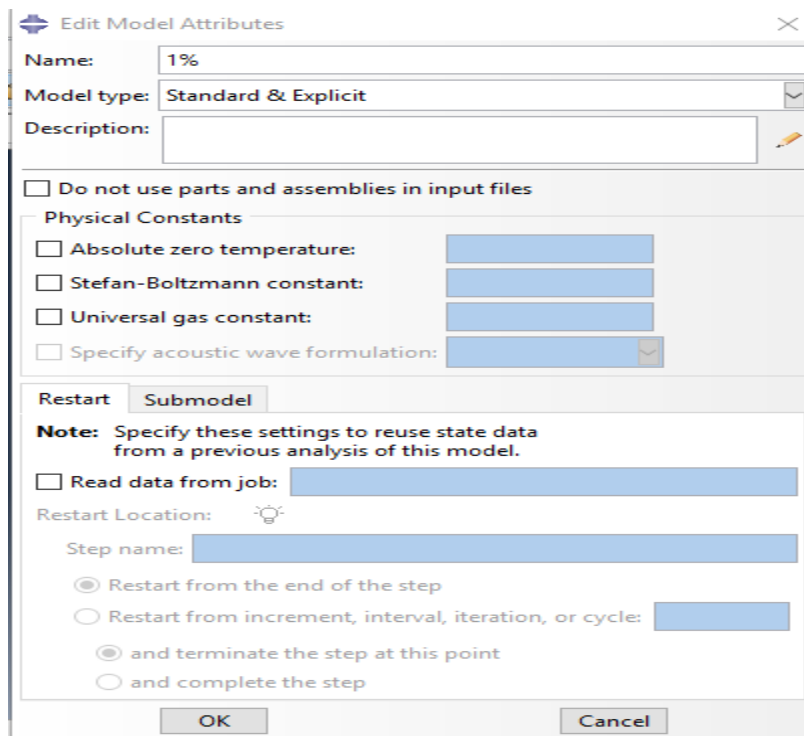
3.2 Μοντελοποίηση στο Abaqus

Στην παρούσα διπλωματική η μοντελοποίηση έγινε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus FEA. Παρακάτω περιγράφεται ο τρόπος εισαγωγής του μοντέλου στο πρόγραμμα. Η μοντελοποίηση έγινε στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού.

Κατά την εργασία προσομοιώθηκαν πέντε διαφορετικά μοντέλα όπου για το καθένα ο νανοσωλήνας άνθρακα (CNT) τοποθετήθηκε με τρεις διαφορετικές γεωμετρικές μορφές.

Ενδεικτικά στο κεφάλαιο αυτό θα φανεί η μοντελοποίηση για ποσοστό όγκου 1%.

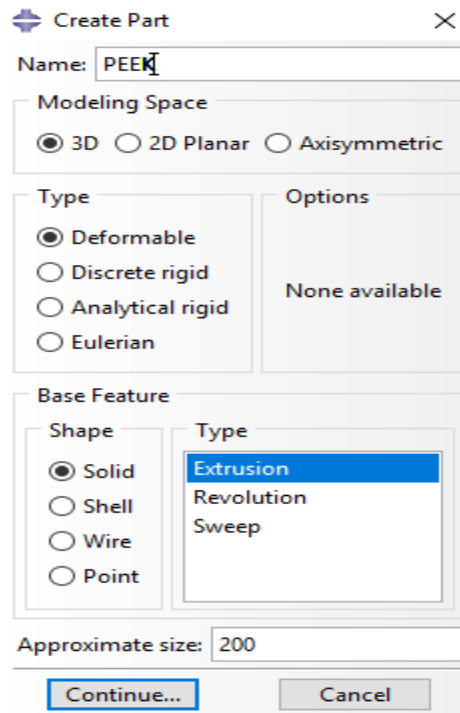
Αρχικά δημιουργείται ένα μοντέλο όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1, το οποίο περιλαμβάνει το PEEK και το CNT.



Εικόνα 3-1: Εισαγωγή μοντέλου στο Abaqus

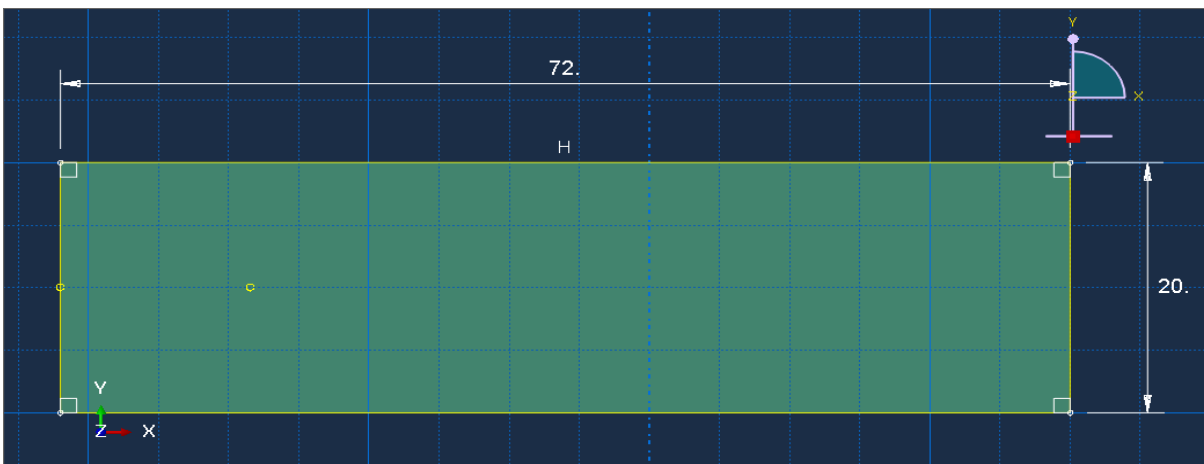
3.2.1 Εισαγωγή του PEEK

Στην Εικόνα 3-2 φαίνεται πως έγινε η εισαγωγή του PEEK το οποίο προσομοιώθηκε ως solid element και deformable (που σημαίνει ότι το στοιχείο μπορεί να παραμορφωθεί όταν ασκηθεί φορτίο).

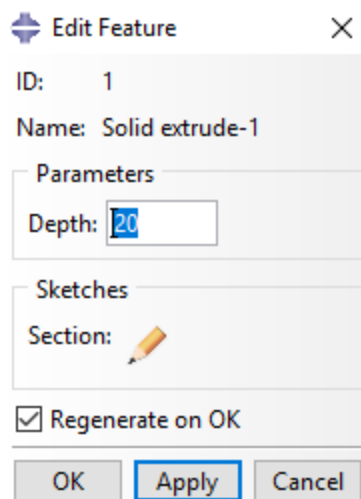


Εικόνα 3-2: Εισαγωγή στο PEEK

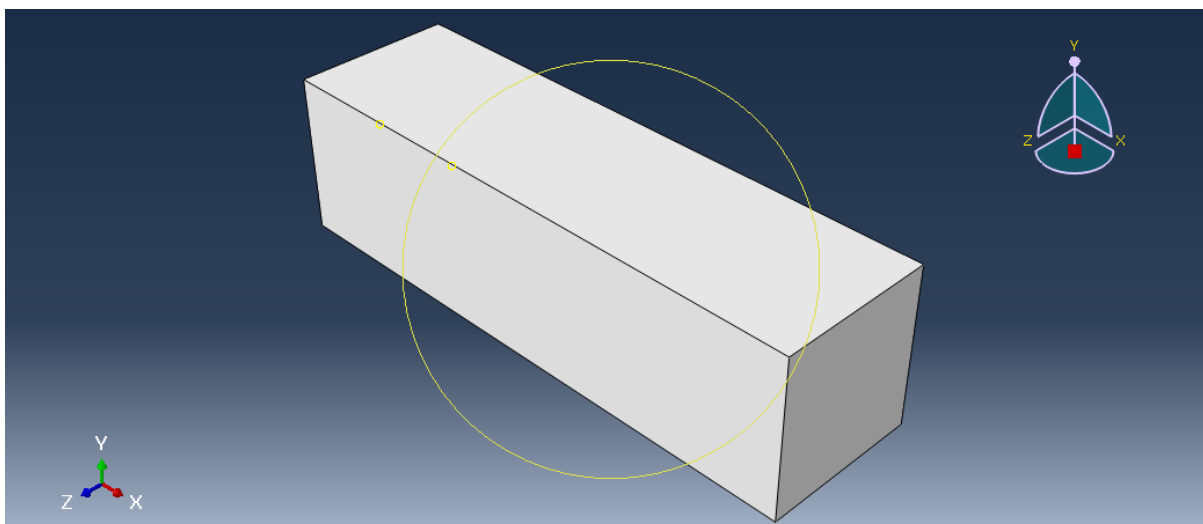
Στη συνέχεια δίνονται οι γεωμετρικές διαστάσεις της μήτρας σύμφωνα με την Εικόνα 3-3 και την Εικόνα 3-4. Οι διαστάσεις θεωρείται ότι είναι σε mm. Σε πρώτη φάση δίνονται οι διαστάσεις της εντός ενός επιπέδου και στη συνέχεια δίνεται το βάθος ώστε να πάρει το μοντέλο την τρισδιάστατη μορφή που έχει στην Εικόνα 3-5.



Εικόνα 3-3: Διαστάσεις μήκους και ύψους για ποσοστό αναλογίας όγκου 1%



Εικόνα 3-4: Πλάτος για ποσοστό αναλογίας όγκου 1%



Εικόνα 3-5: Τρισδιάστατο σχήμα του μοντέλου ΡΕΕΚ

Ύστερα από την εισαγωγή της γεωμετρίας του μοντέλου δίνονται οι ιδιότητες του υλικού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-6 επιλέγεται ένα ελαστικό υλικό, δίνεται το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson.

Edit Material [X]

Name: PEEK

Description: [] [Pencil icon]

Material Behaviors

Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other [Pencil icon]

Elastic

Type: Isotropic [v] [Suboptions]

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0 [▲] [▼]

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term [v]

No compression

No tension

Data

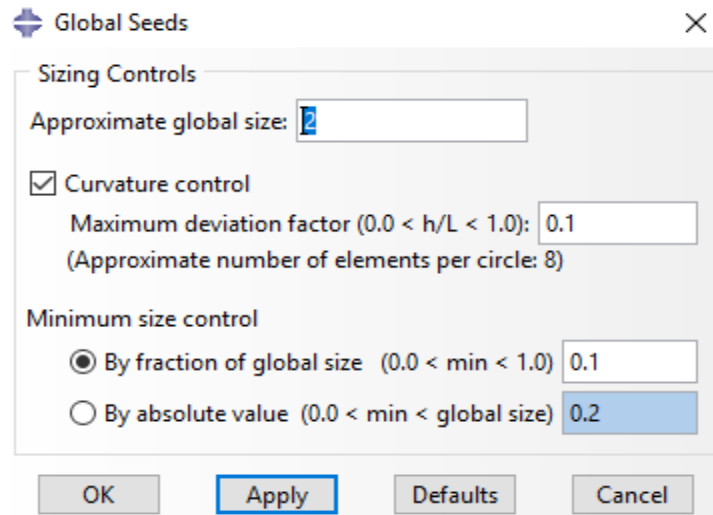
	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	3.73E-009	0.3

OK Cancel

Εικόνα 3-6: Εισαγωγή ιδιοτήτων του υλικού PEEK

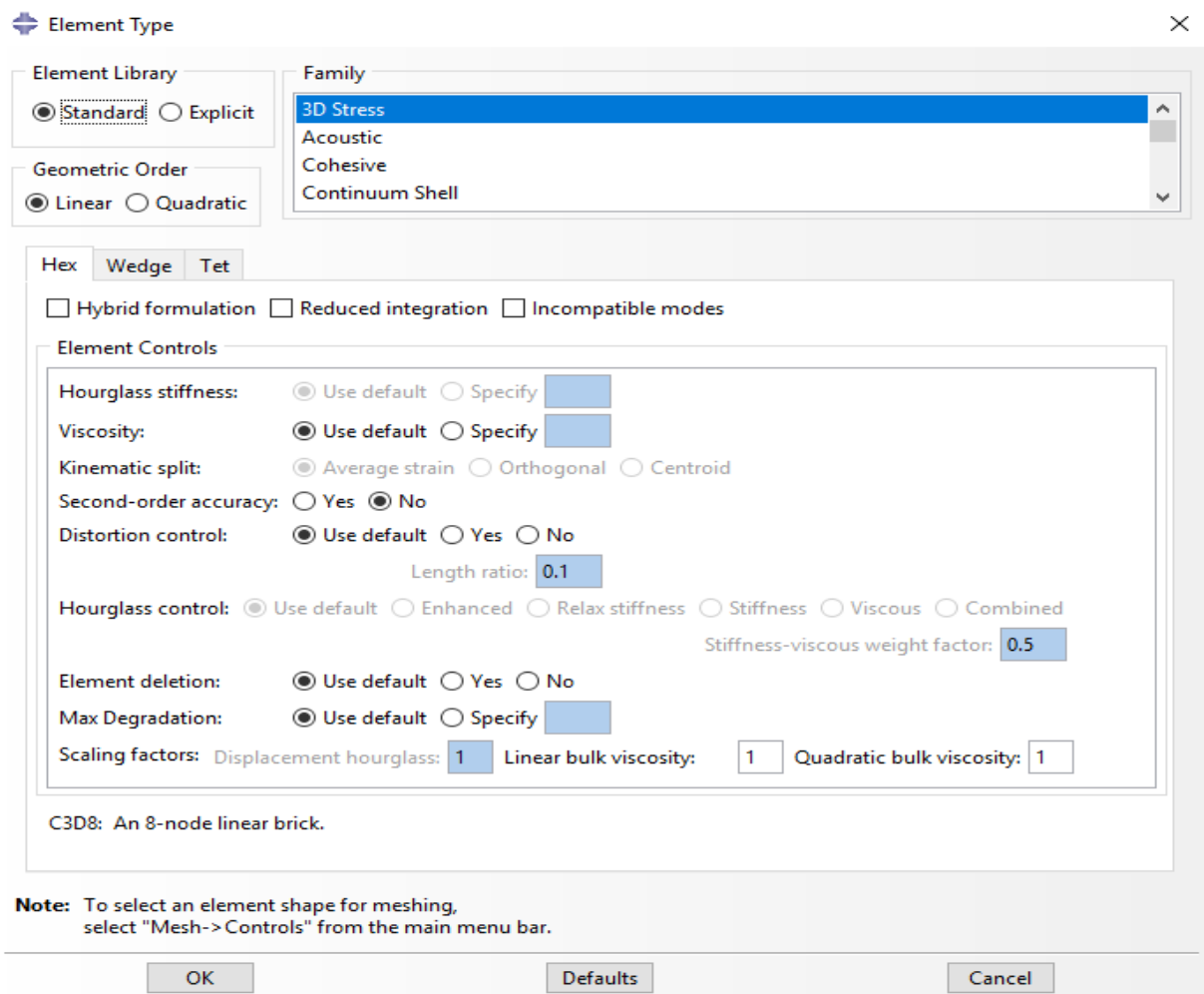
Επόμενο βήμα είναι η διακριτοποίηση του PEEK.

- Επιλέγεται το Seeds όπου καθορίζονται οι αποστάσεις ανά τις οποίες δημιουργούνται οι κόμβοι όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-7. Για ποσοστά όγκου 0.5%,1%,2% χρησιμοποιήθηκε global size περίπου 2 ενώ για τα ποσοστά όγκου 5%, 10% χρησιμοποιήθηκε global size περίπου 1



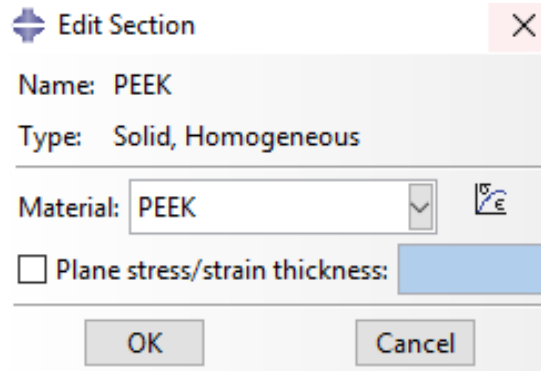
Εικόνα 3-7: Εισαγωγή διακρποποίησης του PEEK

- Καθορίζεται το Element Type σύμφωνα με την Εικόνα 3-8 όπου καθορίζονται κάποια επιπλέον στοιχεία σχετικά με τη διακρποποίηση.



Εικόνα 3-8: Εισαγωγή του τύπου στοιχείου για τη διακρποποίηση του PEEK

- Γίνεται εισαγωγή της διατομής (section) αντιστοιχίζοντάς την στο υλικό PEEK που είχε δημιουργηθεί σε προηγούμενο βήμα.



Εικόνα 3-9: Εισαγωγή της διατομής του PEEK

3.2.2 Εισαγωγή του CNT

Τοποθετείται νανοσωλήνας άνθρακα μήκους 50 nm με τις εξής διαφορετικές γεωμετρίες:

- Ευθεία γραμμή
- Μη γραμμική γεωμετρία με δύο καμπύλες
- Μη γραμμική γεωμετρία με μία καμπύλη

Σε όλες τις περιπτώσεις δίνεται η διατομή του CNT όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-10 αφού πρώτα έχει δημιουργηθεί το προφίλ της με το όνομα Profile-1 όπως ορίζεται από την Εικόνα 3-11.

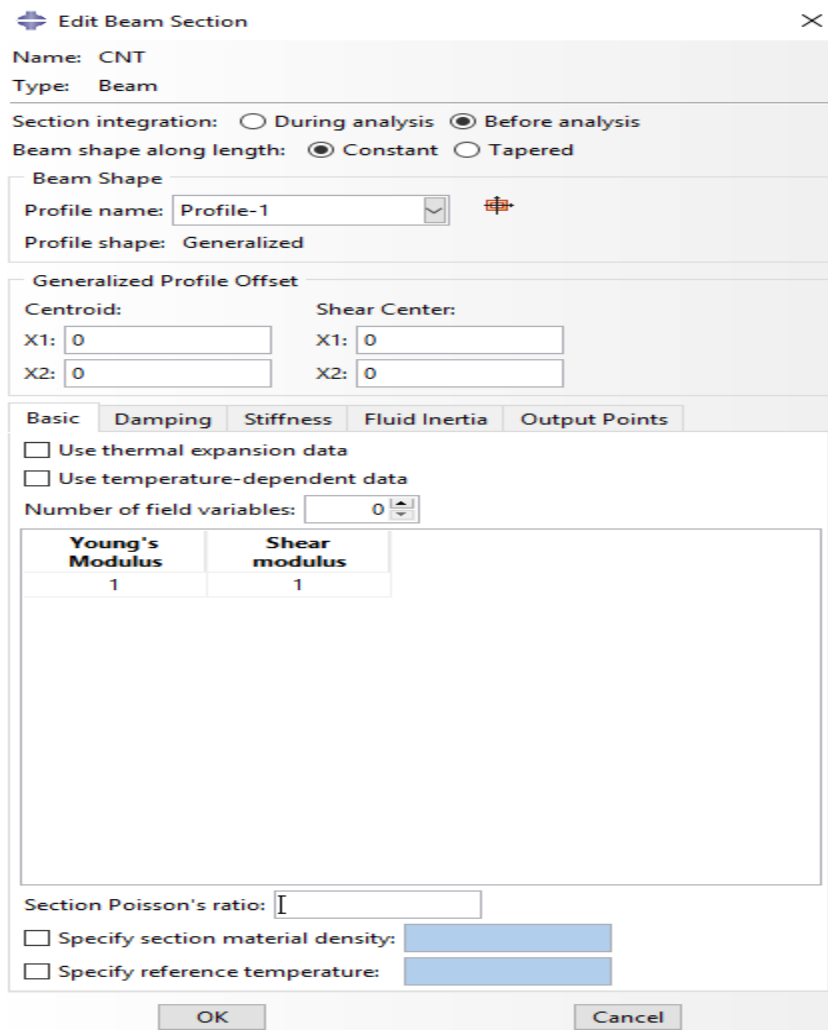
Οι τιμές έχουν καθοριστεί ώστε να προκύπτουν τα χαρακτηριστικά του υλικού:

$$EA = 12178 \text{ nm}^2$$

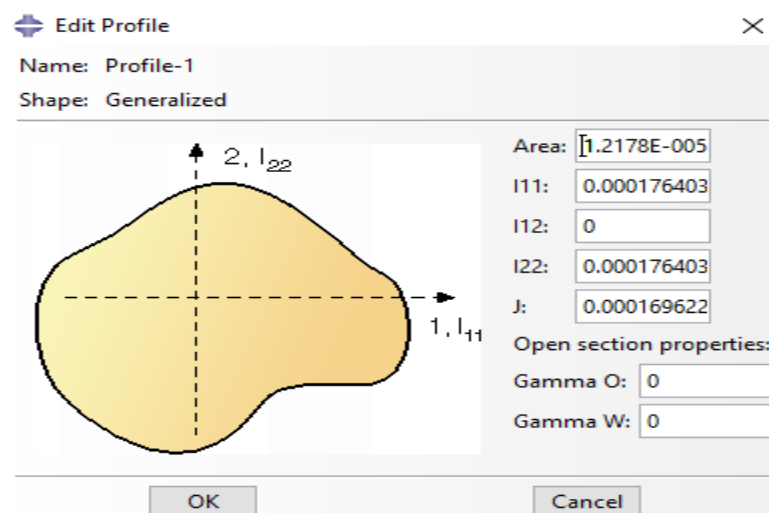
$$EI = 176403 \text{ nNnm}^2$$

$$GJ = 169622 \text{ nNnm}^2$$

Συγκεκριμένα θεωρήθηκε ότι $E=1$ και $G=1$. Επιπροσθέτως μετατράπηκαν όλα σε m^2 , Nm^2 , Nm^2 αντίστοιχα, ώστε στο τέλος οι δυνάμεις να δοθούν σε N.



Εικόνα 3-10: Εισαγωγή των στοιχείων της διατομής του CNT

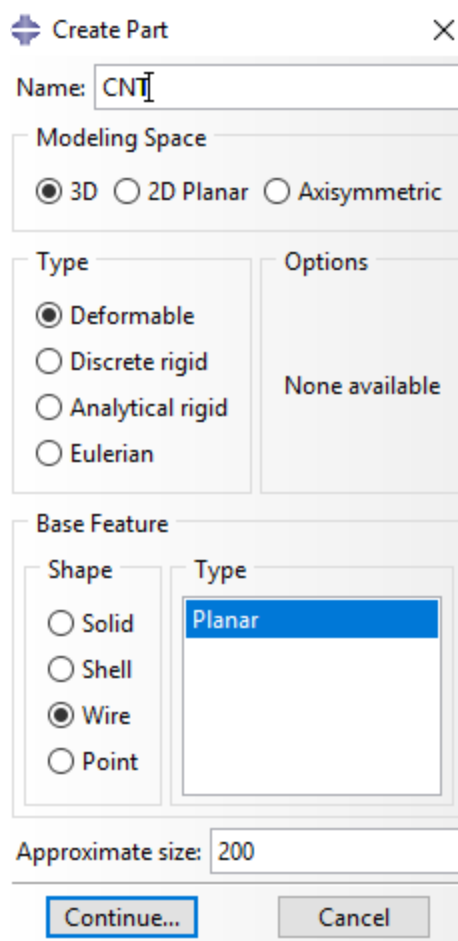


Εικόνα 3-11: Δημιουργία του προφίλ του CNT

3.2.2.1 Εισαγωγή του CNT (Ευθύγραμμο)

Δημιουργούμε ένα νέο part το οποίο θα αντιπροσωπεύει το νανοσωλήνα άνθρακα γραμμικής μορφής όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-12 όπου του δίνουμε την ιδιότητα ενός wire. Για να τελειώσει η δημιουργία το σχεδιάζουμε υπό τη μορφή μίας ευθείας γραμμής μήκους 50 nm. Έτσι δημιουργείται ο ευθύγραμμος νανοσωλήνας άνθρακα που φαίνεται στην Εικόνα 3-13.

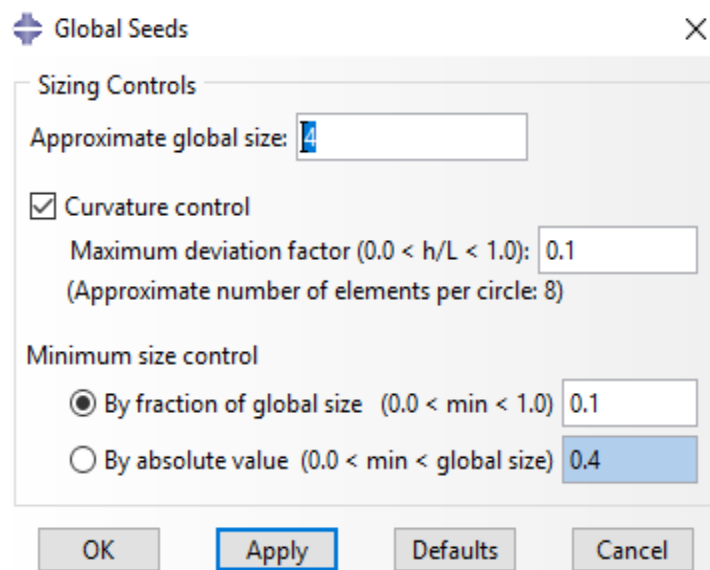
Η διακριτοποίηση έγινε χωρίζοντάς τον σε μέρη μήκους περίπου 4 nm όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-14 ενώ το element type μαζί με κάποια επιπλέον στοιχεία της διακριτοποίησης καθορίζεται από το παράθυρο της Εικόνα 3-15 όπου στο νανοσωλήνα άνθρακα δόθηκε και η ιδιότητα στοιχείου δοκού. Ο νανοσωλήνας άνθρακα φαίνεται διακριτοποιημένος στην Εικόνα 3-16 ενώ ολόκληρο το μοντέλο με τον γραμμικό νανοσωλήνα άνθρακα μέσα στην πολυαιθερική κετόνη παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-17.



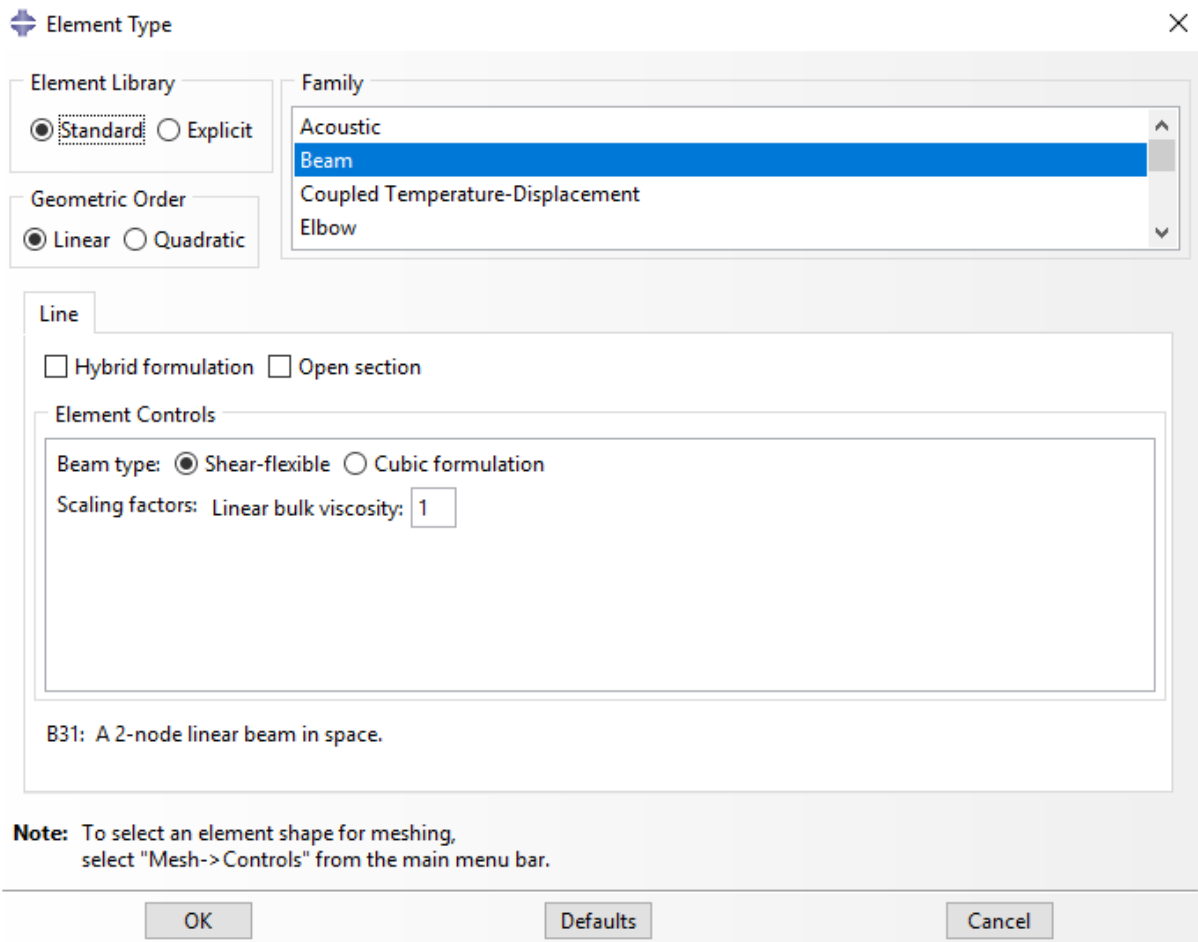
Εικόνα 3-12: Εισαγωγή του μοντέλου του CNT



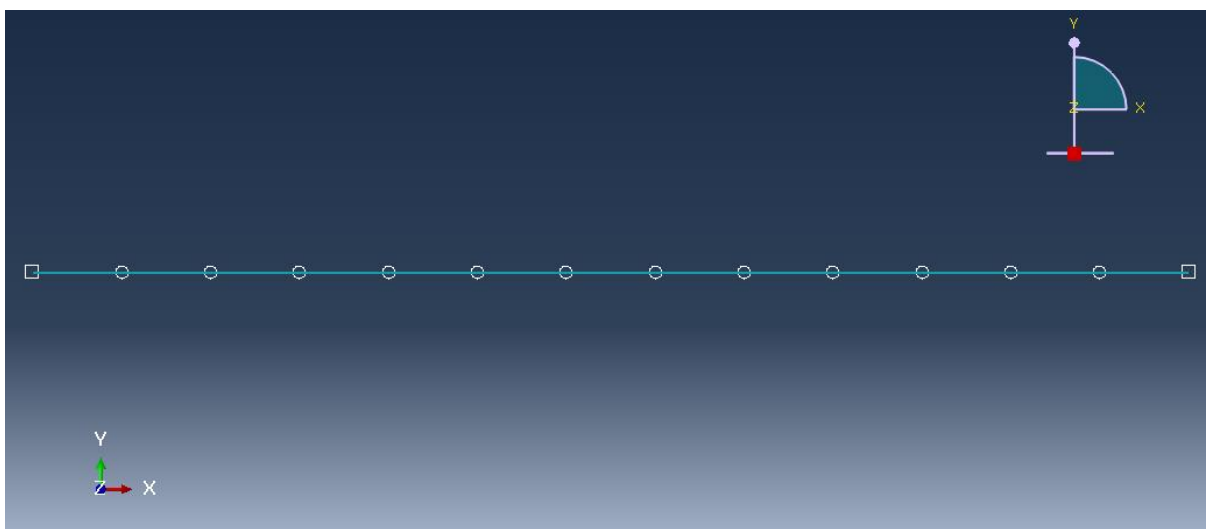
Εικόνα 3-13: Μοντέλο του ευθύγραμμου CNT



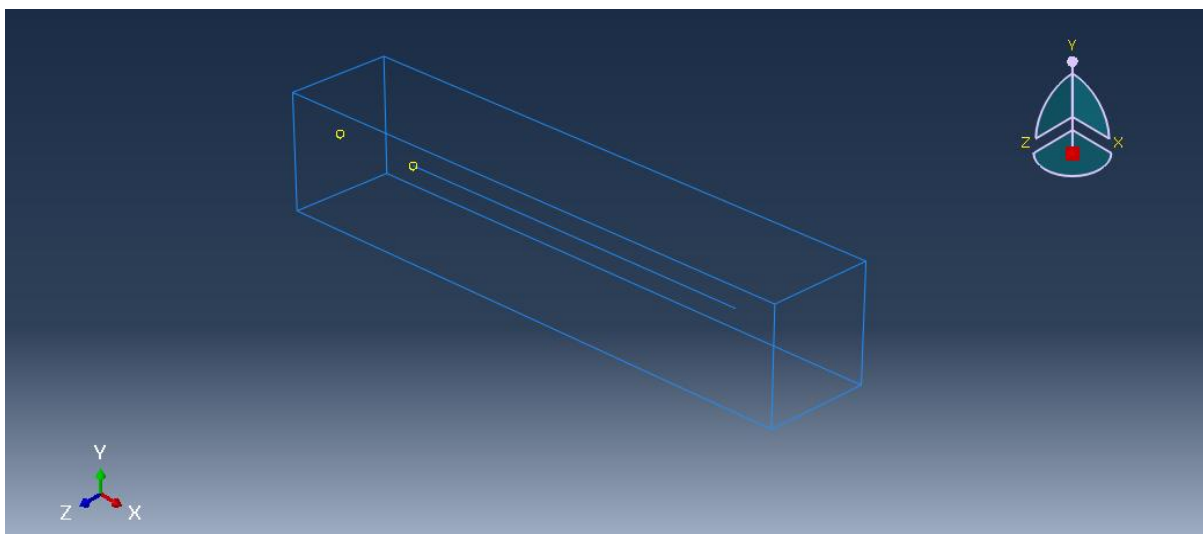
Εικόνα 3-14: Εισαγωγή διακροποίησης του CNT



Εικόνα 3-15: Εισαγωγή του τύπου στοιχείου για τη διακριτοποίηση του CNT



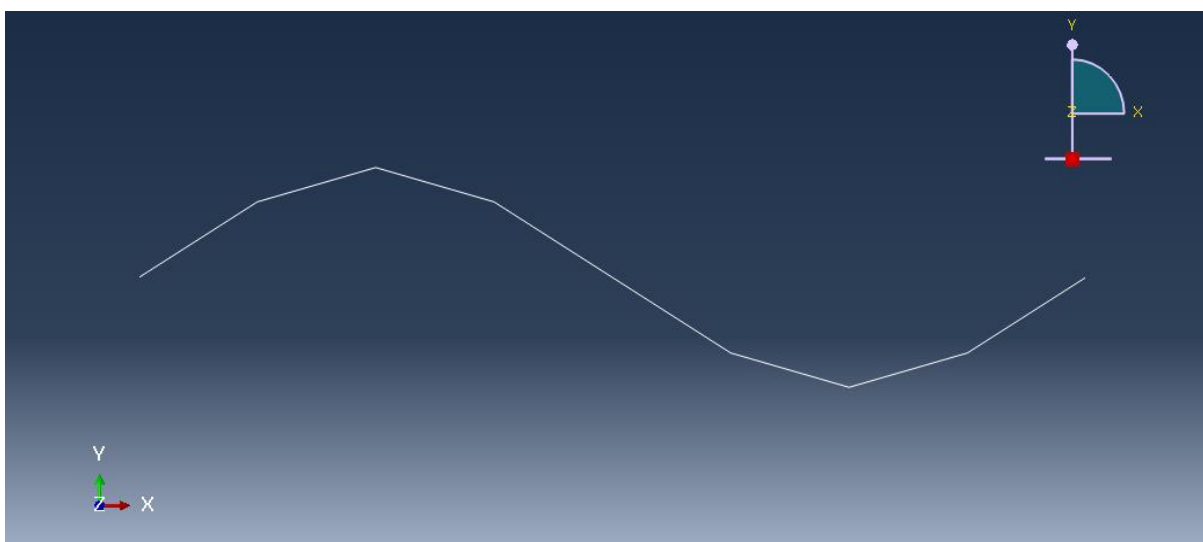
Εικόνα 3-16: Διακριτοποιημένο το μοντέλο του ευθύγραμμου CNT



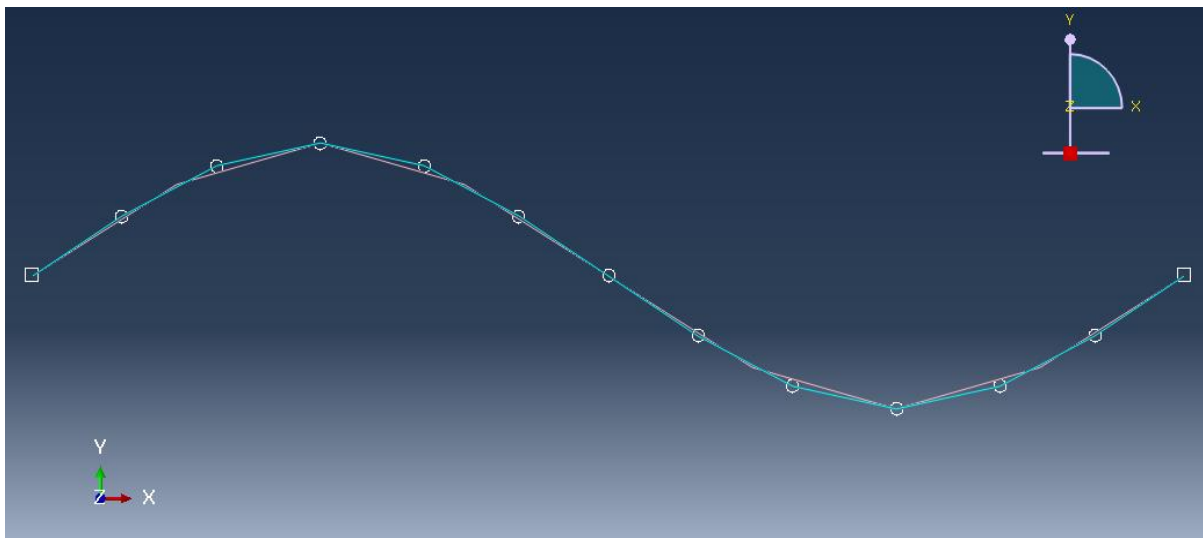
Εικόνα 3-17: Παρουσίαση του συνολικού μοντέλου με το ευθύγραμμο CNT

3.2.2.2 Εισαγωγή του CNT (2 καμπύλες)

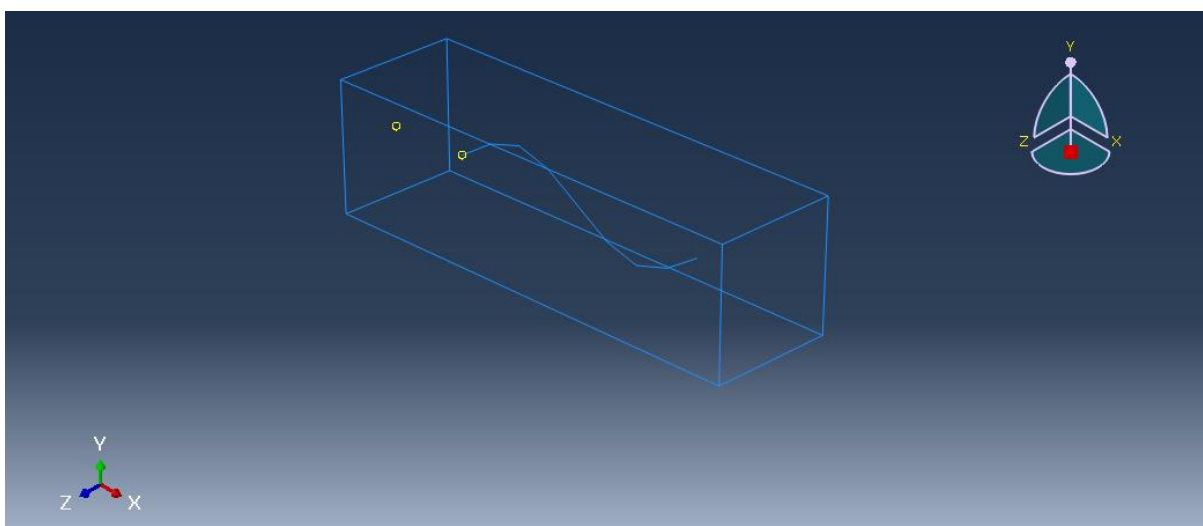
Μία άλλη γεωμετρία του νανοσωλήνα άνθρακα, η οποία εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική, είναι αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 3-18 όπου ο νανοσωλήνας άνθρακα έχει πλέον μορφή δύο καμπύλων με μήκος ίδιο με του ευθύγραμμου νανοσωλήνα ο οποίος είχε προσομοιωθεί παραπάνω. Πρόκειται για ένα σχήμα που προσεγγίζει μια ημιτονοειδή καμπύλη με $A=5\text{nm}$. Για την ακρίβεια υπολογίσθηκαν 4 σημεία και δόθηκαν στο πρόγραμμα χρησιμοποιώντας την εντολή Spline. Η διακριτοποίηση έγινε τηρώντας περίπου την ίδια απόσταση που χρησιμοποιήθηκε και στο ευθύγραμμο σχήμα και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-19. Στην Εικόνα 3-20 βλέπουμε το συνολικό μοντέλο με τον νανοσωλήνα άνθρακα των δύο καμπύλων.



Εικόνα 3-18: Μοντέλο CNT με 2 καμπύλες



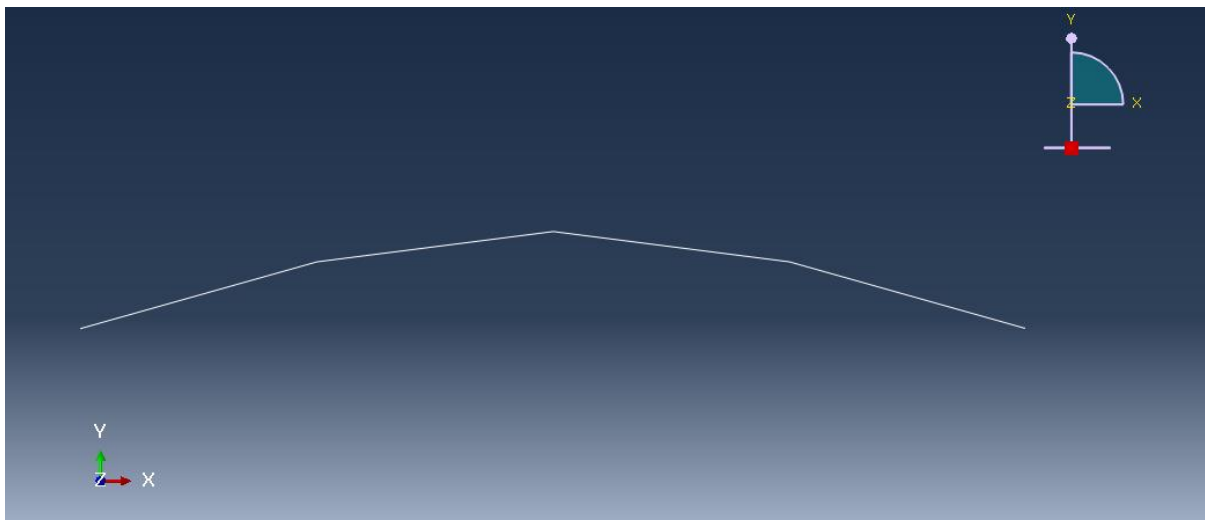
Εικόνα 3-19: Διακριτοποιημένο το μοντέλο του CNT 2 καμπυλών



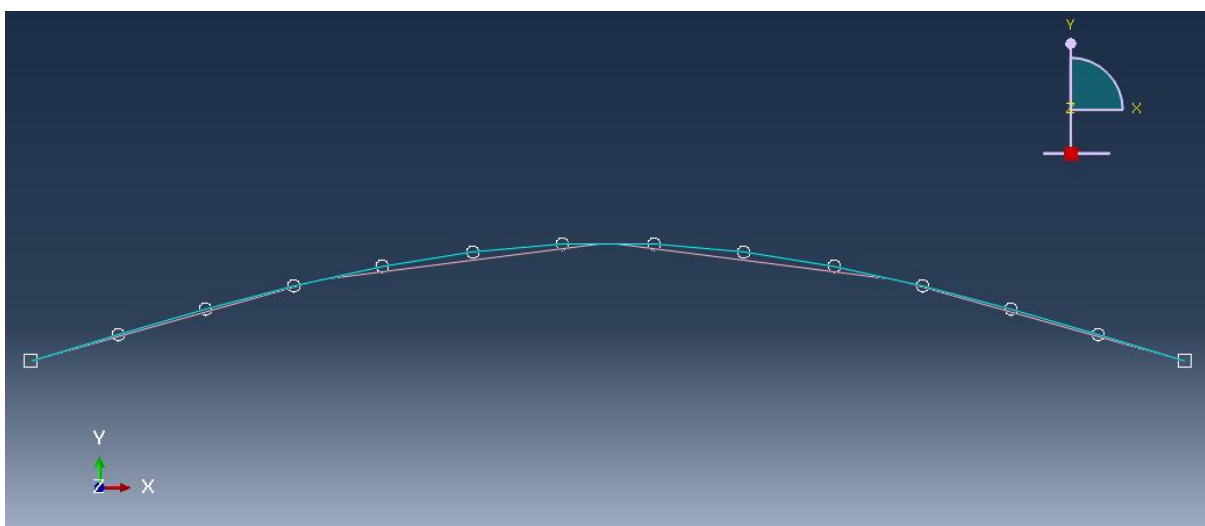
Εικόνα 3-20: Παρουσίαση του συνολικού μοντέλου με το CNT 2 καμπυλών

3.2.2.3 Εισαγωγή του CNT (1 καμπύλη)

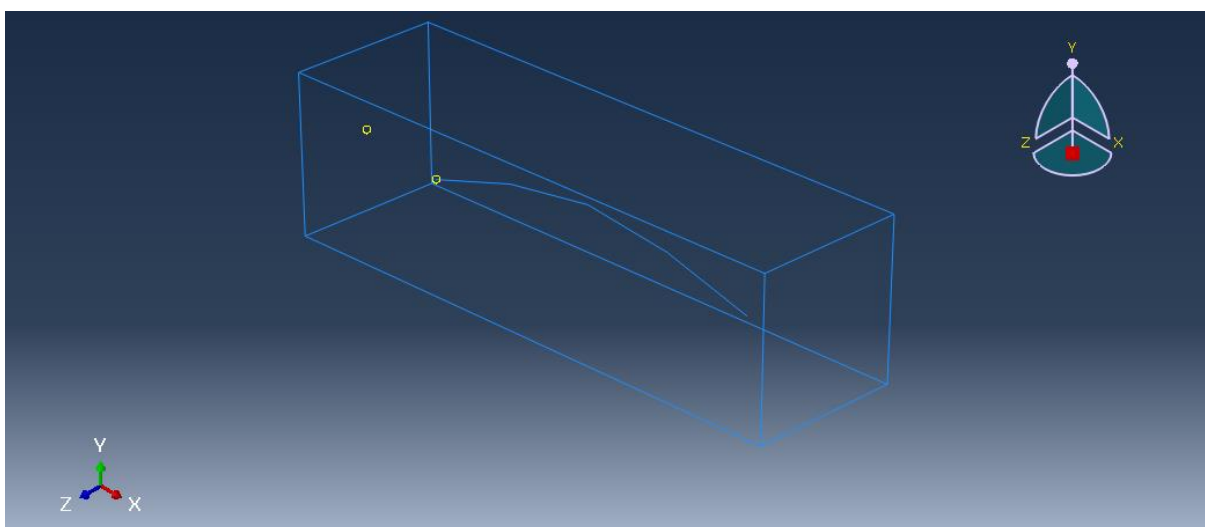
Η τρίτη περίπτωση που εξετάστηκε είναι η περίπτωση στην οποία ο νανοσωλήνας άνθρακα έχει μόνο μία καμπύλη και απεικονίζεται στην Εικόνα 3-21. Σε αυτή την περίπτωση προσεγγίστηκε το σχήμα της ημιτονοειδούς καμπύλης για μισή περίοδο και $A=5\text{nm}$. Η διακριτοποίηση που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-22 έγινε επίσης όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις ενώ το συνολικό μοντέλο φαίνεται στην Εικόνα 3-23.



Εικόνα 3-21: Μοντέλο CNT με 1 καμπύλη



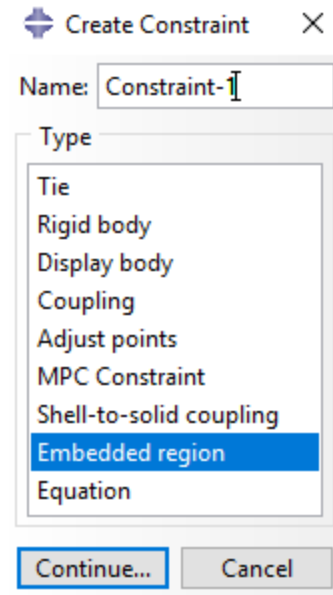
Εικόνα 3-22: Διακριτοποιημένο το μοντέλο του CNT 1 καμπύλης



Εικόνα 3-23: Παρουσίαση του συνολικού μοντέλου με το CNT 1 καμπύλης

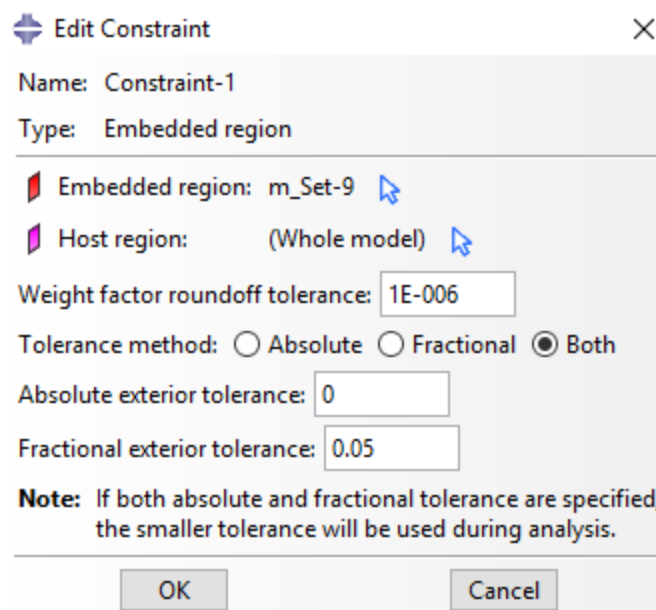
3.2.3 Ενσωμάτωση του CNT στο PEEK

Η τεχνική Embedded υπάρχει μέσα στο Abaqus και μπορεί να επιλεγεί από το interaction menu και πιο συγκεκριμένα από τα constraints όπου επιλέγεται σαν constraint το Embedded region όπως φαίνεται στην επόμενη Εικόνα 3-24.



Εικόνα 3-24: Επιλογή της τεχνικής ενσωμάτωσης του CNT στο PEEK

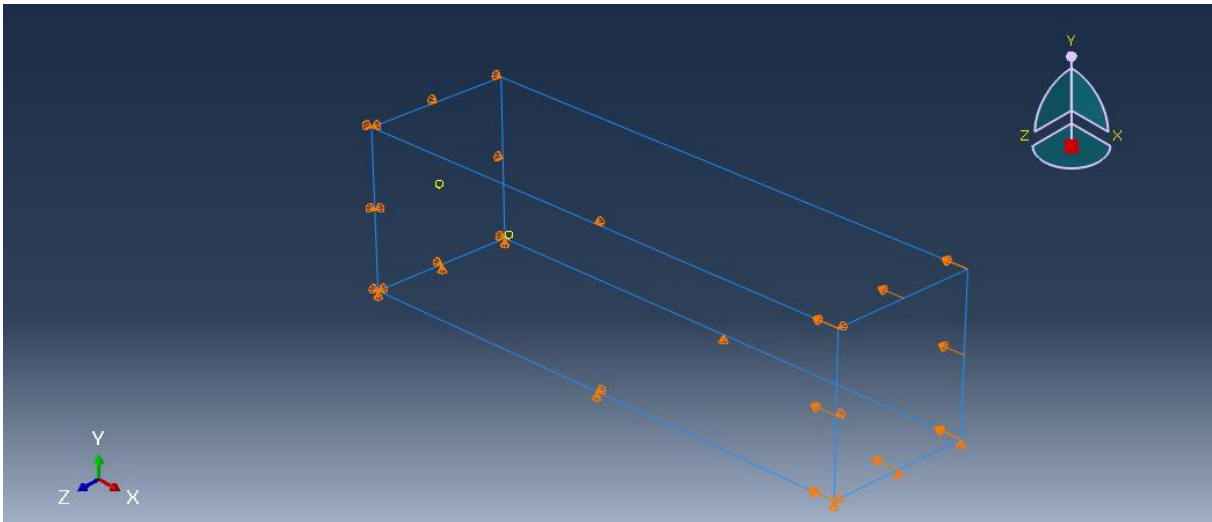
Στη συνέχεια επιλέγεται σαν Embedded region ο νανοσωλήνας άνθρακα και σαν Host region ολόκληρο το μοντέλο που αναφέρεται στο PEEK όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-25.



Εικόνα 3-25: Καθορισμός της ενσωματωμένης περιοχής και της Host περιοχής

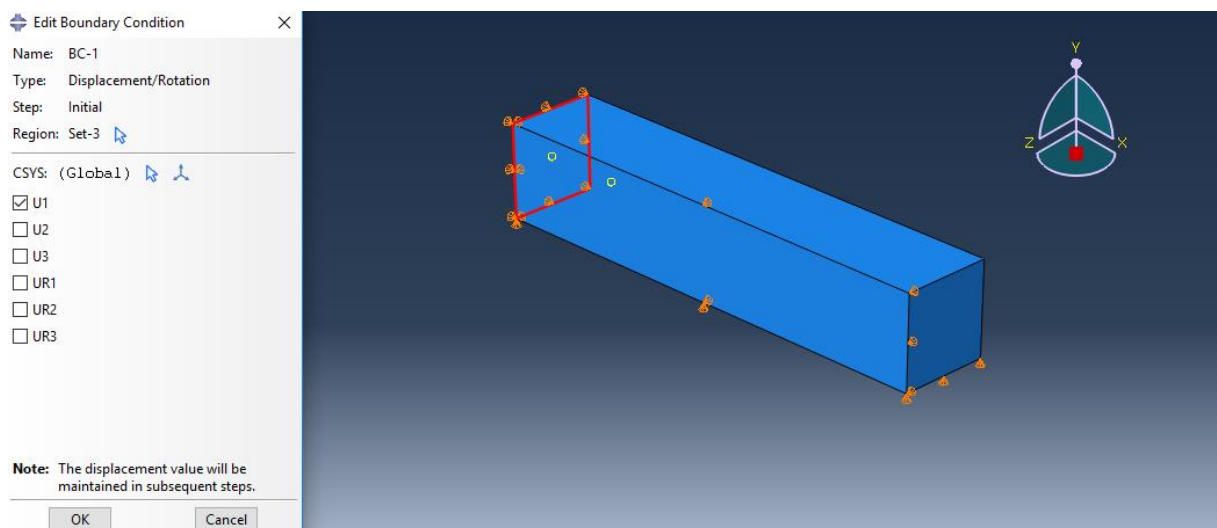
3.2.4 Συνθήκες στήριξης και ασκούμενο φορτίο

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι δεσμεύσεις (Boundary Conditions) οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο. Στην Εικόνα 3-26 παρουσιάζεται το μοντέλο με όλες τις συνοριακές συνθήκες (δεσμεύσεις). Στη συγκεκριμένη εικόνα διακρίνονται οι άξονες στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων. Για το πρόγραμμα ο άξονας X είναι ο U1, ο άξονας Y είναι ο U2 και ο Z είναι ο U3. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν.

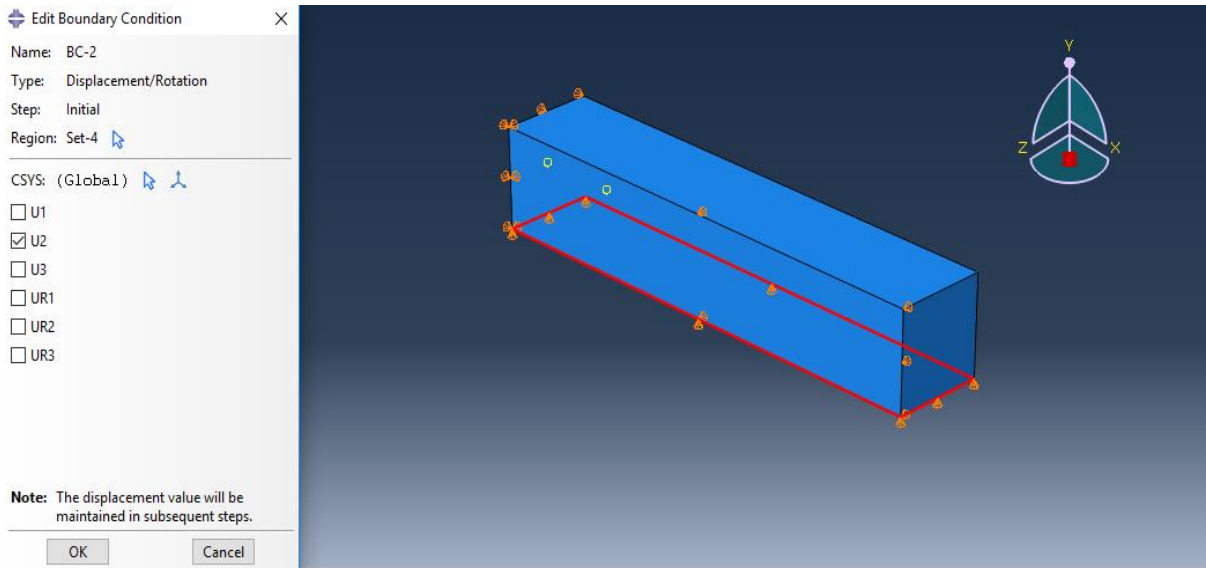


Εικόνα 3-26: Παρουσίαση των στηρίξεων και της ασκούμενης μετακίνησης του μοντέλου

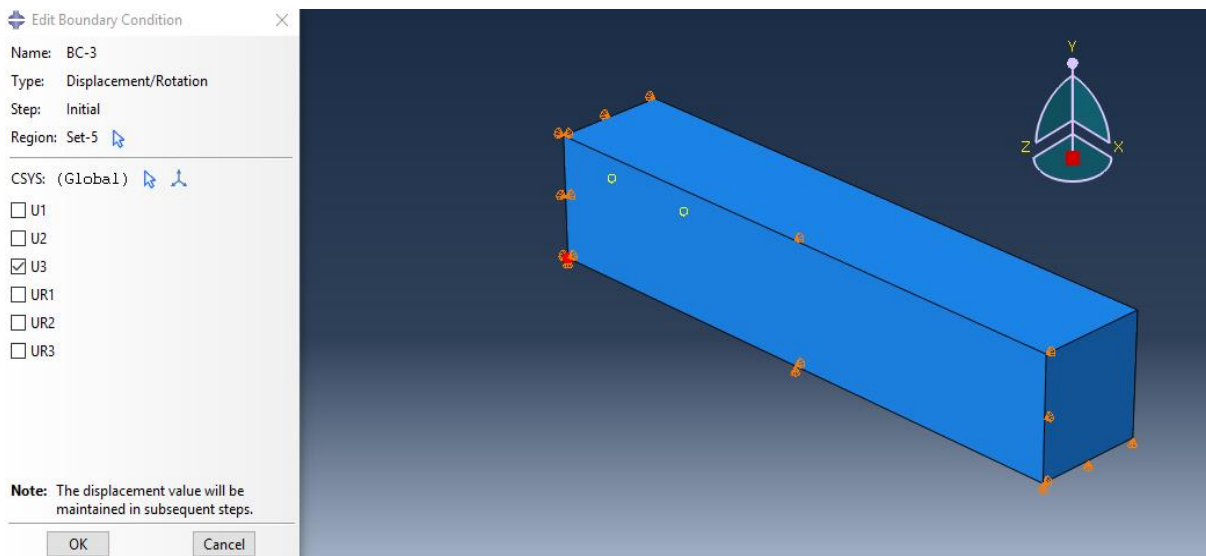
Αρχικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-27 δόθηκαν οι συνοριακές συνθήκες στη μία επιφάνεια (BC1) όπου δεσμεύτηκε ο βαθμός ελευθερίας κατά X ή U1. Στην Εικόνα 3-28 φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες στην κάτω επιφάνεια όπου περιορίζεται ο βαθμός ελευθερίας κατά Y ή U2. Από τις Εικόνα 3-29 και Εικόνα 3-30 μπορεί να γίνει αντιληπτό ό,τι έχουν δεσμευτεί ο βαθμός ελευθερίας κατά Z ή U3 ενός σημείου και μιας επιφάνειας αντίστοιχα.



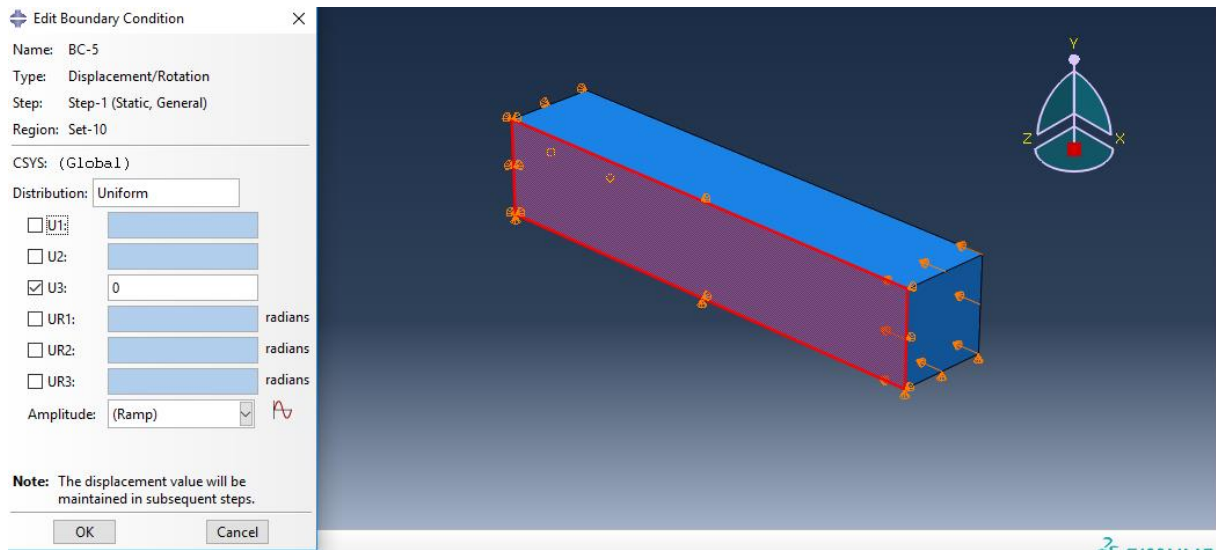
Εικόνα 3-27: Δέσμευση βαθμού ελευθερίας κατά X μιας επιφάνειας



Εικόνα 3-28: Δέσμευση βαθμού ελευθερίας κατά Y μιας επιφάνειας

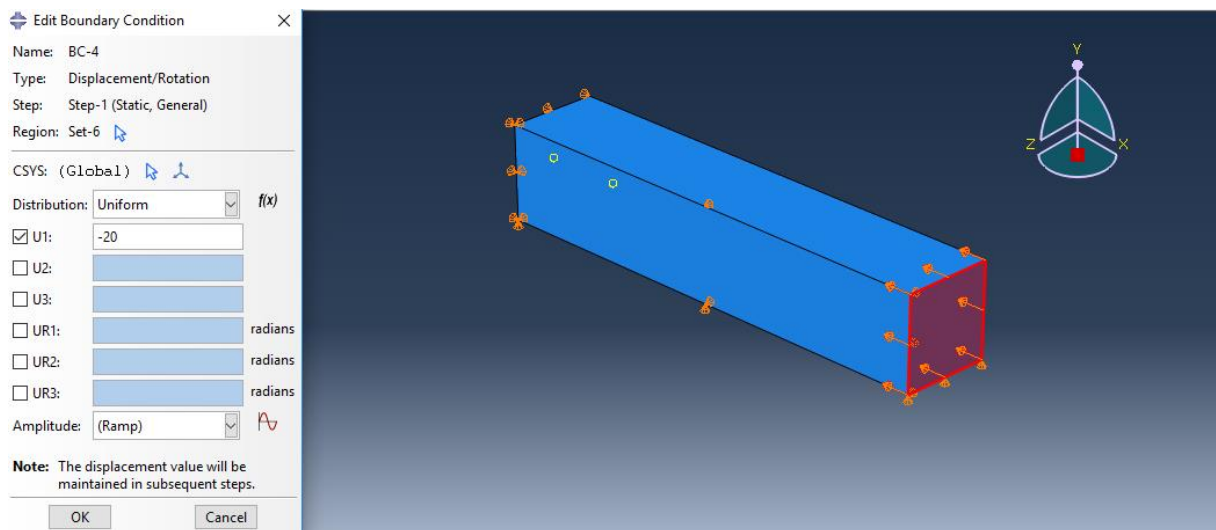


Εικόνα 3-29: Δέσμευση βαθμού ελευθερίας κατά Z σε ένα γωνιακό σημείο



Εικόνα 3-30: Δέσμευση βαθμού ελευθερίας κατά Z μιας επιφάνειας

Σαν φορτίο χρησιμοποιήθηκε μία δεδομένη μετακίνηση μεγέθους 20 nm, η επιφάνεια άσκησης της οποίας φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3-31. Αυτό έγινε προκειμένου να γίνει η ανάλυση με τη μέθοδο ελέγχου των μετατοπίσεων.



Εικόνα 3-31: Εφαρμογή μετακίνησης 20nm στη μία επιφάνεια

Αξίζει να αναφερθεί ότι όλα τα παραπάνω δημιουργούνται σαν συνοριακές συνθήκες αλλά έχουν μία βασική διαφορά στον ορισμό τους μέσα στο πρόγραμμα. Οι στηρίξεις εισάγονται σε ένα Initial step ενώ η ασκούμενη μετακίνηση εισάγεται σε ένα νέο step το οποίο περιλαμβάνει και το είδος της ανάλυσης, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι το Step-1.

3.2.5 Ανάλυση

Η ανάλυση που αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την εργασία είναι η μη γραμμική ανάλυση με τη μέθοδο ελέγχου των μετατοπίσεων. Όπως προαναφέρθηκε, για να πετύχουμε τη μέθοδο ελέγχου των μετατοπίσεων ασκήθηκε αντί για φορτίο μία μετακίνηση των 20 nm η οποία δόθηκε στο Step-1 όπου ορίστηκε να χρησιμοποιηθεί στατική ανάλυση. Για να δοθεί στο πρόγραμμα η εντολή να κάνει τη μη γραμμική ανάλυση που χρειάστηκε, επιλέχθηκε στο step-1 η επιλογή Nlgeom: On όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3-32. Στη συνέχεια στην καρτέλα incrementation της Εικόνα 3-33 δίνονται ένα αρχικό βήμα προσαύξησης καθώς και ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο επιτρεπτό βήμα.

Edit Step [X]

Name: Step-1

Type: Static, General

Basic | Incrementation | Other

Description: []

Time period: 1

Nlgeom: On [Pencil]

Automatic stabilization: None [v]

Include adiabatic heating effects

OK Cancel

Εικόνα 3-32: Εισαγωγή των στοιχείων της ανάλυσης

✚ Edit Step ✕

Name: Step-1

Type: Static, General

Basic **Incrementation** Other

Type: Automatic Fixed

Maximum number of increments: 100

	Initial	Minimum	Maximum
Increment size:	0.001	1E-005	0.05

OK Cancel

Εικόνα 3-33: Εισαγωγή στοιχείων του βήματος προσαύξησης της ανάλυσης

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα στοιχεία όλων των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων.

Στο πρώτο μέρος περιγράφονται αναλυτικά τα στοιχεία των μοντέλων που προσομοιώθηκαν για κάθε μία από τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις καμπυλοτήτων. Επιπλέον φαίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και γίνεται συγκριτική παρουσίαση των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων για τις τρεις καμπυλότητες του κάθε μοντέλου.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου γίνεται μία σύγκριση των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων μεταξύ ίδιων γεωμετρικών σχημάτων και διαφορετικών ποσοστών αναλογίας όγκου του CNT ως προς το PEEK.

4.2 Στοιχεία των μοντέλων και αποτελέσματα αυτών

Χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα μοντέλα ένα CNT armchair (80,80) διαμέτρου $d=10,85564$, πάχους τοιχώματος $t=0,34$ και μήκους $l=50\text{nm}$. Τα στοιχεία του συγκεκριμένου CNT δίνονται παρακάτω:

$$EA = 12178 \text{ nm}^2$$

$$EI = 176403 \text{ nNm}^2$$

$$GJ = 169622 \text{ nNm}^2$$

Ο όγκος του CNT υπολογίζεται από τη σχέση:

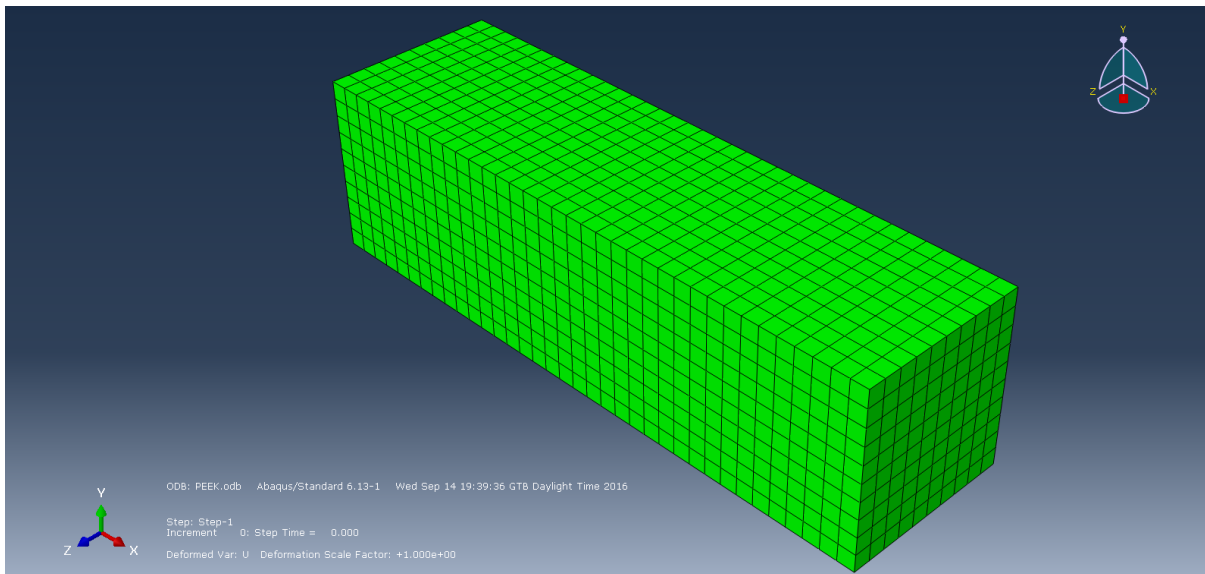
$$V_{\text{CNT}} = l * \pi * (1/4) * ((d+t/2)^2 - (d-t/2)^2) = 289,88 \text{ nm}^3$$

Σε όλα τα μοντέλα ασκήθηκε μετακίνηση 20nm η οποία προστέθηκε σταδιακά και στα περισσότερα δεν έφτασε στην τελική τιμή της καθώς αστόχησε.

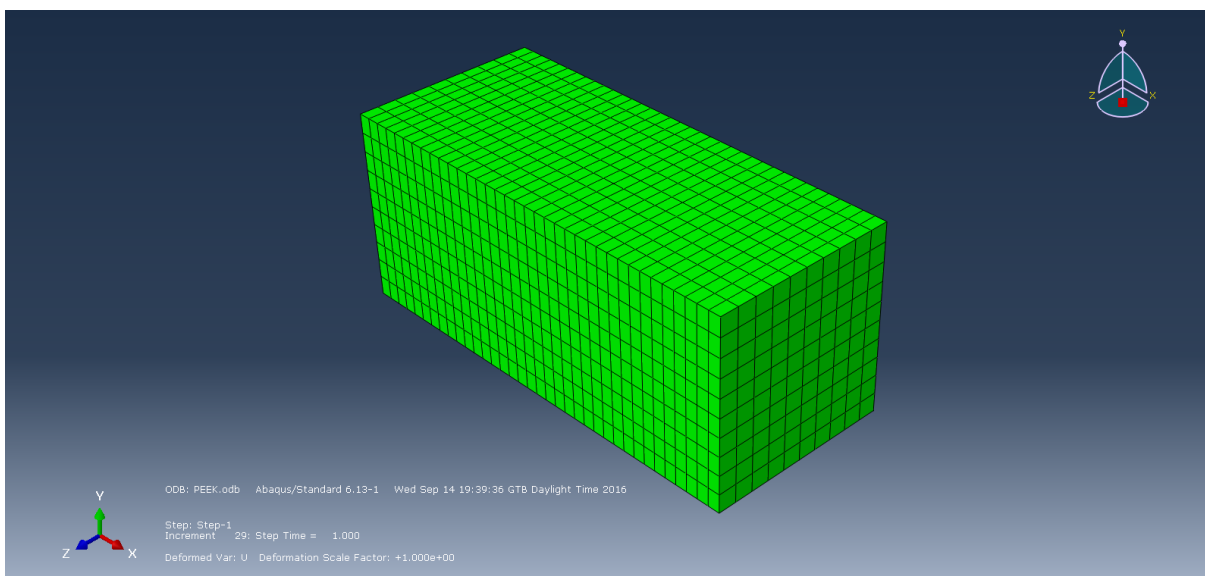
Τα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω έχουν ως άξονα X το χρόνο (time) όπου δείχνει ουσιαστικά το ποσοστό της μετακίνησης που ασκείται. Για να βρεθεί η μετακίνηση που έχει ασκηθεί σε κάποιο χρόνο αρκεί να πολλαπλασιαστεί ο χρόνος με την συνολική μετακίνηση που έχει σκοπό να ασκηθεί η οποία στην περίπτωση αυτών των μοντέλων είναι 20nm. Ως άξονα Y έχουν τη συνισταμένη δύναμη που ασκείται στην αντίθετη πλευρά από αυτήν που ασκείται η μετακίνηση. Η δύναμη από το πρόγραμμα δίνεται σε N.

4.2.1 Μοντέλο χωρίς ύπαρξη υλικού CNT

Στην περίπτωση αυτή έχουμε μόνο το υλικό PEEK χωρίς την ύπαρξη νανοσωλήνων άνθρακα μέσα σε αυτό. Το μοντέλο αυτό εξετάζεται για σύγκριση με τα υπόλοιπα σύμμικτα μοντέλα. Χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο με σχήμα παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις: $a=20$, $b=20$, $t=72$ όπου a το ύψος, b το πλάτος και t το μήκος του παραλληλεπίπεδου. Έτσι θα δίνονται και οι διαστάσεις στα παρακάτω μοντέλα. Στην Εικόνα 4-1 και στην Εικόνα 4-2 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντιστοίχα.



Εικόνα 4-1: Απαρμόρφωτο σχήμα



Εικόνα 4-2: Παραμορφωμένο σχήμα

Στην Εικόνα 4-4 και στην Εικόνα 4-3 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.

✚ Edit XY Data ✕

Name: _temp_1

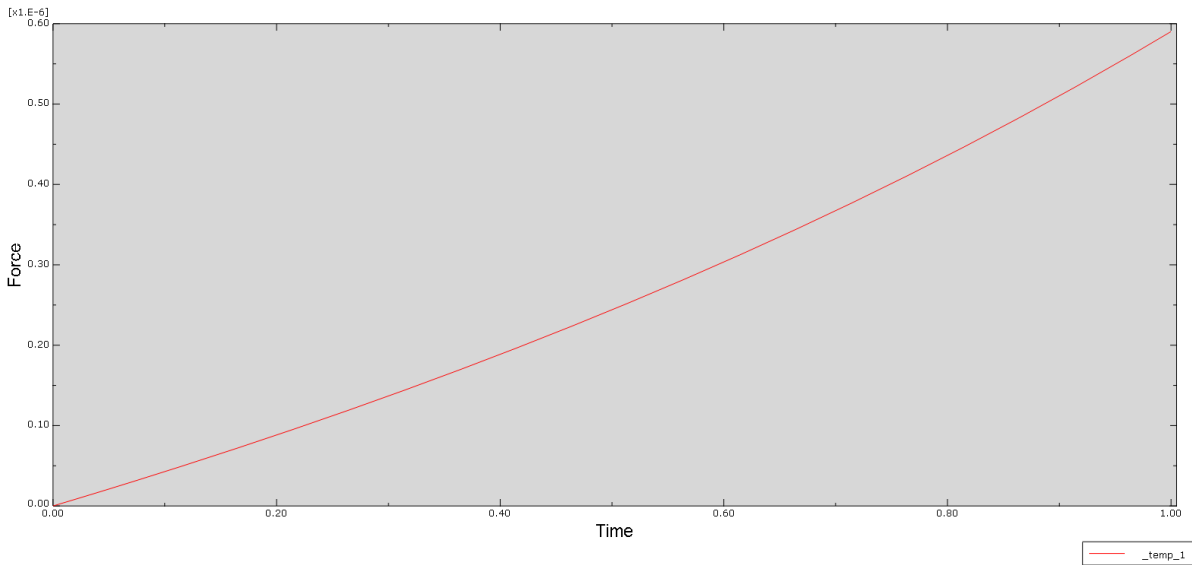
	X	Y
1	0	-0
2	0.001	4.14597E-010
3	0.002	8.29396E-010
4	0.0035	1.45211E-009
5	0.00575	2.38725E-009
6	0.009125	3.79237E-009
7	0.0141875	5.90553E-009
8	0.0217813	9.08757E-009
9	0.0331719	1.38885E-008
10	0.0502578	2.11535E-008
11	0.0758867	3.21959E-008
12	0.11433	4.90935E-008
13	0.16433	7.16903E-008
14	0.21433	9.50167E-008
15	0.26433	1.19106E-007
16	0.31433	1.43993E-007
17	0.36433	1.69715E-007
18	0.41433	1.96312E-007
19	0.46433	2.23826E-007
20	0.51433	2.52301E-007
21	0.56433	2.81785E-007
22	0.61433	3.12329E-007
23	0.66433	3.43988E-007
24	0.71433	3.76819E-007
25	0.76433	4.10884E-007
26	0.81433	4.46249E-007
27	0.86433	4.82987E-007
28	0.91433	5.21172E-007
29	0.96433	5.60888E-007
30	1	5.90205E-007

Quantity Types

X: Time Y: Force

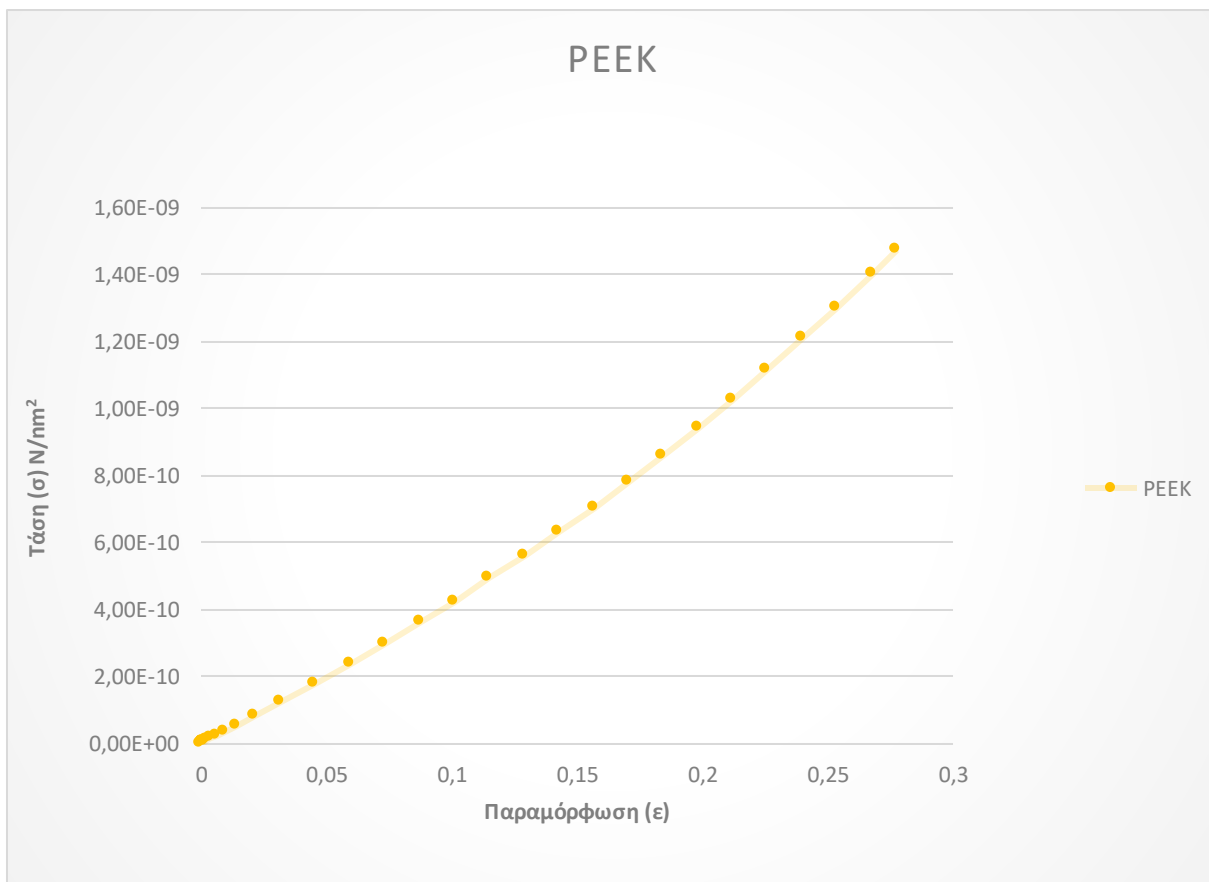
OK Cancel

Εικόνα 4-3: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της επόμενης γραφικής απεικόνισης



Εικόνα 4-4: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δίνεται στην επόμενη εικόνα. Όπως φαίνεται παρουσιάζεται μια μη γραμμικότητα η οποία πρέπει να οφείλεται στο ότι μεγαλώνει η επιφάνεια στην οποία ασκούνται οι αντιδράσεις στήριξης όσο συμπιέζεται το υλικό και ασκείται η επιπρόσθετη μετακίνηση.



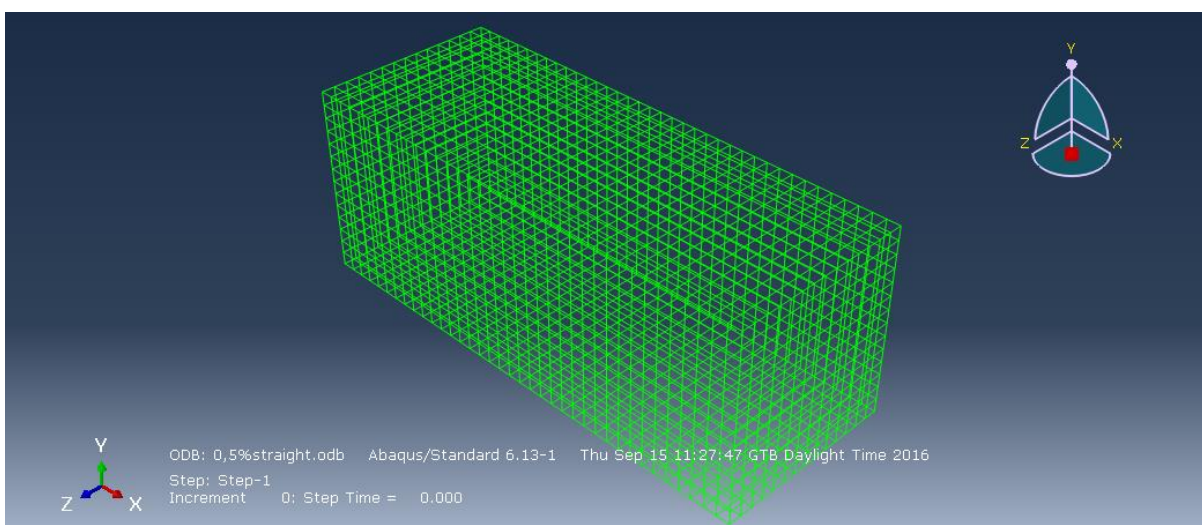
Εικόνα 4-5: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το PEEK χωρίς CNT

4.2.2 Μοντέλο με αναλογία όγκου 0,5%

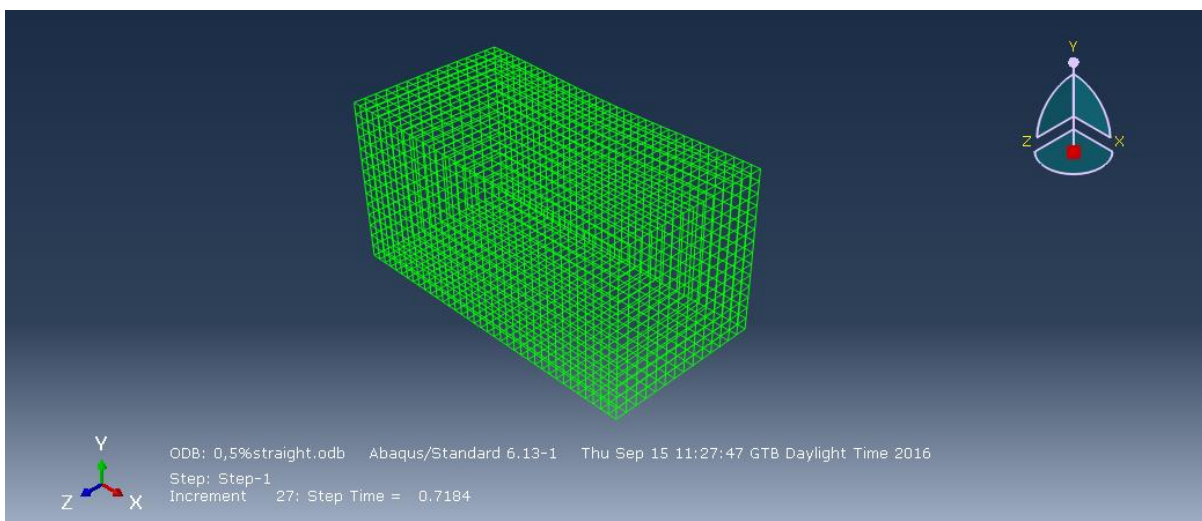
Οι διαστάσεις του PEEK που χρησιμοποιήθηκαν είναι $a=28$, $b=28$, $t=74$ που αντιστοιχούν σε $V_{PEEK}=58016 \text{ nm}^3$ και $V_{CNT}/V_{PEEK}=0,50\%$

4.2.2.1 Ευθύγραμμο CNT

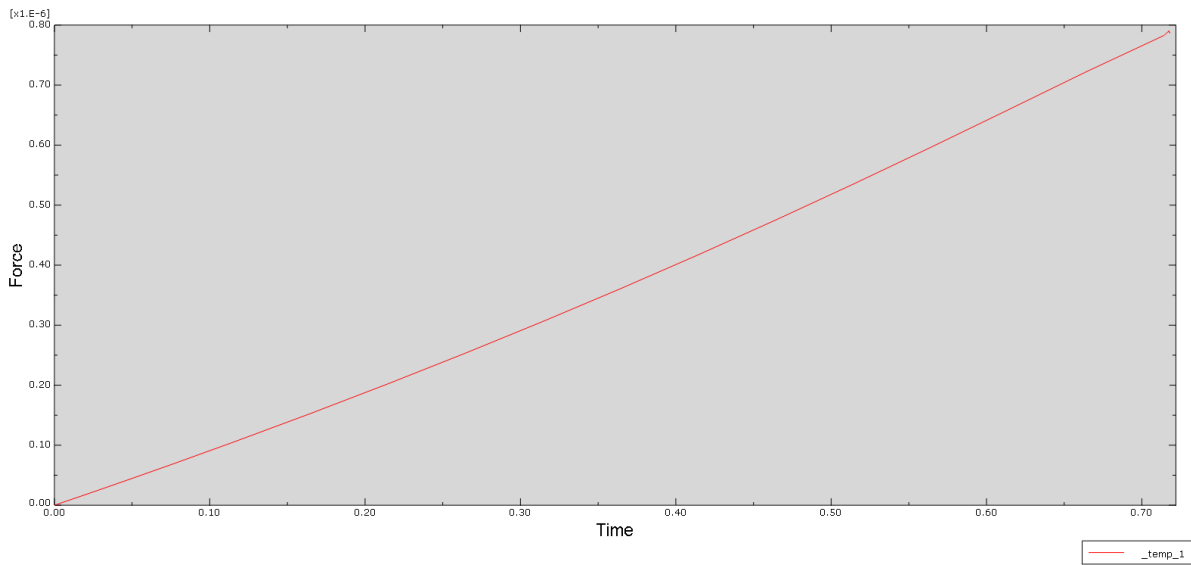
Στην Εικόνα 4-6 και Εικόνα 4-7 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,7184. Στην Εικόνα 4-8 και Εικόνα 4-9 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-6: Απαραμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5% και ευθύγραμμο CNT



Εικόνα 4-7: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5% και ευθύγραμμο CNT



Εικόνα 4-8: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5%

Edit XY Data

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	-0
2	0.001	8.79886E-010
3	0.002	1.76014E-009
4	0.0035	3.08167E-009
5	0.00575	5.06627E-009
6	0.009125	8.04835E-009
7	0.0141875	1.25332E-008
8	0.0217813	1.92868E-008
9	0.0331719	2.94773E-008
10	0.0502578	4.48997E-008
11	0.0758867	6.83459E-008
12	0.11433	1.04237E-007
13	0.16433	1.5226E-007
14	0.21433	2.01861E-007
15	0.26433	2.531E-007
16	0.31433	3.06025E-007
17	0.36433	3.60675E-007
18	0.41433	4.17071E-007
19	0.46433	4.75214E-007
20	0.51433	5.35065E-007
21	0.56433	5.96501E-007
22	0.61433	6.59163E-007
23	0.66433	7.22322E-007
24	0.71433	7.82765E-007
25	0.717455	7.90368E-007
26	0.717748	7.86582E-007

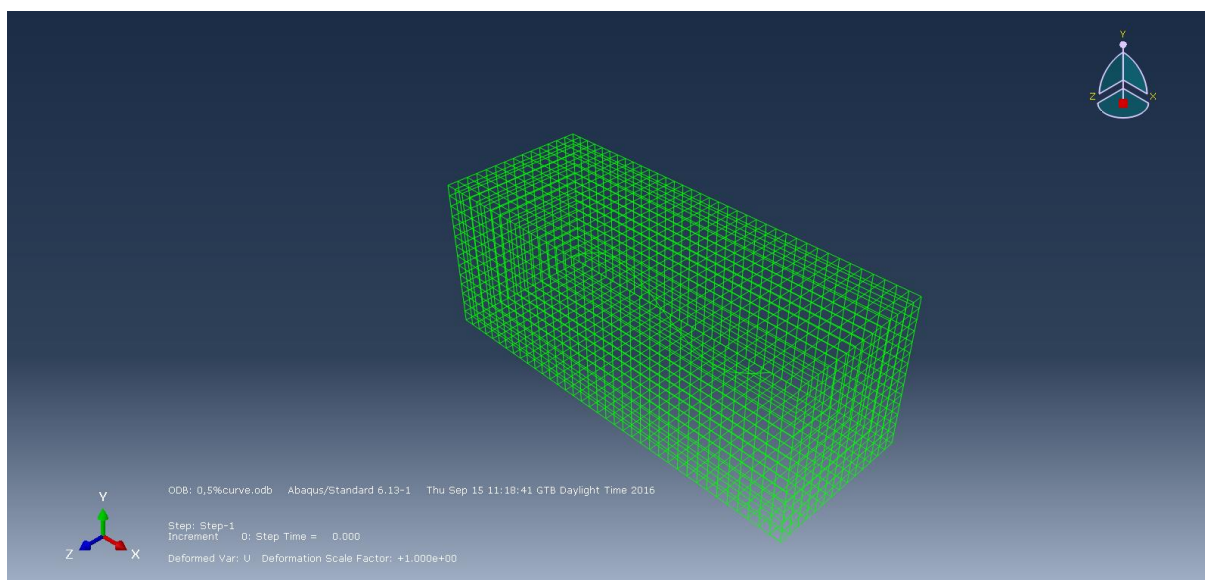
Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

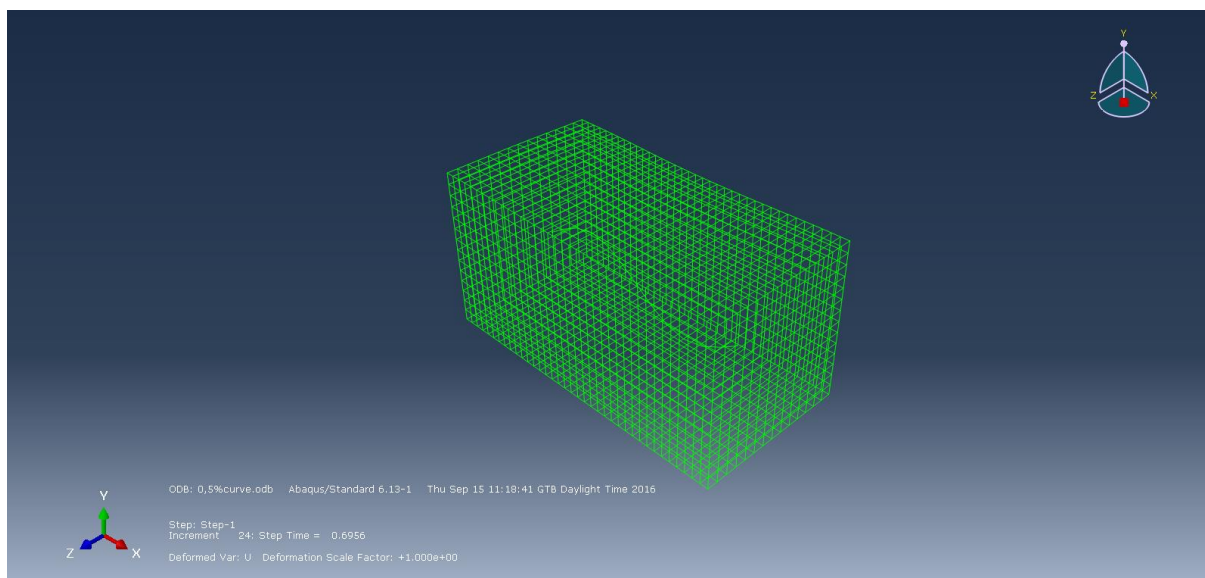
Εικόνα 4-9: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.2.2 CNT 2 καμπύλες

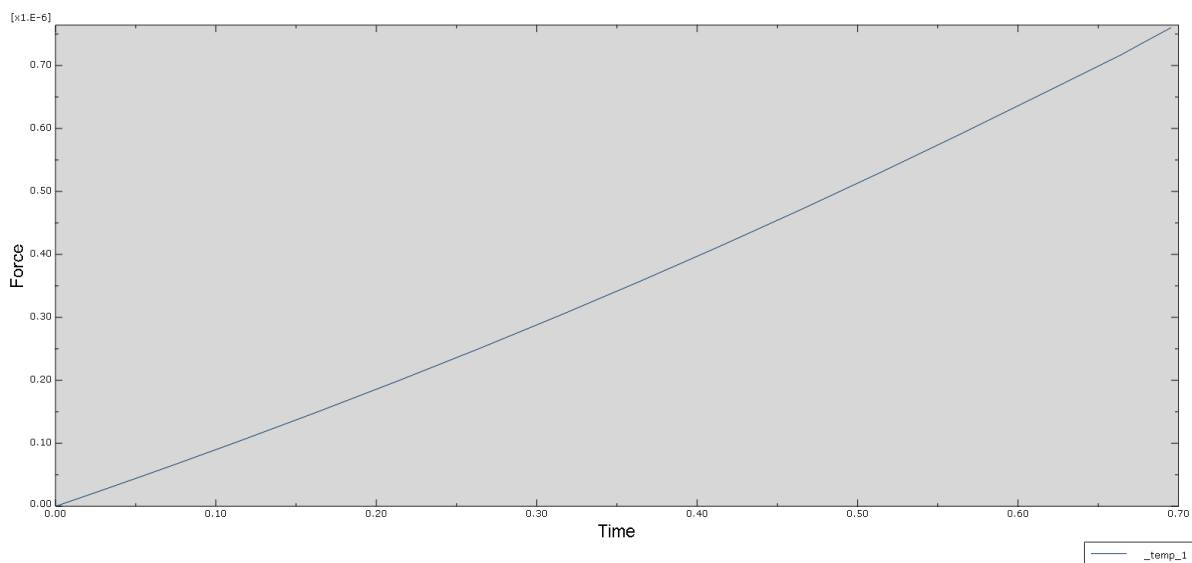
Στην Εικόνα 4-10 και Εικόνα 4-11 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,6956. Στην Εικόνα 4-12 και Εικόνα 4-13 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-10: Απαρμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5% και CNT με 2 καμπύλες



Εικόνα 4-11: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5% και CNT με 2 καμπύλες



Εικόνα 4-12: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5%

Edit XY Data ×

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	-0
2	0.001	8.72286E-010
3	0.002	1.74494E-009
4	0.0035	3.05505E-009
5	0.00575	5.02247E-009
6	0.009125	7.97869E-009
7	0.0141875	1.24245E-008
8	0.0217813	1.91193E-008
9	0.0331719	2.92203E-008
10	0.0502578	4.45059E-008
11	0.0758867	6.77409E-008
12	0.11433	1.03301E-007
13	0.16433	1.50866E-007
14	0.21433	1.9998E-007
15	0.26433	2.50708E-007
16	0.31433	3.03108E-007
17	0.36433	3.57232E-007
18	0.41433	4.13115E-007
19	0.46433	4.7077E-007
20	0.51433	5.30193E-007
21	0.56433	5.91334E-007
22	0.61433	6.53974E-007
23	0.66433	7.17029E-007
24	0.67683	7.34557E-007
25	0.69558	7.60325E-007

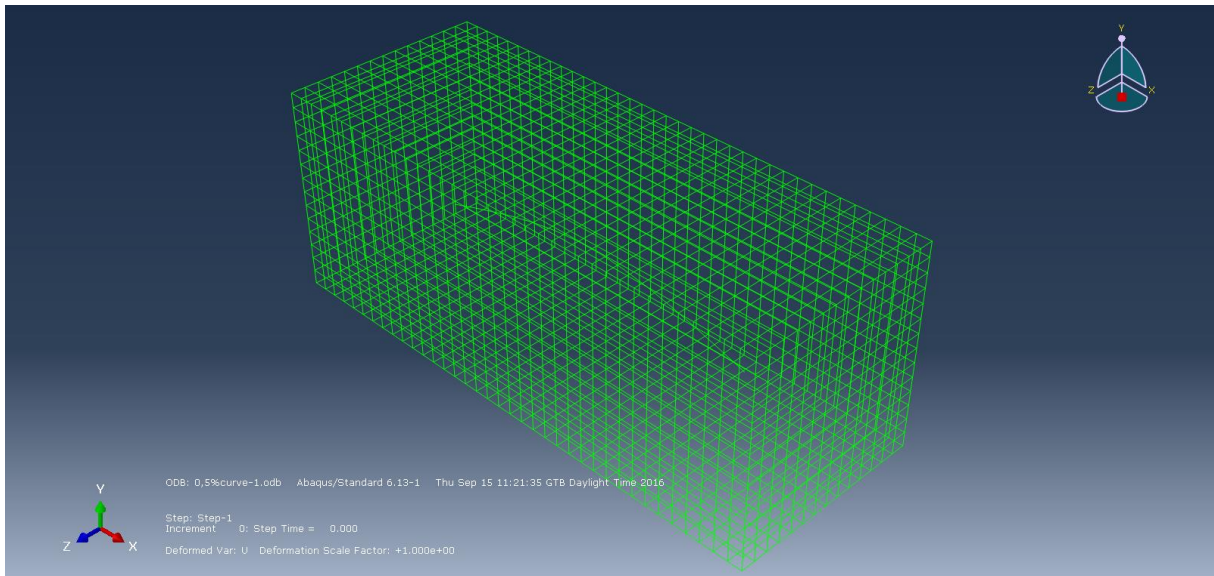
Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

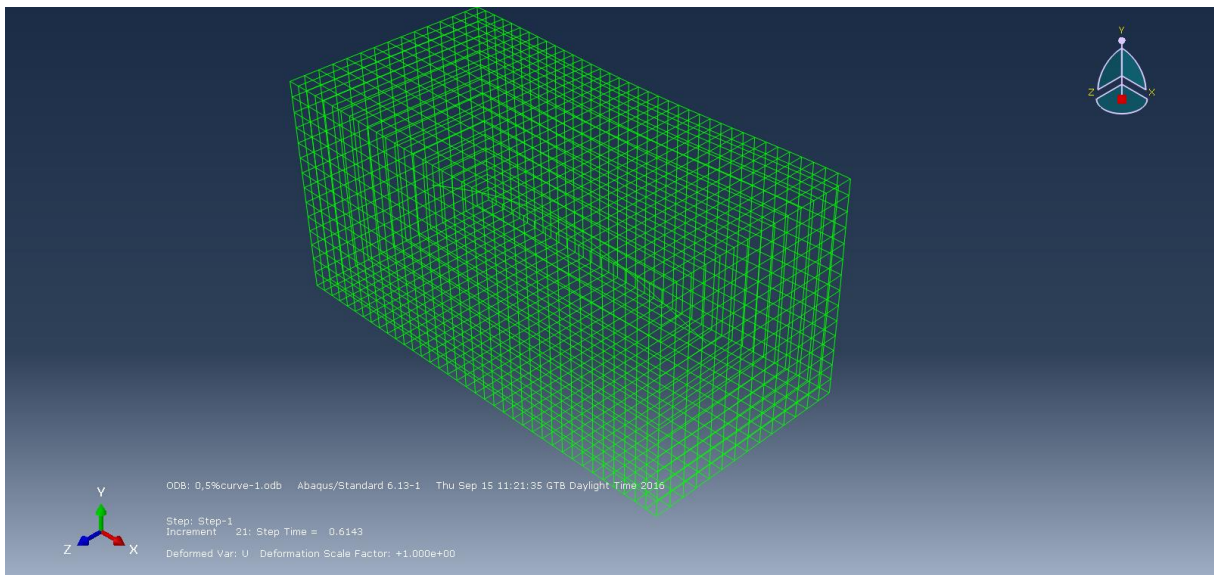
Εικόνα 4-13: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.2.3 CNT 1 καμπύλη

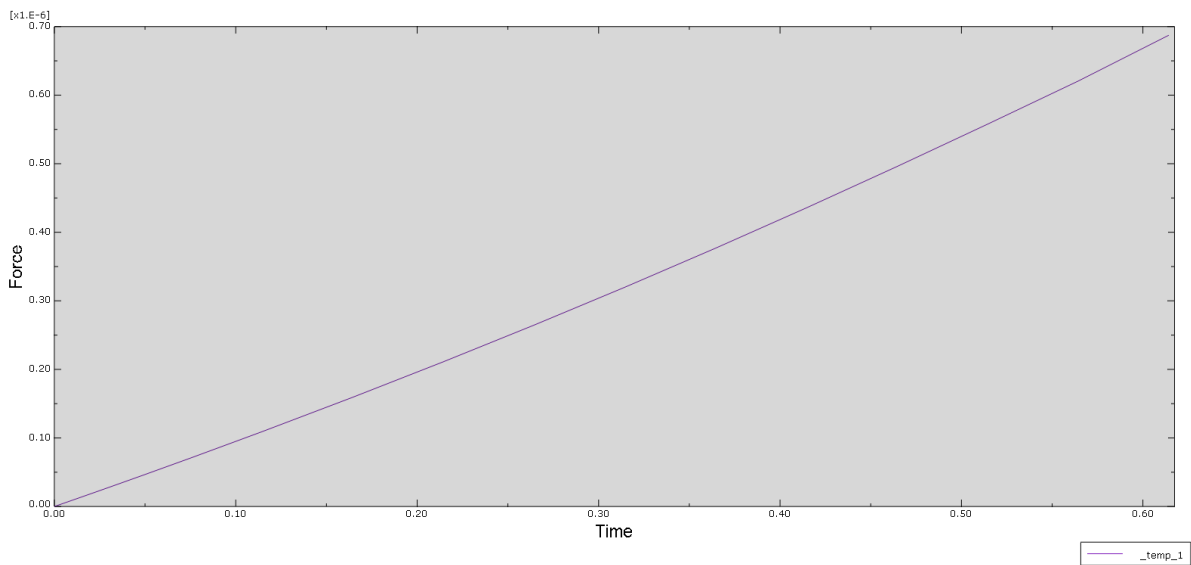
Στην Εικόνα 4-14 και Εικόνα 4-15 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,6143. Στην Εικόνα 4-16 και Εικόνα 4-17 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-14: Απαρμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5% και CNT με 1 καμπύλη



Εικόνα 4-15: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5% και CNT με 1 καμπύλη



Εικόνα 4-16: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5%

Edit XY Data ×

Name: _temp_1

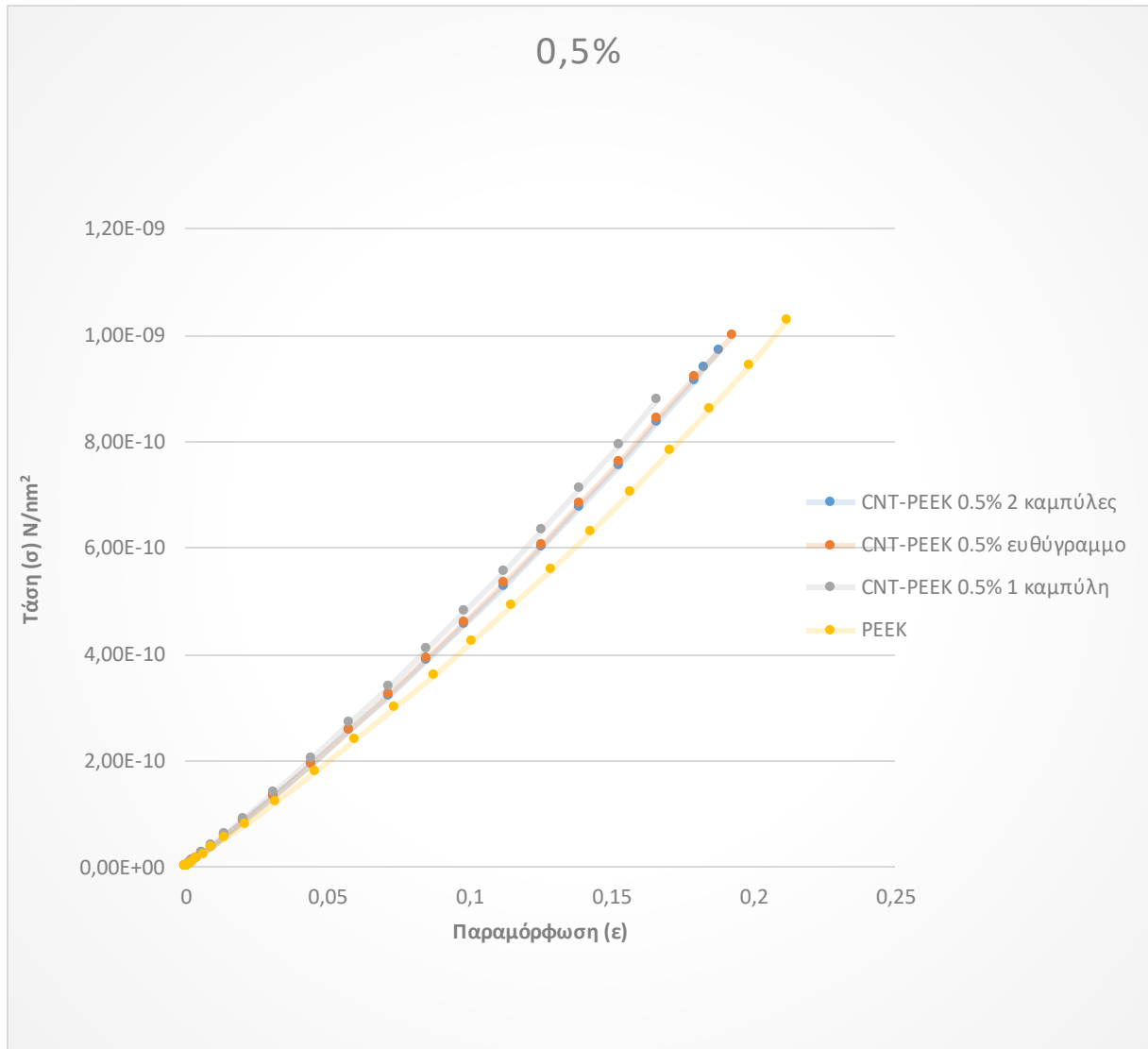
	X	Y
1	0	-0
2	0.001	9.19754E-010
3	0.002	1.83987E-009
4	0.0035	3.22128E-009
5	0.00575	5.29582E-009
6	0.009125	8.4131E-009
7	0.0141875	1.31014E-008
8	0.0217813	2.01617E-008
9	0.0331719	3.08154E-008
10	0.0502578	4.69394E-008
11	0.0758867	7.14531E-008
12	0.11433	1.08976E-007
13	0.16433	1.5917E-007
14	0.21433	2.10987E-007
15	0.26433	2.64475E-007
16	0.31433	3.19677E-007
17	0.36433	3.76624E-007
18	0.41433	4.35315E-007
19	0.46433	4.95689E-007
20	0.51433	5.57576E-007
21	0.56433	6.20497E-007
22	0.61433	6.87453E-007

Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

Εικόνα 4-17: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνιση

4.2.2.4 Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης



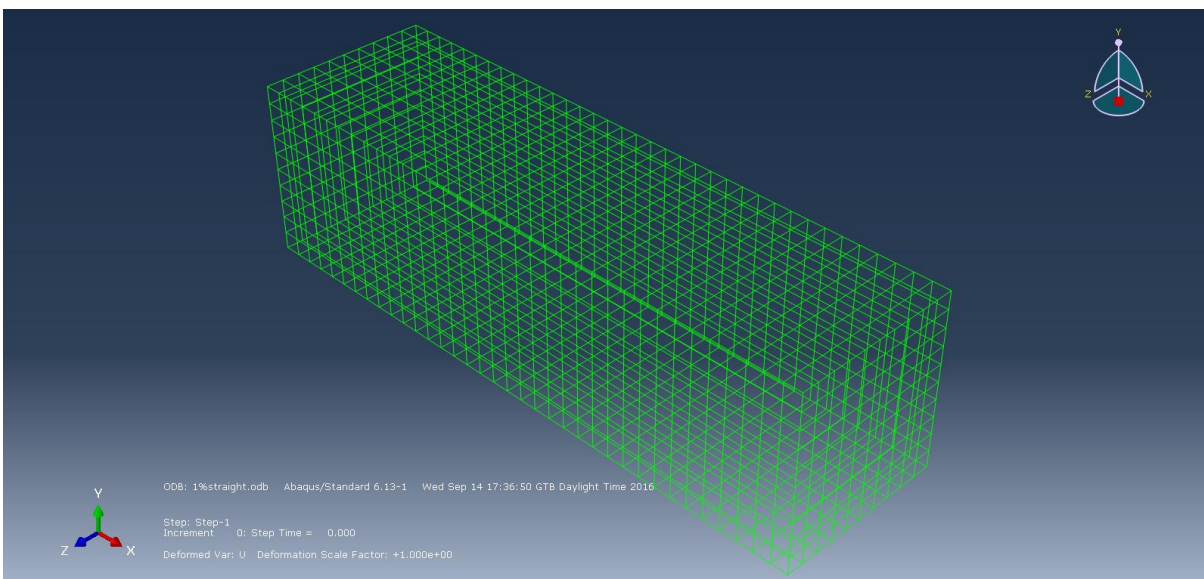
Εικόνα 4-18: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για ποσοστό αναλογίας όγκου 0,5% για την κάθε καμπυλότητα του CNT

4.2.3 Μοντέλο με αναλογία όγκου 1%

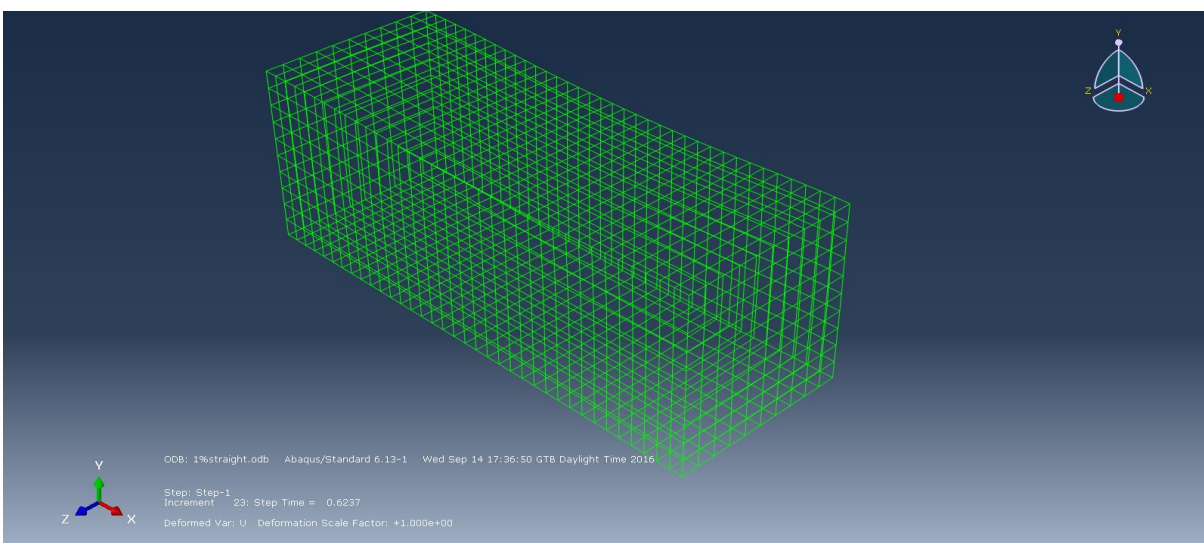
Οι διαστάσεις του PEEK που χρησιμοποιήθηκαν είναι $a=20$, $b=20$, $t=72$ που αντιστοιχούν σε $V_{PEEK}=28800 \text{ nm}^3$ και $V_{CNT}/V_{PEEK}=1\%$

4.2.3.1 Ευθύγραμμο CNT

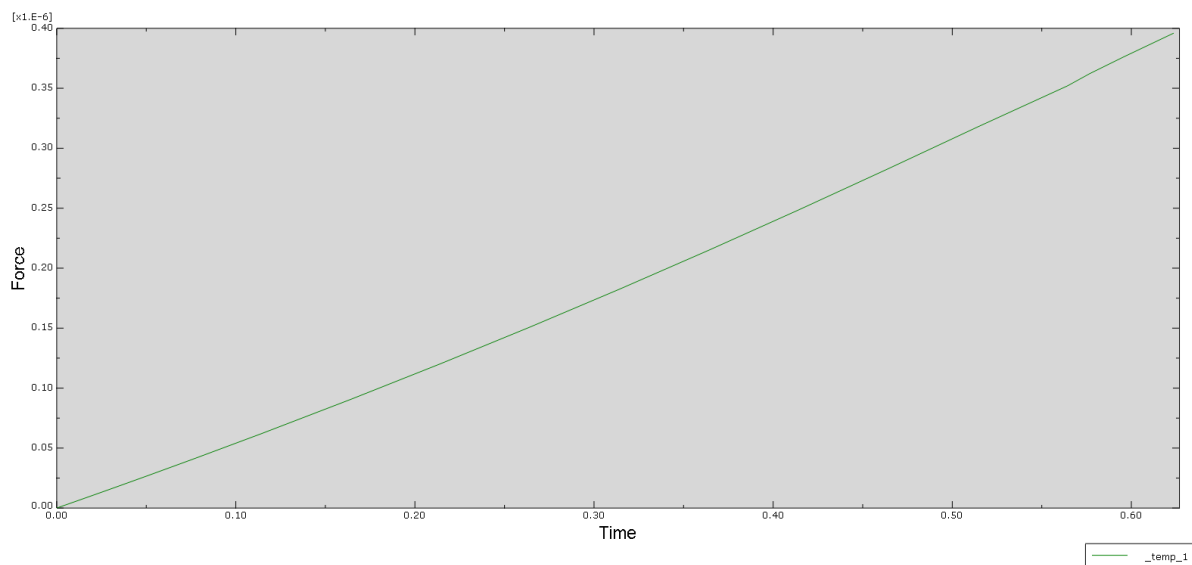
Στην Εικόνα 4-19 και Εικόνα 4-20 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,6237. Στην Εικόνα 4-21 και Εικόνα 4-22 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-19: Απαραμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 1% και ευθύγραμμο CNT



Εικόνα 4-20: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 1% και ευθύγραμμο CNT



Εικόνα 4-21: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 1%

Edit XY Data ✕

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	-0
2	0.001	5.22534E-010
3	0.002	1.04526E-009
4	0.0035	1.83011E-009
5	0.00575	3.00884E-009
6	0.009125	4.78024E-009
7	0.0141875	7.44475E-009
8	0.0217813	1.14583E-008
9	0.0331719	1.75167E-008
10	0.0502578	2.66907E-008
11	0.0758867	4.0649E-008
12	0.11433	6.20401E-008
13	0.16433	9.06989E-008
14	0.21433	1.2033E-007
15	0.26433	1.50949E-007
16	0.31433	1.82555E-007
17	0.36433	2.1513E-007
18	0.41433	2.48627E-007
19	0.46433	2.82947E-007
20	0.51433	3.1785E-007
21	0.56433	3.5198E-007
22	0.57683	3.62245E-007
23	0.59558	3.76046E-007
24	0.623705	3.95999E-007

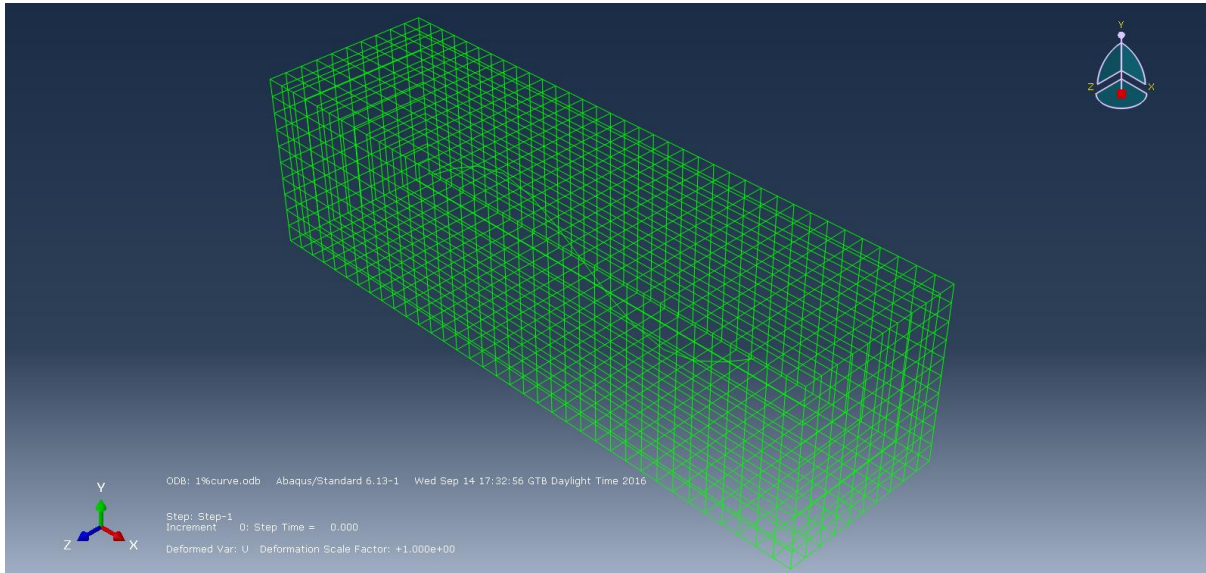
Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

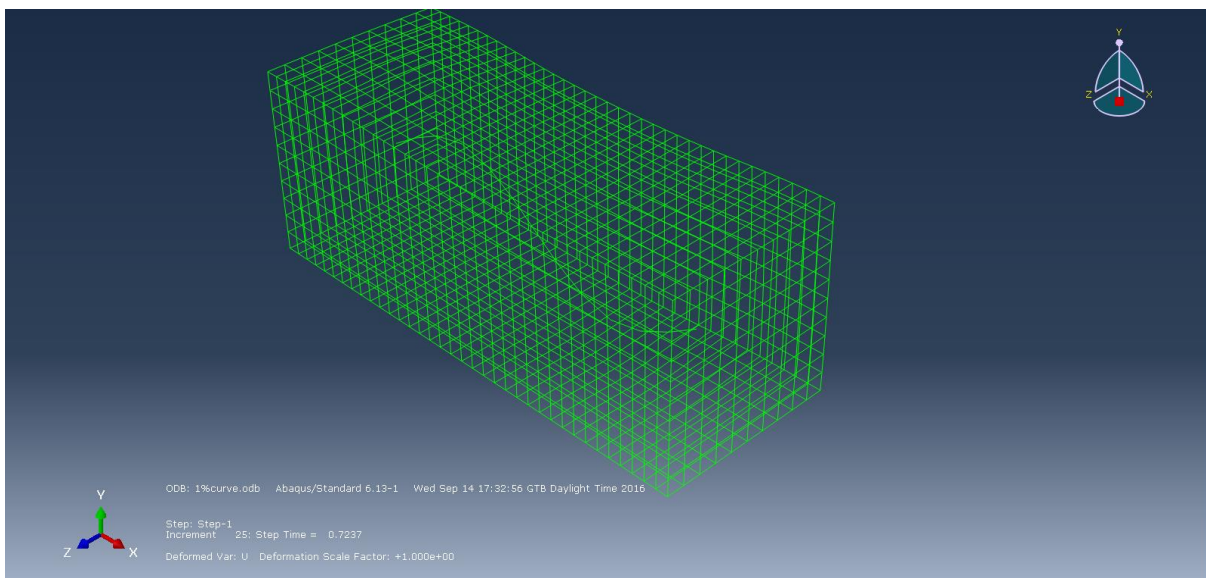
Εικόνα 4-22: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.3.2 CNT 2 καμπύλες

Στην Εικόνα 4-23 και Εικόνα 4-24 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,7237.

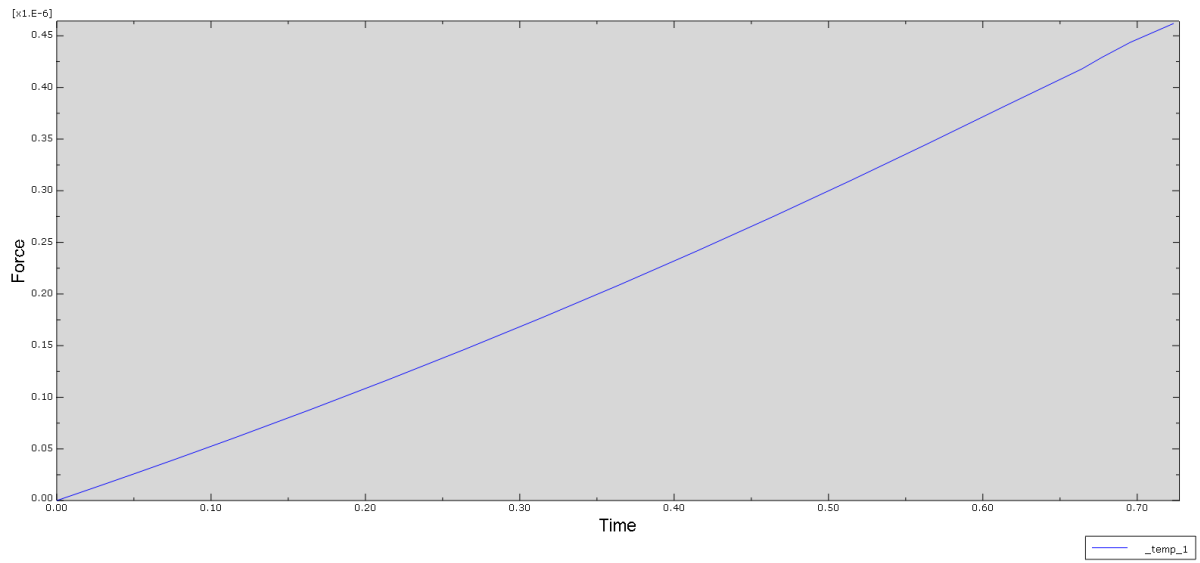


Εικόνα 4-23: Απαρμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 1% και CNT με 2 καμπύλες



Εικόνα 4-24: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 1% και CNT με 2 καμπύλες

Στην Εικόνα 4-25 και Εικόνα 4-26 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παρασθούν τα διανόμισα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-25: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 1%

Edit XY Data ✕

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	-0
2	0.001	5.08504E-010
3	0.002	1.01718E-009
4	0.0035	1.78091E-009
5	0.00575	2.92786E-009
6	0.009125	4.65133E-009
7	0.0141875	7.24345E-009
8	0.0217813	1.11472E-008
9	0.0331719	1.70382E-008
10	0.0502578	2.59549E-008
11	0.0758867	3.95135E-008
12	0.11433	6.0274E-008
13	0.16433	8.80586E-008
14	0.21433	1.16761E-007
15	0.26433	1.46414E-007
16	0.31433	1.77049E-007
17	0.36433	2.08694E-007
18	0.41433	2.41371E-007
19	0.46433	2.75092E-007
20	0.51433	3.09844E-007
21	0.56433	3.45564E-007
22	0.61433	3.82023E-007
23	0.66433	4.18059E-007
24	0.67683	4.28876E-007
25	0.69558	4.43729E-007
26	0.723705	4.62011E-007

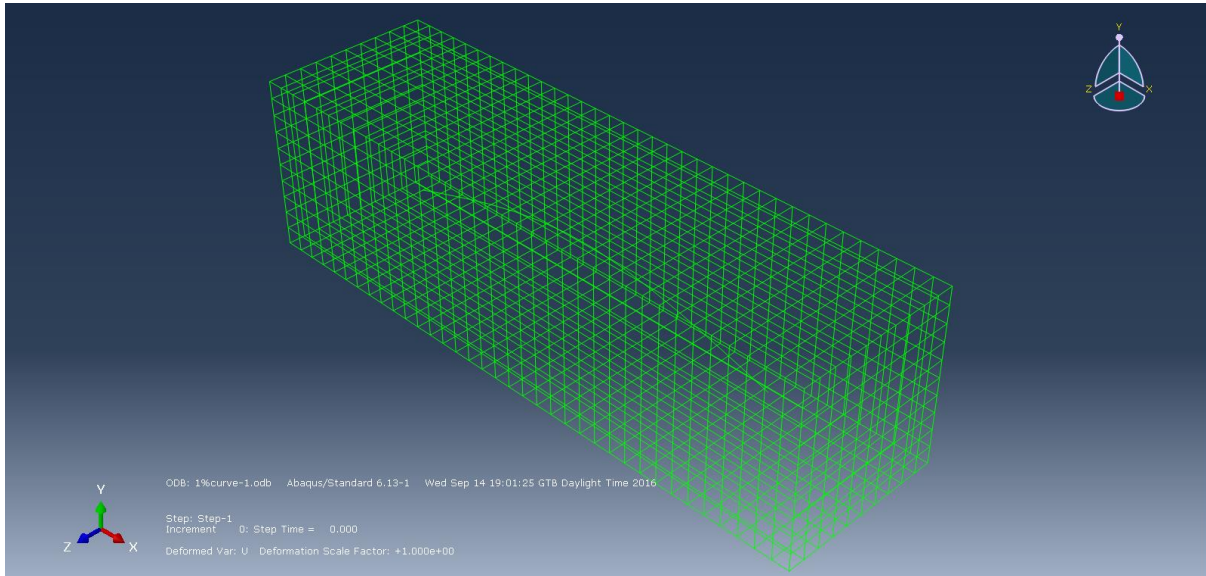
Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

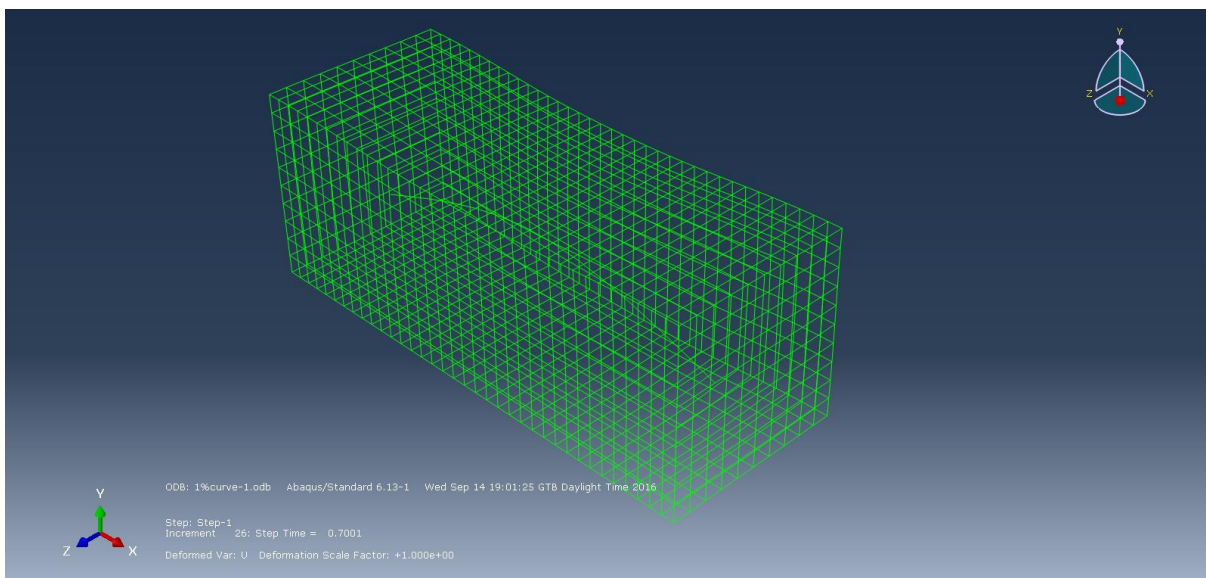
Εικόνα 4-26: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.3.3 CNT 1καμπύλη

Στην Εικόνα 4-27 και Εικόνα 4-28 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,7001.

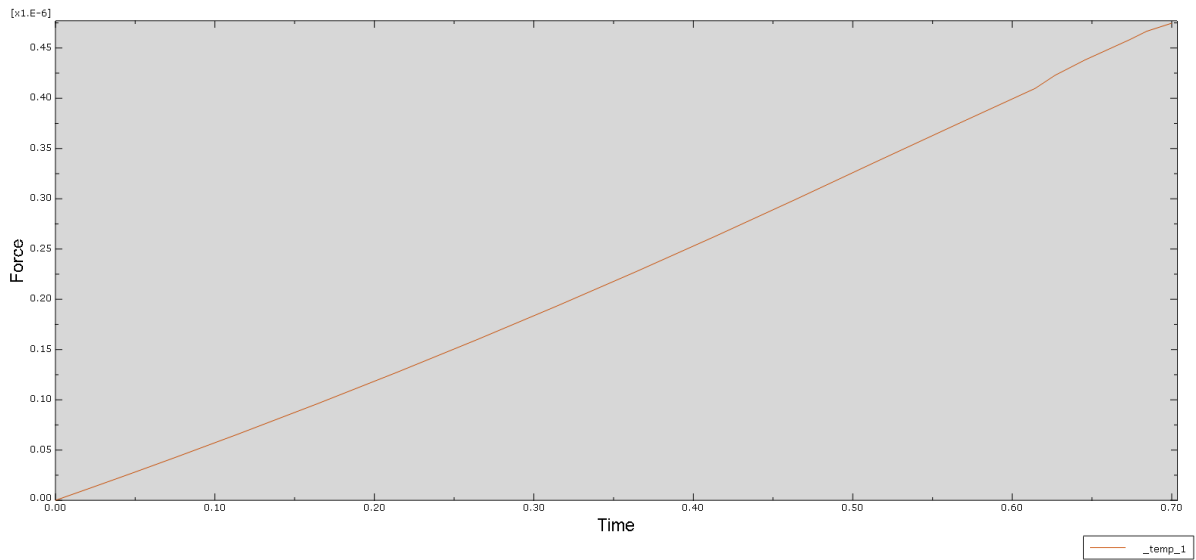


Εικόνα 4-27: Απαρμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 1% και CNT με 1 καμπύλη



Εικόνα 4-28 Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 1% και CNT με 1 καμπύλη

Στην Εικόνα 4-29 και Εικόνα 4-30 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-29: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 1%

Edit XY Data

Name: _temp_1

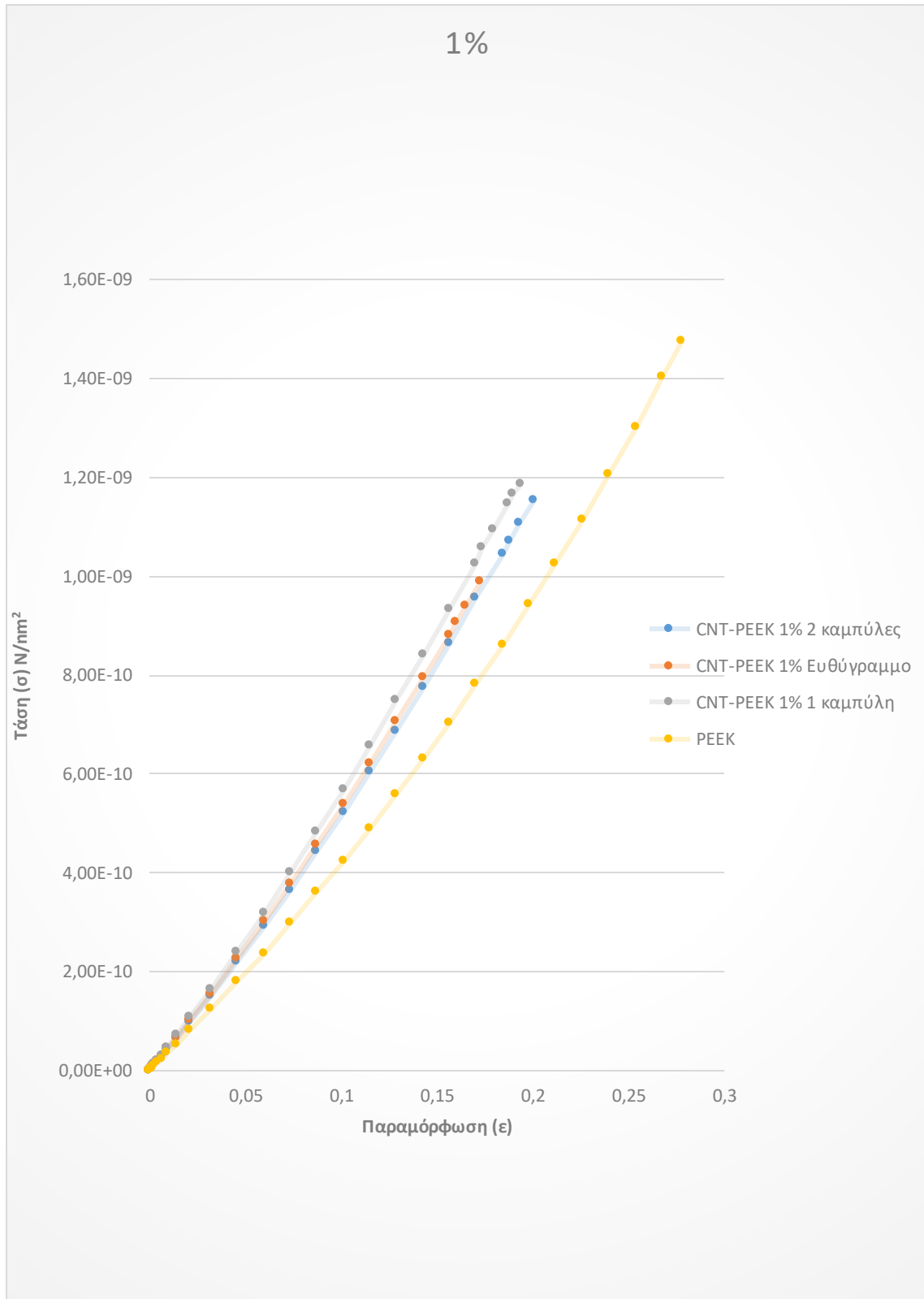
	X	Y
1	0	-0
2	0.001	5.5409E-010
3	0.002	1.10834E-009
4	0.0035	1.94054E-009
5	0.00575	3.1904E-009
6	0.009125	5.06865E-009
7	0.0141875	7.89385E-009
8	0.0217813	1.21493E-008
9	0.0331719	1.85725E-008
10	0.0502578	2.82979E-008
11	0.0758867	4.30921E-008
12	0.11433	6.57552E-008
13	0.16433	9.60975E-008
14	0.21433	1.27441E-007
15	0.26433	1.59805E-007
16	0.31433	1.93203E-007
17	0.36433	2.27637E-007
18	0.41433	2.63085E-007
19	0.46433	2.99477E-007
20	0.51433	3.36602E-007
21	0.56433	3.73377E-007
22	0.61433	4.09762E-007
23	0.62683	4.22819E-007
24	0.64558	4.38073E-007
25	0.673705	4.58319E-007
26	0.684252	4.66609E-007
27	0.700072	4.74697E-007

Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

Εικόνα 4-30: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.3.4 Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης



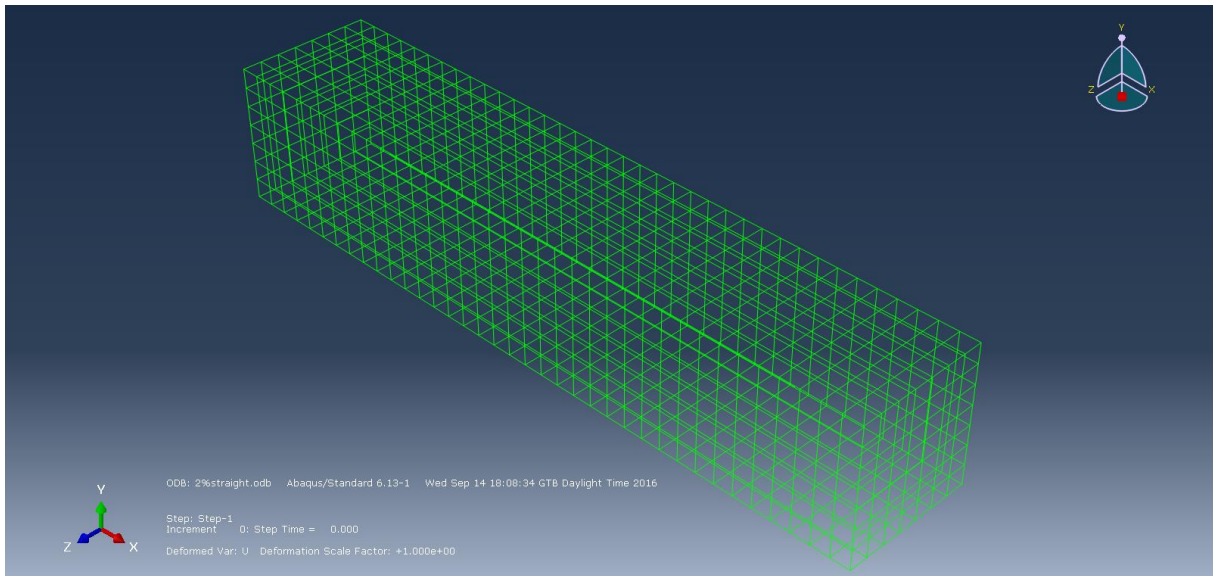
Εικόνα 4-31: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για ποσοστό αναλογίας όγκου 1% για την κάθε καμπυλότητα του CNT

4.2.4 Μοντέλο με αναλογία όγκου 2%

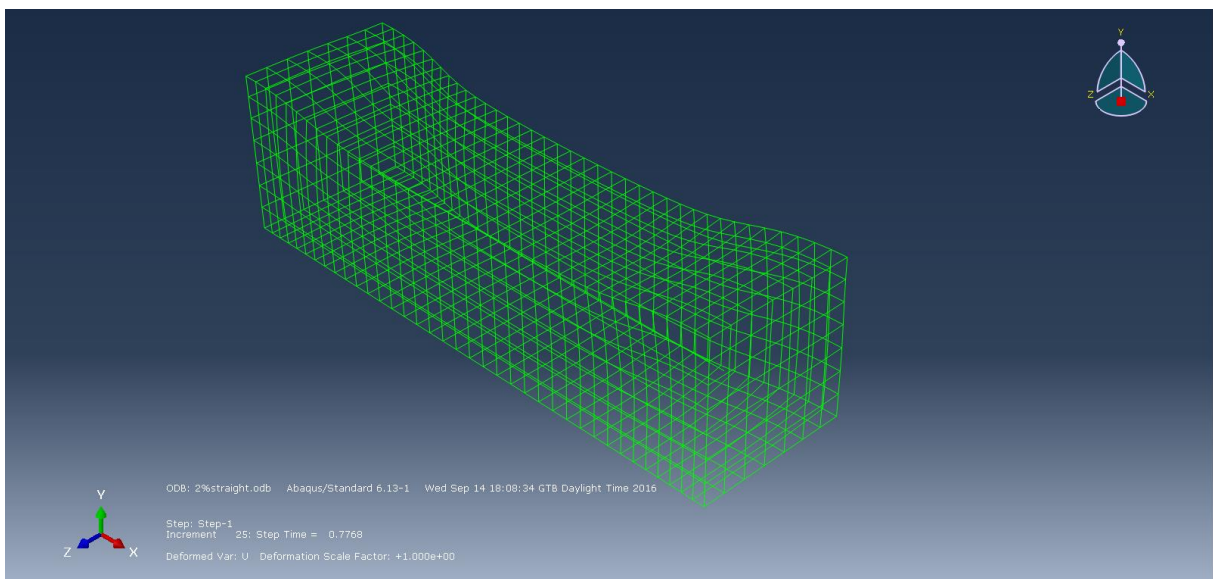
Οι διαστάσεις του PEEK που χρησιμοποιήθηκαν είναι $a=14$, $b=14$, $t=74$ που αντιστοιχούν σε $V_{PEEK}=14504 \text{ nm}^3$ και $V_{CNT}/V_{PEEK}=2\%$

4.2.4.1 Ευθύγραμμο CNT

Στην Εικόνα 4-32 και Εικόνα 4-33 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,7768.

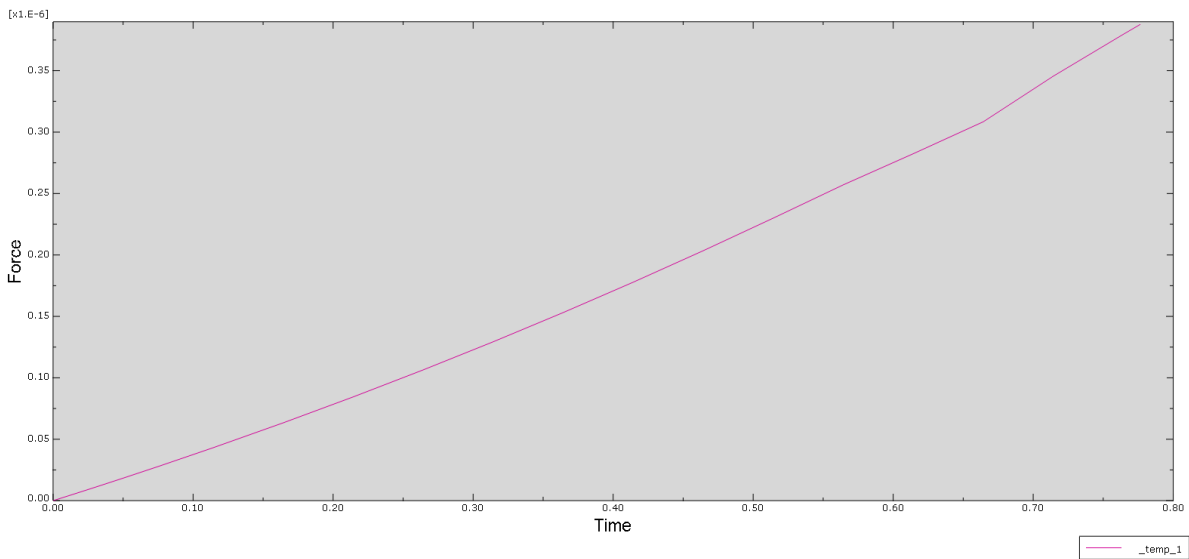


Εικόνα 4-32: Απαραμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 2% και ευθύγραμμο CNT



Εικόνα 4-33: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 2% και ευθύγραμμο CNT

Στην Εικόνα 4-34 και Εικόνα 4-35 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-34: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 2%

Edit XY Data ×

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	-0
2	0.001	3.58502E-010
3	0.002	7.17155E-010
4	0.0035	1.25586E-009
5	0.00575	2.06527E-009
6	0.009125	3.28242E-009
7	0.0141875	5.115E-009
8	0.0217813	7.87937E-009
9	0.0331719	1.2061E-008
10	0.0502578	1.84129E-008
11	0.0758867	2.81217E-008
12	0.11433	4.30993E-008
13	0.16433	6.33382E-008
14	0.21433	8.44469E-008
15	0.26433	1.06438E-007
16	0.31433	1.29325E-007
17	0.36433	1.5312E-007
18	0.41433	1.77832E-007
19	0.46433	2.03465E-007
20	0.51433	2.29981E-007
21	0.56433	2.57067E-007
22	0.61433	2.8241E-007
23	0.66433	3.08414E-007
24	0.71433	3.45534E-007
25	0.76433	3.79611E-007
26	0.77683	3.87912E-007

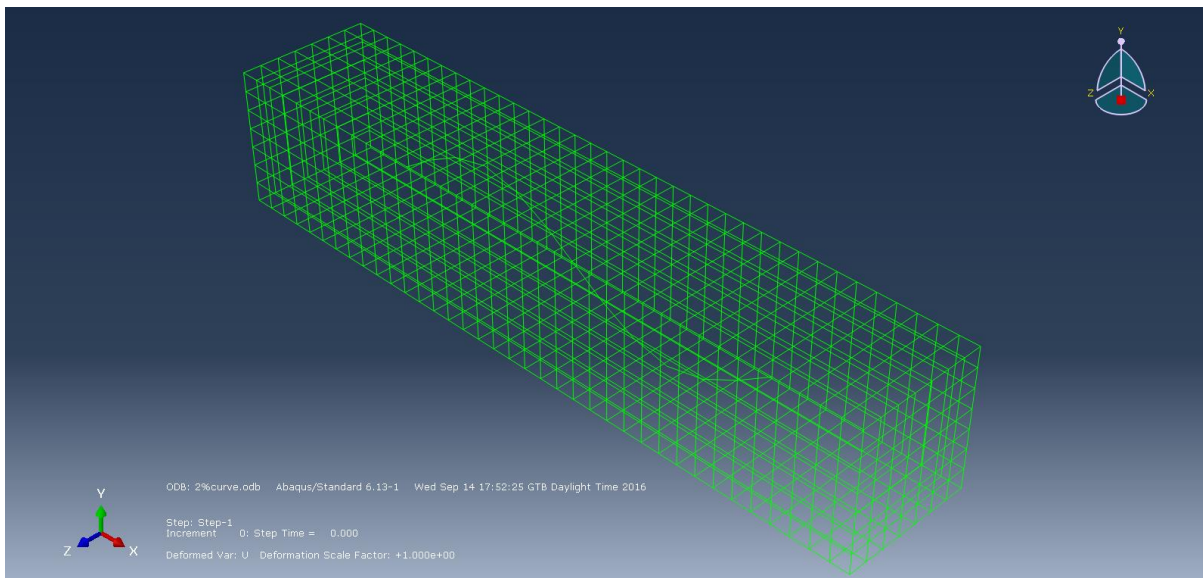
Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

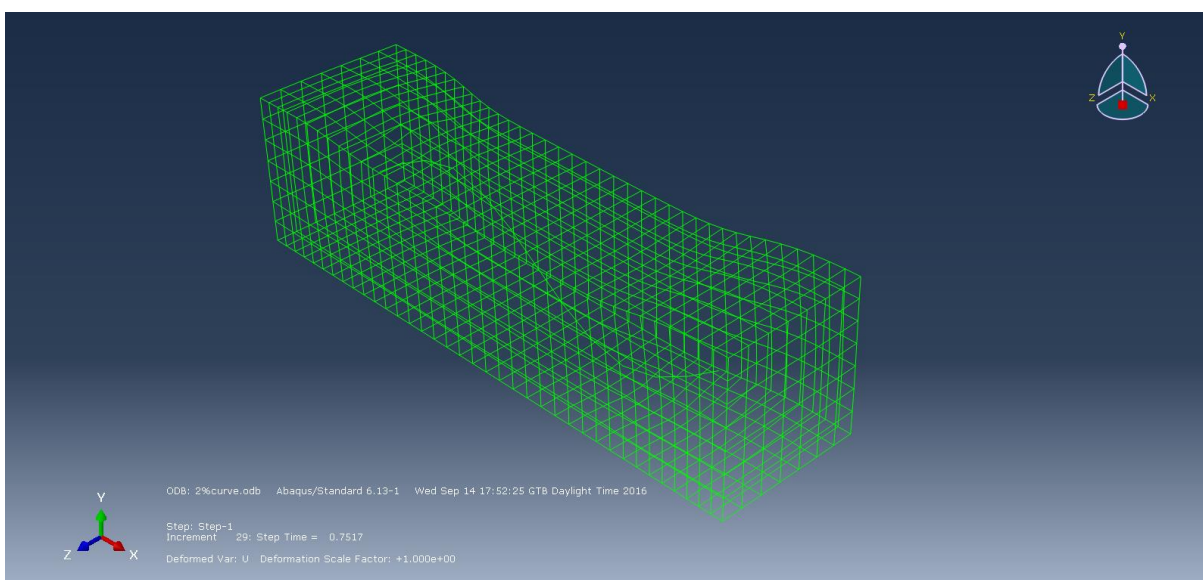
Εικόνα 4-35: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.4.2 CNT 2 καμπύλες

Στην Εικόνα 4-36 και Εικόνα 4-37 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,7517.

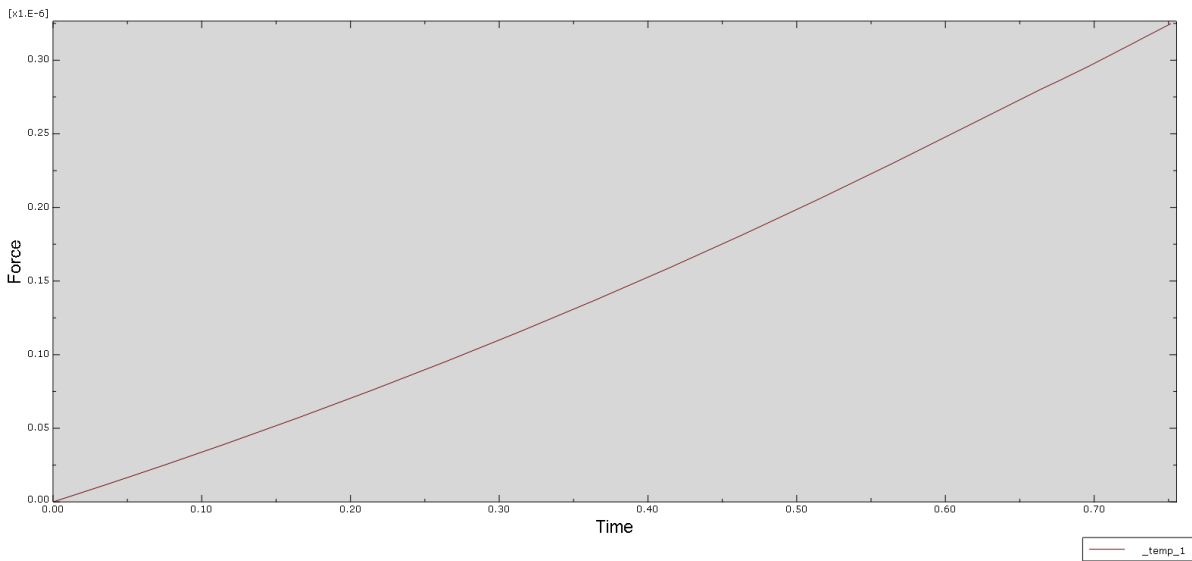


Εικόνα 4-36: Απαρμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 2% και CNT με 2 καμπύλες



Εικόνα 4-37: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 2% και CNT με 2 καμπύλες

Στην Εικόνα 4-38 και Εικόνα 4-39 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-38: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 2%

Edit XY Data ×

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	-0
2	0.001	3.24212E-010
3	0.002	6.48561E-010
4	0.0035	1.13567E-009
5	0.00575	1.86745E-009
6	0.009125	2.96762E-009
7	0.0141875	4.62354E-009
8	0.0217813	7.12018E-009
9	0.0331719	1.0894E-008
10	0.0502578	1.66204E-008
11	0.0758867	2.53597E-008
12	0.11433	3.88117E-008
13	0.16433	5.69394E-008
14	0.21433	7.57997E-008
15	0.26433	9.54119E-008
16	0.31433	1.15796E-007
17	0.36433	1.36968E-007
18	0.41433	1.58945E-007
19	0.46433	1.81743E-007
20	0.51433	2.05376E-007
21	0.56433	2.2984E-007
22	0.61433	2.55057E-007
23	0.66433	2.80343E-007
24	0.67683	2.86253E-007
25	0.69558	2.95485E-007
26	0.723705	3.1016E-007
27	0.734252	3.15754E-007
28	0.750072	3.24021E-007
29	0.751555	3.24775E-007
30	0.751694	3.24927E-007

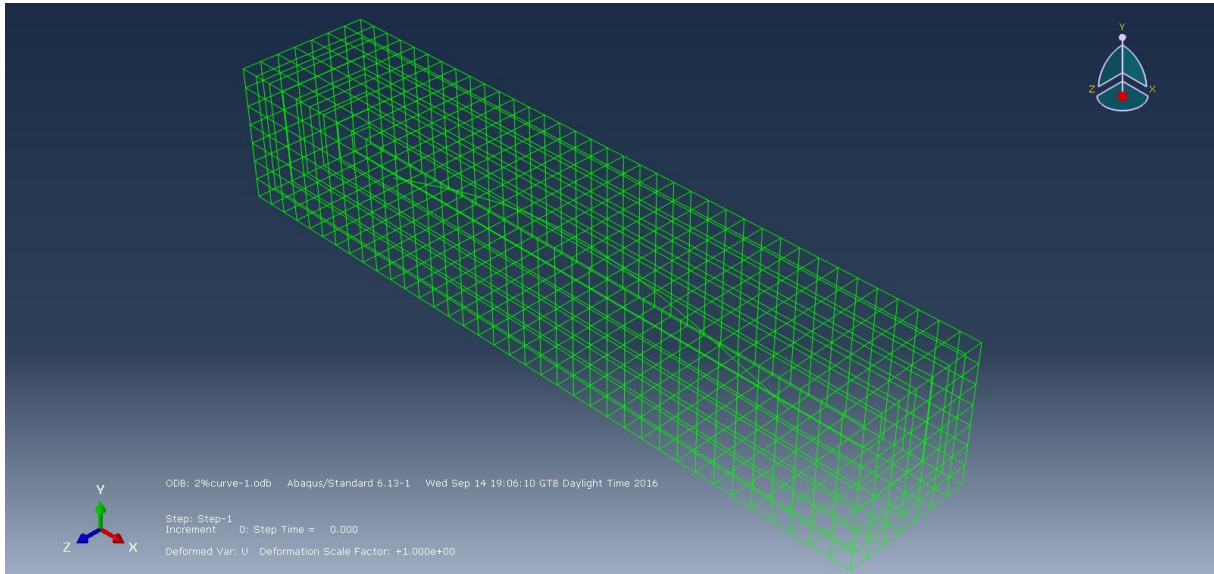
Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

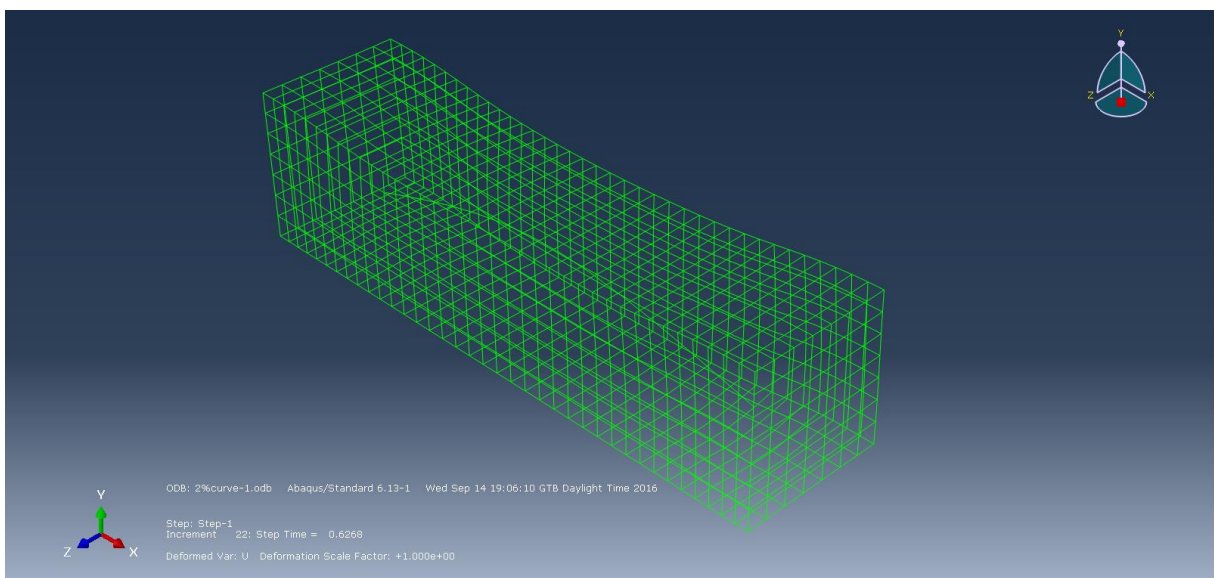
Εικόνα 4-39: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.4.3 CNT 1καμπύλη

Στην Εικόνα 4-40 και Εικόνα 4-41 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,6268.

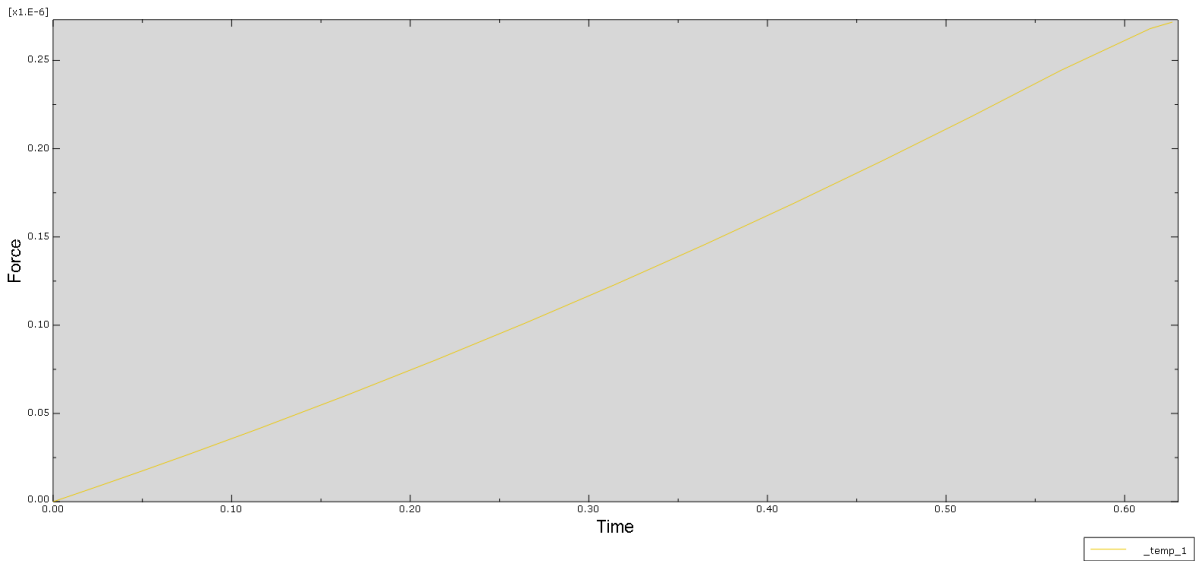


Εικόνα 4-40: Απαρμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 2% και CNT με 1 καμπύλη



Εικόνα 4-41 Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 2% και CNT με 1 καμπύλη

Στην Εικόνα 4-42 και Εικόνα 4-43 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-42: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 2%

Edit XY Data

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	0
2	0.001	5.54090E-10
3	0.002	1.10834E-09
4	0.0035	1.94054E-09
5	0.00575	3.19040E-09
6	0.009125	5.06865E-09
7	0.0141875	7.89385E-09
8	0.0217813	1.21493E-08
9	0.0331719	1.85725E-08
10	0.0502578	2.82979E-08
11	0.0758867	4.30921E-08
12	0.11433	6.57552E-08
13	0.16433	9.60975E-08
14	0.21433	1.27441E-07
15	0.26433	1.59805E-07
16	0.31433	1.93203E-07
17	0.36433	2.27637E-07
18	0.41433	2.63085E-07
19	0.46433	2.99477E-07
20	0.51433	3.36602E-07
21	0.56433	3.73377E-07
22	0.61433	4.09762E-07
23	0.62683	4.22819E-07
24	0.64558	4.38073E-07
25	0.673705	4.58319E-07
26	0.684252	4.66609E-07
27	0.700072	4.74697E-07

Quantity Types

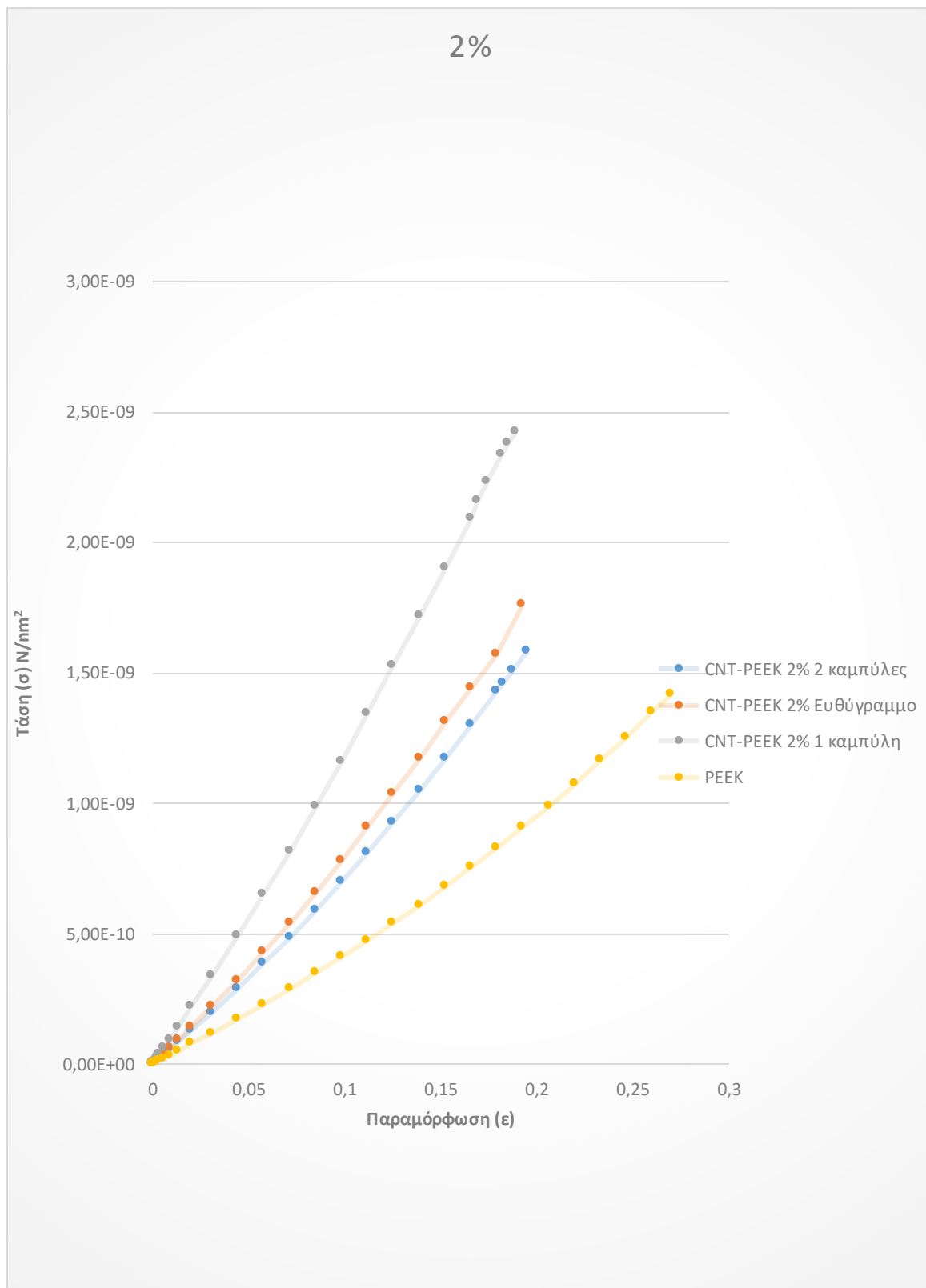
X: Time Y: Force

OK

Cancel

Εικόνα 4-43: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.4.4 Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης



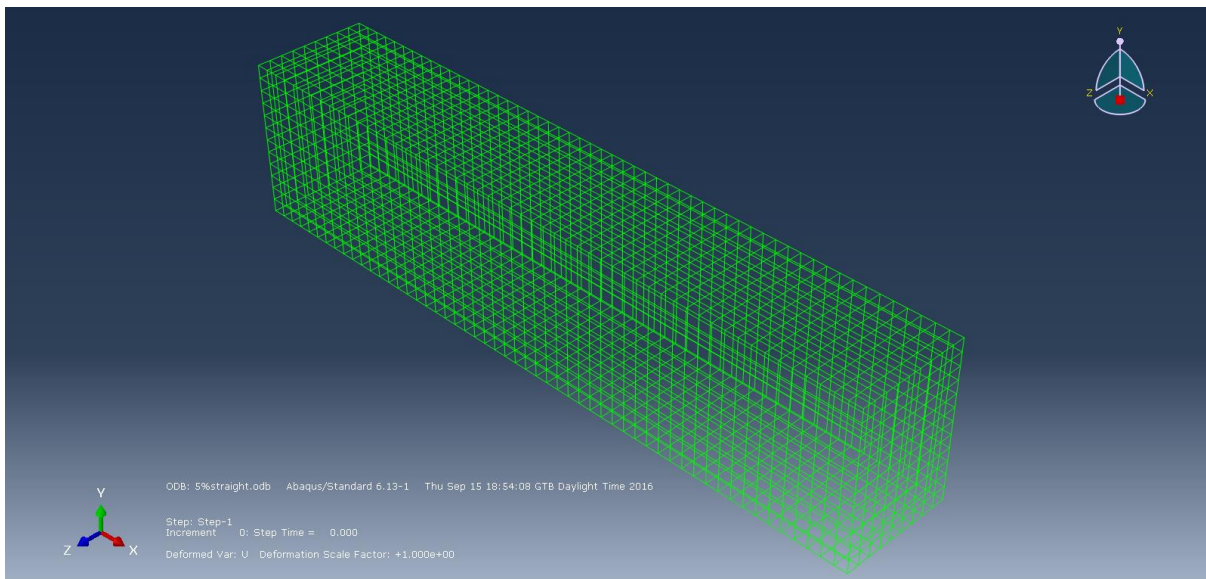
Εικόνα 4-44: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για ποσοστό αναλογίας όγκου 2% για την κάθε καμπυλότητα του CNT

4.2.5 Μοντέλο με αναλογία όγκου 5%

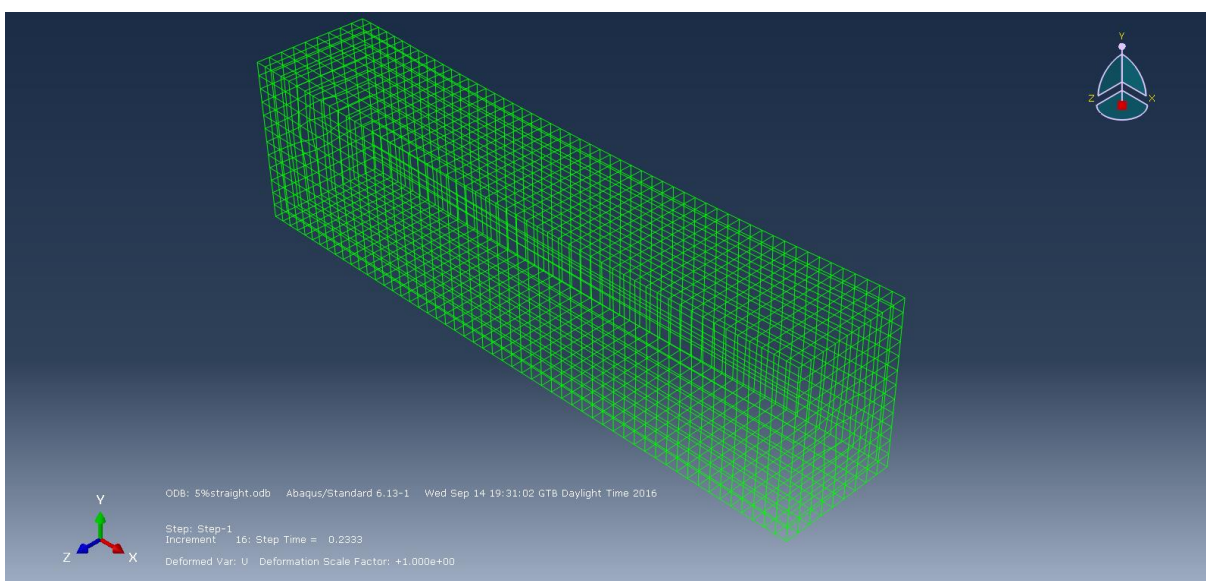
Οι διαστάσεις του ΡΕΕΚ που χρησιμοποιήθηκαν είναι $a=9$, $b=12$, $t=54$ που αντιστοιχούν σε $V_{PEEK}=5832$ mm^3 και $V_{CNT}/V_{PEEK}=5\%$

4.2.5.1 Ευθύγραμμο CNT

Στην Εικόνα 4-45 και Εικόνα 4-46 φαίνεται το απαράμορφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,2333.

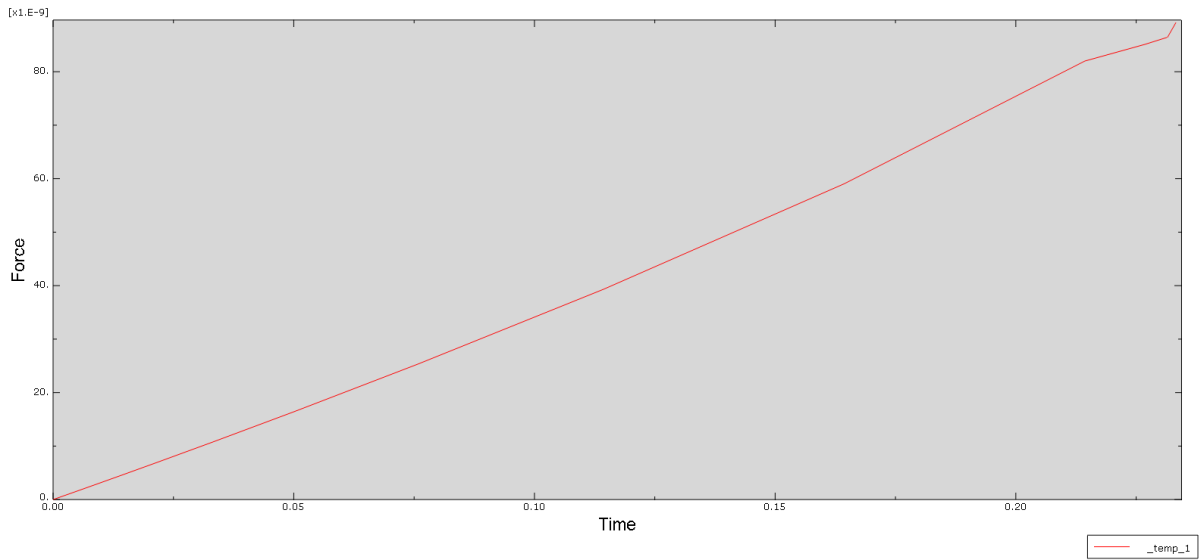


Εικόνα 4-45: Απαράμορφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 5% και ευθύγραμμο CNT



Εικόνα 4-46: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 5% και ευθύγραμμο CNT

Στην Εικόνα 4-47 και Εικόνα 4-48 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-47: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 5%

Edit XY Data ✕

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	-0
2	0.001	3.17148E-010
3	0.002	6.34401E-010
4	0.0035	1.11139E-009
5	0.00575	1.8288E-009
6	0.009125	2.90922E-009
7	0.0141875	4.53959E-009
8	0.0217813	7.00712E-009
9	0.0331719	1.07581E-008
10	0.0502578	1.64973E-008
11	0.0758867	2.53659E-008
12	0.11433	3.93123E-008
13	0.16433	5.90375E-008
14	0.21433	8.19892E-008
15	0.22683	8.51146E-008
16	0.231518	8.64432E-008
17	0.233275	8.9216E-008

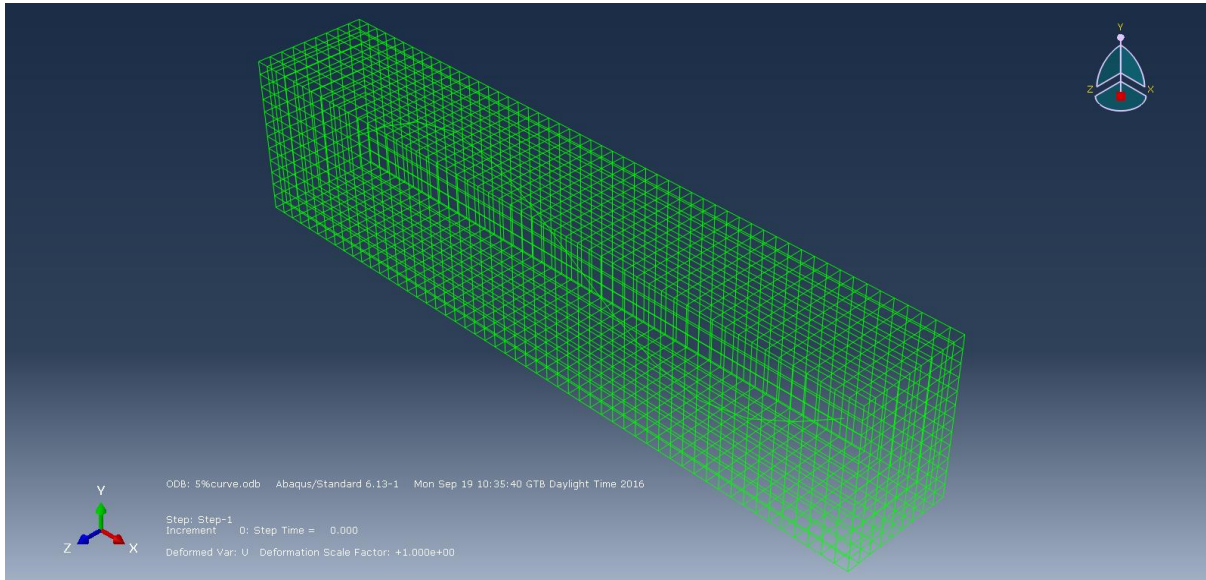
Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

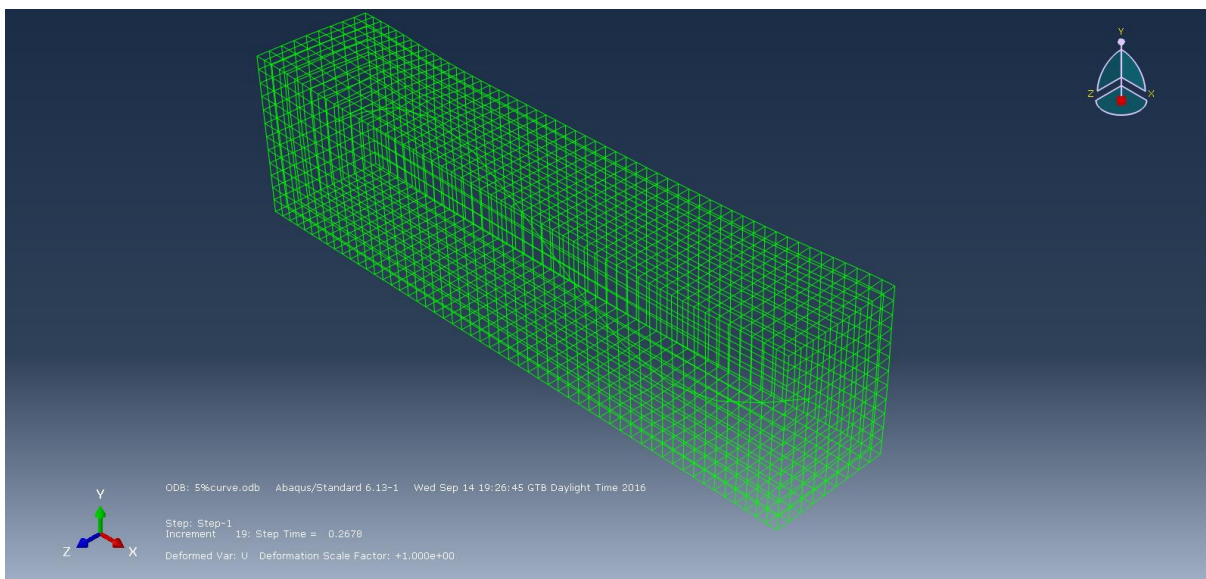
Εικόνα 4-48: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.5.2 CNT 2 καμπύλες

Στην Εικόνα 4-49 και Εικόνα 4-50 φαίνεται το अपαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,2678.

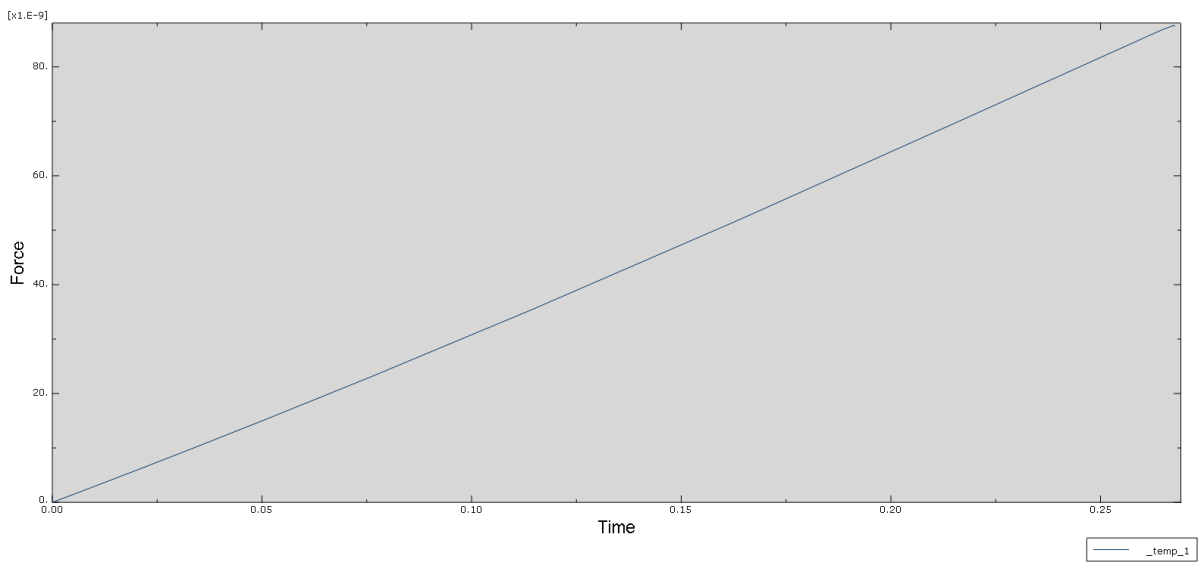


Εικόνα 4-49: Απαραμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 5% και CNT με 2 καμπύλες



Εικόνα 4-50: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 5% και CNT με 2 καμπύλες

Στην Εικόνα 4-51 και Εικόνα 4-52 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-51: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 5%

✚ Edit XY Data
✕

Name: **_temp_1**

	X	Y
1	0	-0
2	0.001	2.91249E-010
3	0.002	5.82586E-010
4	0.0035	1.02041E-009
5	0.00575	1.67857E-009
6	0.009125	2.66901E-009
7	0.0141875	4.16184E-009
8	0.0217813	6.41715E-009
9	0.0331719	9.83602E-009
10	0.0502578	1.50441E-008
11	0.0758867	2.30318E-008
12	0.11433	3.53911E-008
13	0.16433	5.20893E-008
14	0.21433	6.93518E-008
15	0.26433	8.67031E-008
16	0.267455	8.76263E-008
17	0.267748	8.74876E-008
18	0.267776	8.75158E-008
19	0.267817	8.74804E-008
20	0.267832	8.74475E-008

Quantity Types

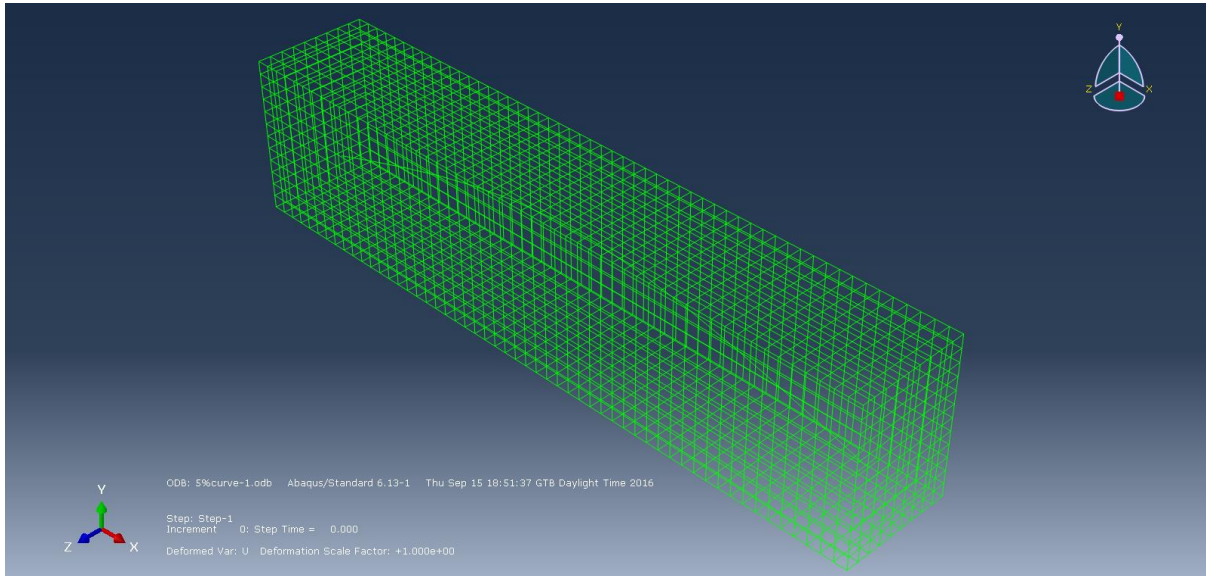
X: Time Y: Force

OK
Cancel

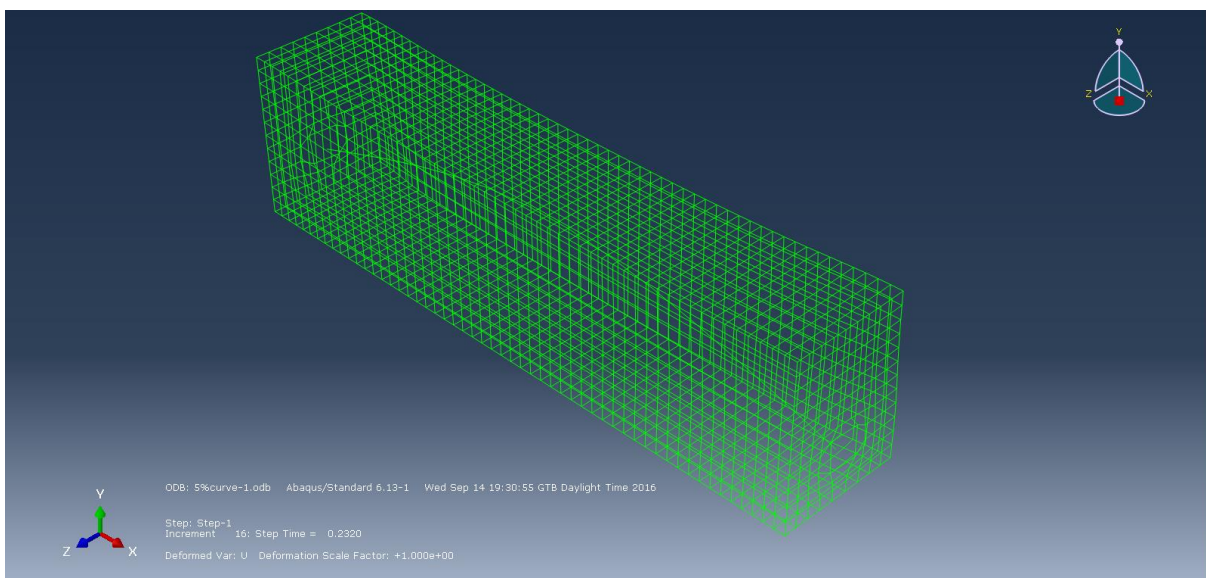
Εικόνα 4-52: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.5.3 CNT 1καμπύλη

Στην Εικόνα 4-53 και Εικόνα 4-54 φαίνεται το अपαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,2320.

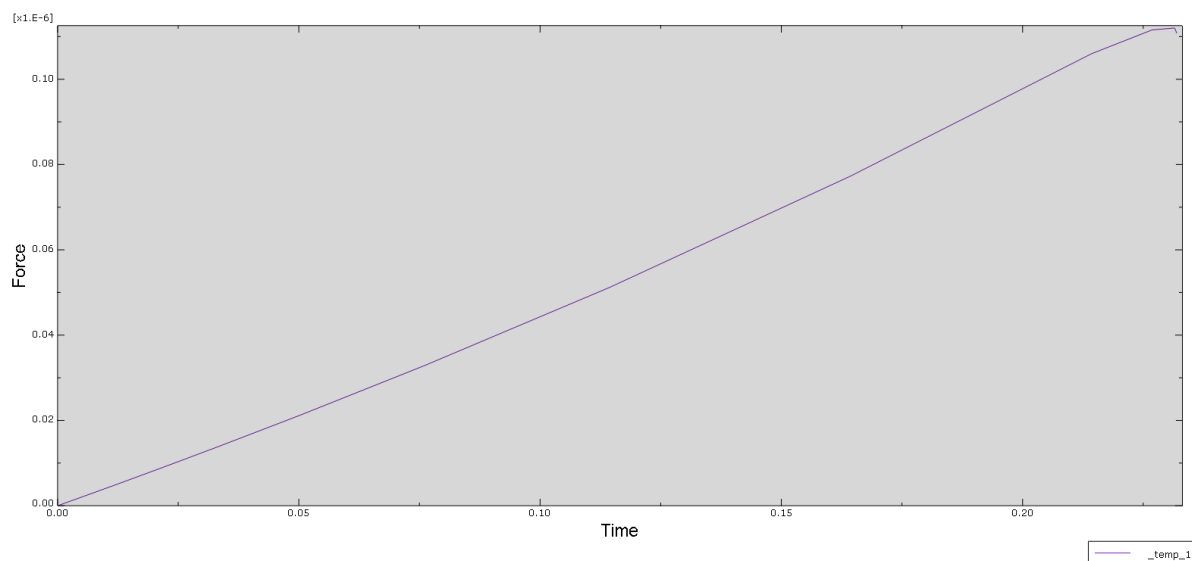


Εικόνα 4-53: Απαραμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 5% και CNT με 1 καμπύλη



Εικόνα 4-54 Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 5% και CNT με 1 καμπύλη

Στην Εικόνα 4-55 και Εικόνα 4-56 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-55: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 5%

Edit XY Data ✕

Name: _temp_1

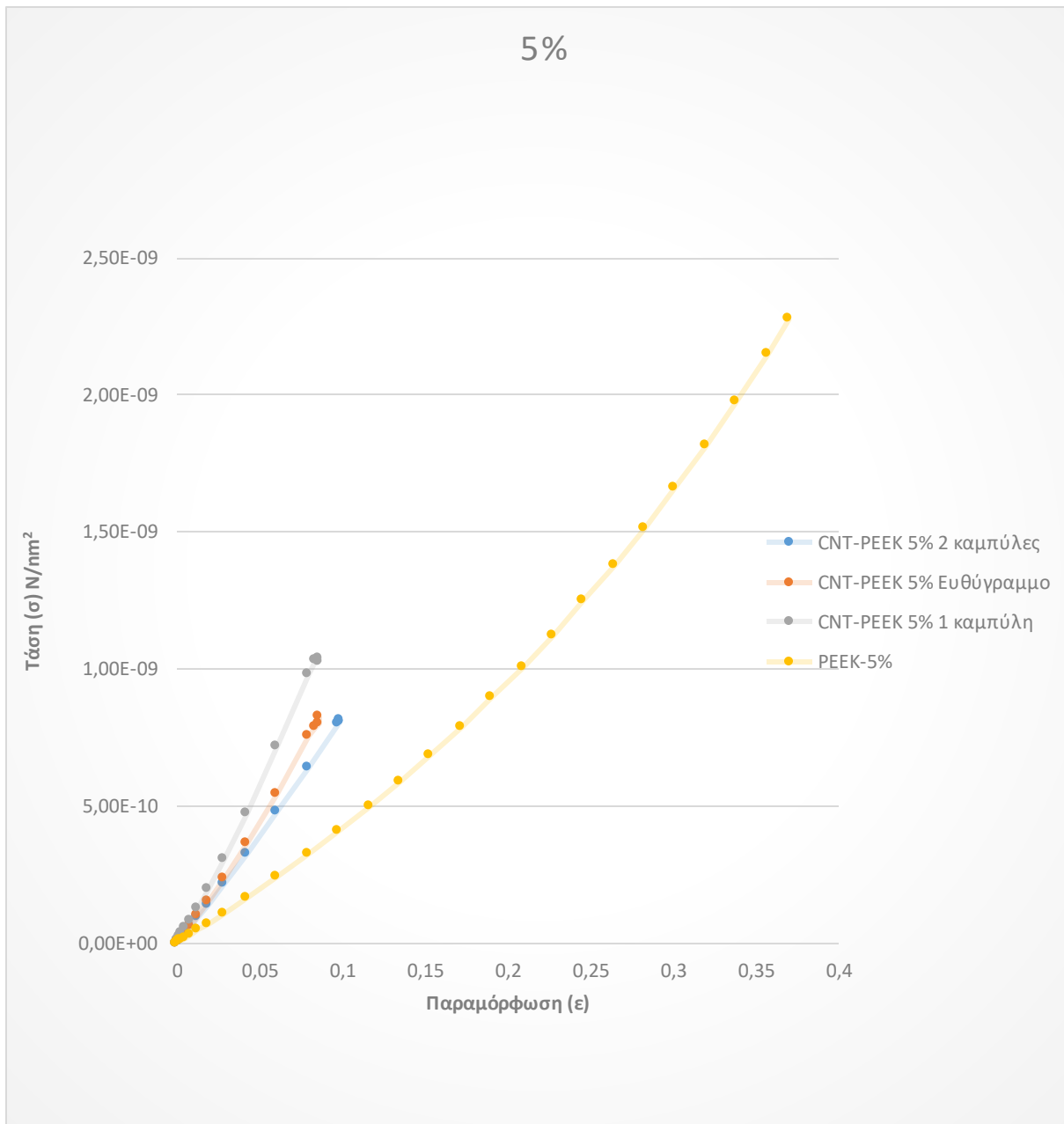
	X	Y
1	0	-0
2	0.001	4.04685E-010
3	0.002	8.0939E-010
4	0.0035	1.41831E-009
5	0.00575	2.33471E-009
6	0.009125	3.71614E-009
7	0.0141875	5.80369E-009
8	0.0217813	8.96992E-009
9	0.0331719	1.37987E-008
10	0.0502578	2.12235E-008
11	0.0758867	3.27832E-008
12	0.11433	5.11496E-008
13	0.16433	7.7282E-008
14	0.21433	1.06004E-007
15	0.22683	1.11558E-007
16	0.231518	1.12029E-007
17	0.231957	1.10718E-007

Quantity Types
 X: Time Y: Force

OK Cancel

Εικόνα 4-56: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.5.4 Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης



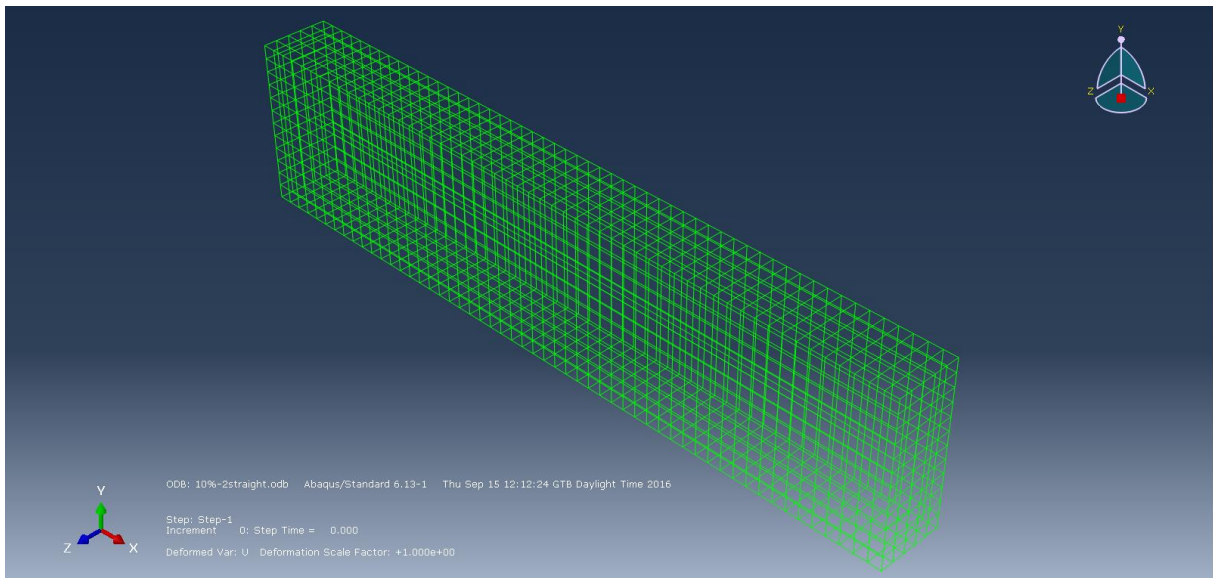
Εικόνα 4-57: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για ποσοστό αναλογίας όγκου 5% για την κάθε καμπυλότητα του CNT

4.2.6 Μοντέλο με αναλογία όγκου 10%

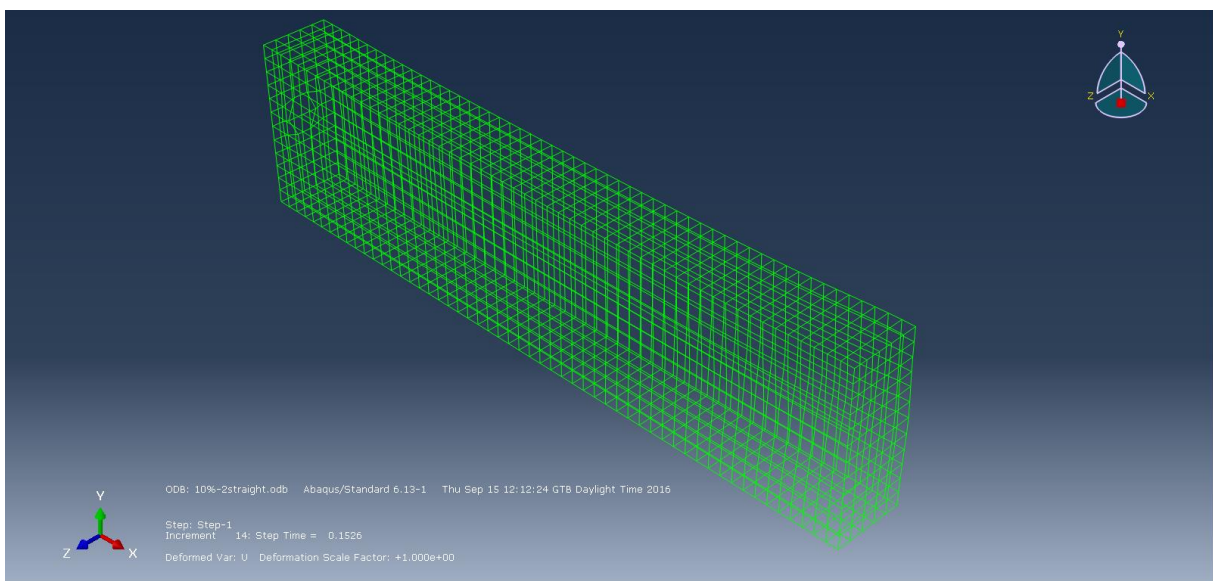
Οι διαστάσεις του ΡΕΕΚ που χρησιμοποιήθηκαν είναι $a=5$, $b=11$, $t=52,5$ που αντιστοιχούν σε $V_{\text{PEEK}}=2887,5 \text{ nm}^3$ και $V_{\text{CNT}}/V_{\text{PEEK}}=10\%$

4.2.6.1 Ευθύγραμμο CNT

Στην Εικόνα 4-58 και Εικόνα 4-59 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,1526.

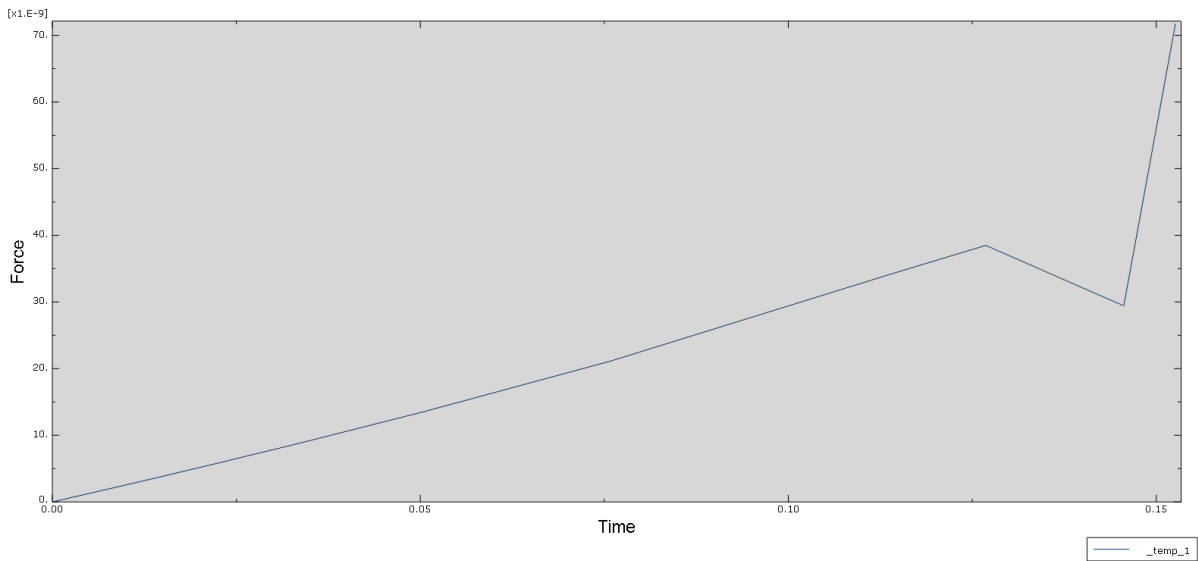


Εικόνα 4-58: Απαρμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 10% και ευθύγραμμο CNT

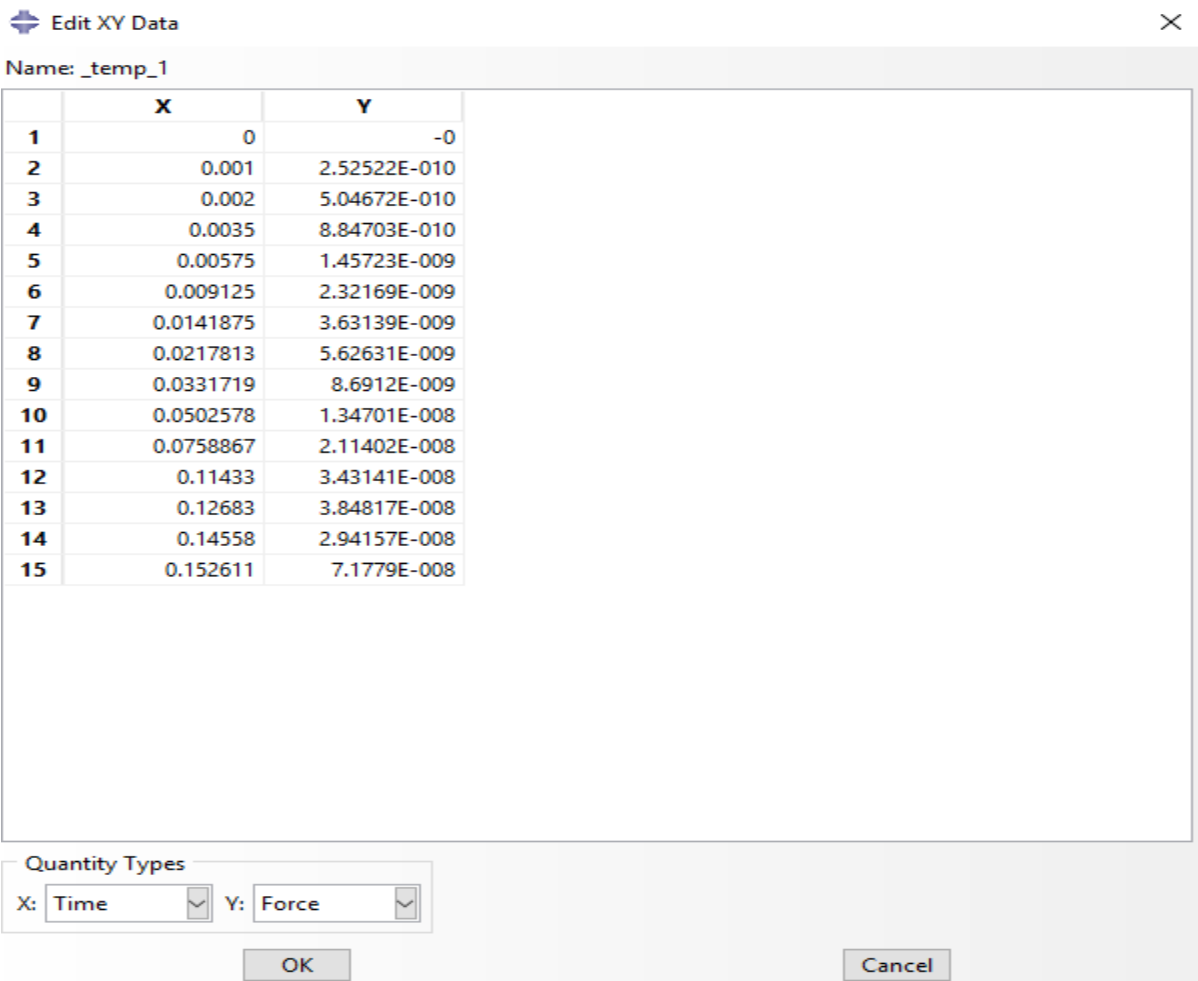


Εικόνα 4-59: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 10% και ευθύγραμμο CNT

Στην Εικόνα 4-60 και Εικόνα 4-61 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



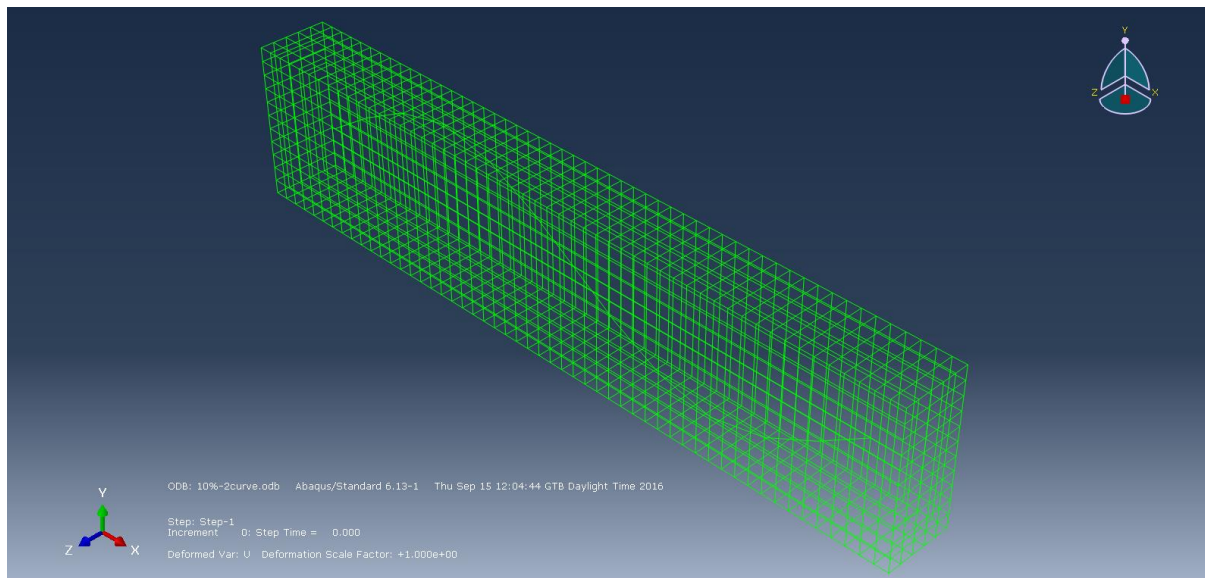
Εικόνα 4-60: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 10%



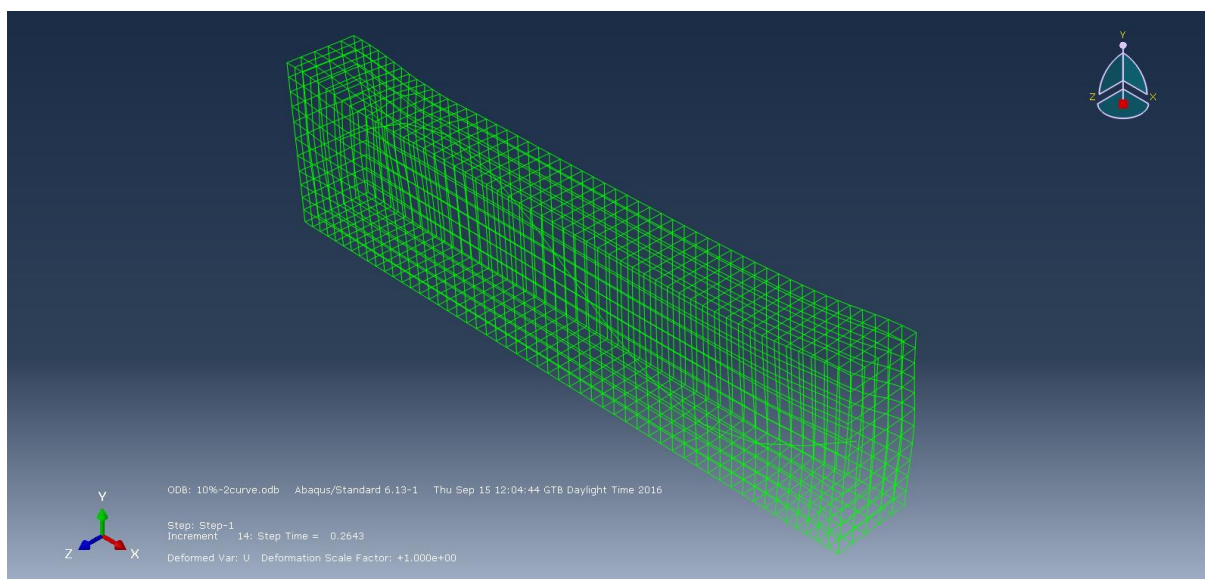
Εικόνα 4-61: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.6.2 CNT 2 καμπύλες

Στην Εικόνα 4-62 και Εικόνα 4-63 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,2643 λόγω πλευρικού λυγισμού.

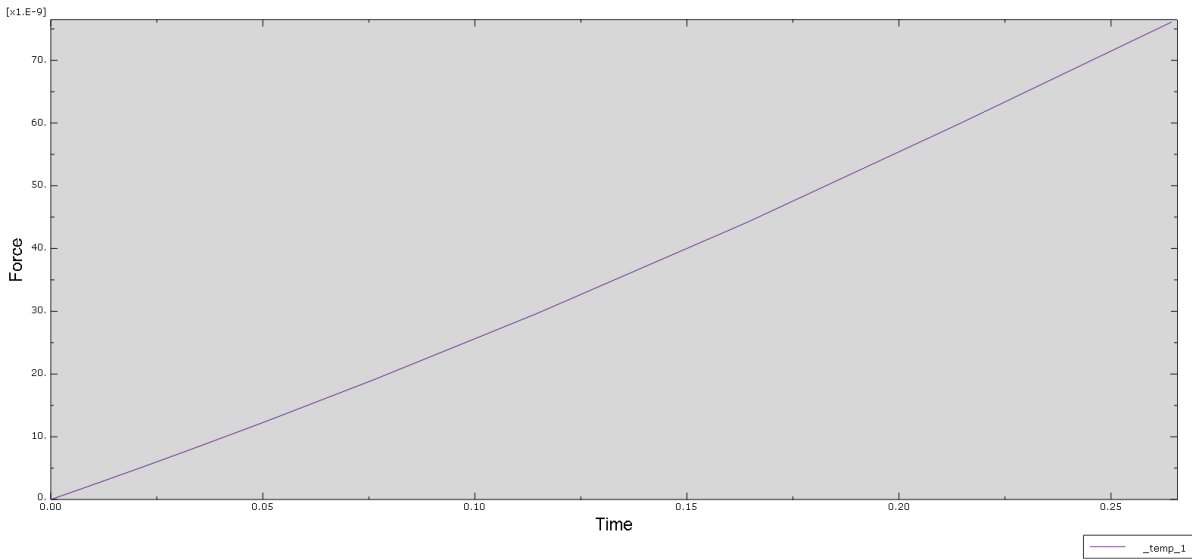


Εικόνα 4-62: Απαρμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 10% και CNT με 2 καμπύλες



Εικόνα 4-63: Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 10% και CNT με 2 καμπύλες

Στην Εικόνα 4-64 και Εικόνα 4-65 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-64: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 10%

Edit XY Data ×

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	-0
2	0.001	2.35172E-010
3	0.002	4.70397E-010
4	0.0035	8.24282E-010
5	0.00575	1.35686E-009
6	0.009125	2.15967E-009
7	0.0141875	3.37275E-009
8	0.0217813	5.21231E-009
9	0.0331719	8.01656E-009
10	0.0502578	1.23239E-008
11	0.0758867	1.90121E-008
12	0.11433	2.95583E-008
13	0.16433	4.42153E-008
14	0.21433	5.99115E-008
15	0.26433	7.61103E-008

Quantity Types

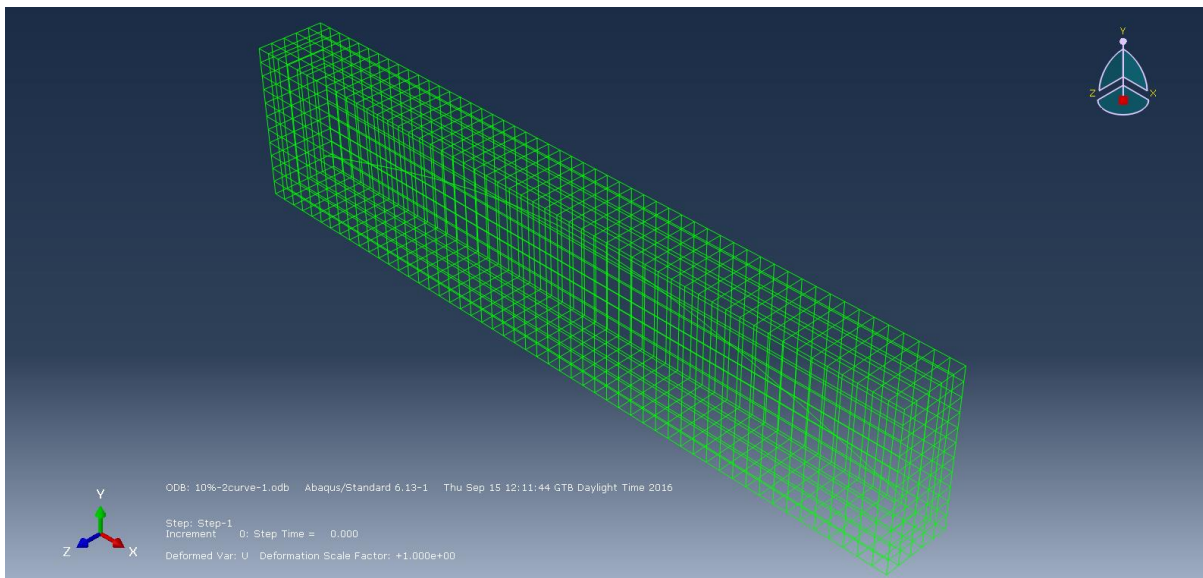
X: Time Y: Force

OK Cancel

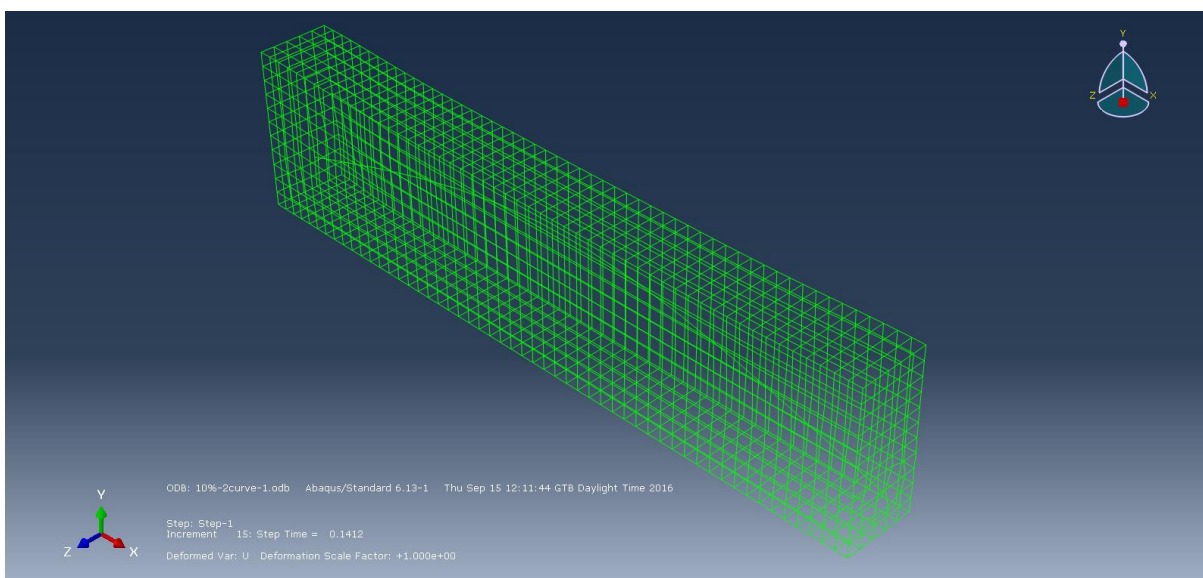
Εικόνα 4-65: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.6.3 CNT 1 καμπύλη

Στην Εικόνα 4-66 και Εικόνα 4-67 φαίνεται το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου αντίστοιχα όπου η ανάλυση έχει σταματήσει στο step time 0,1412 λόγω πλευρικού λυγισμού.

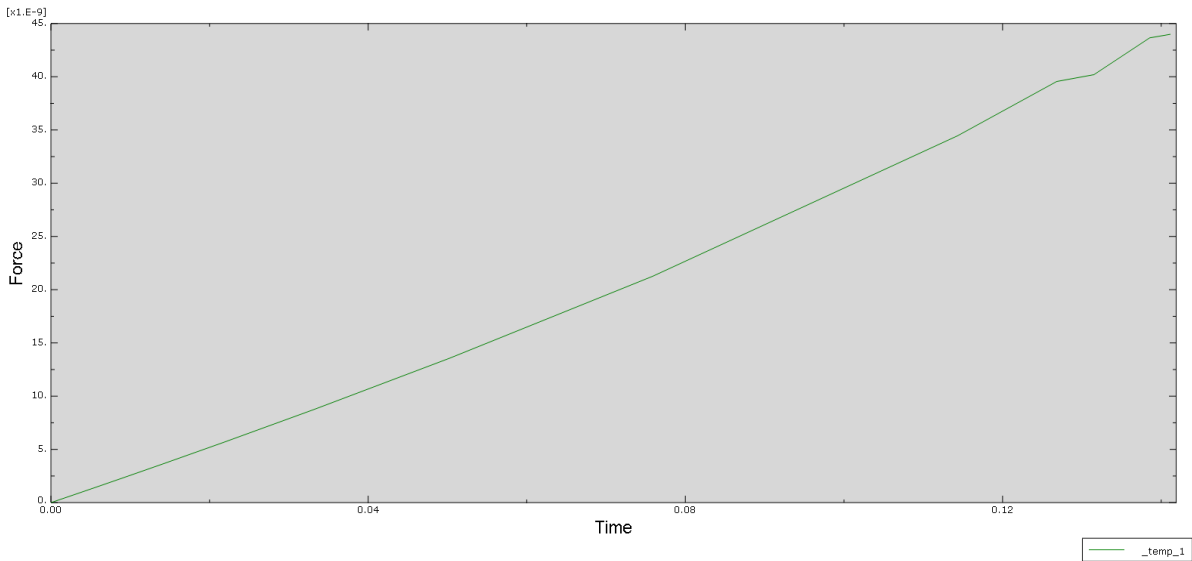


Εικόνα 4-66: Απαρμόρφωτο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 10% και CNT με 1 καμπύλη

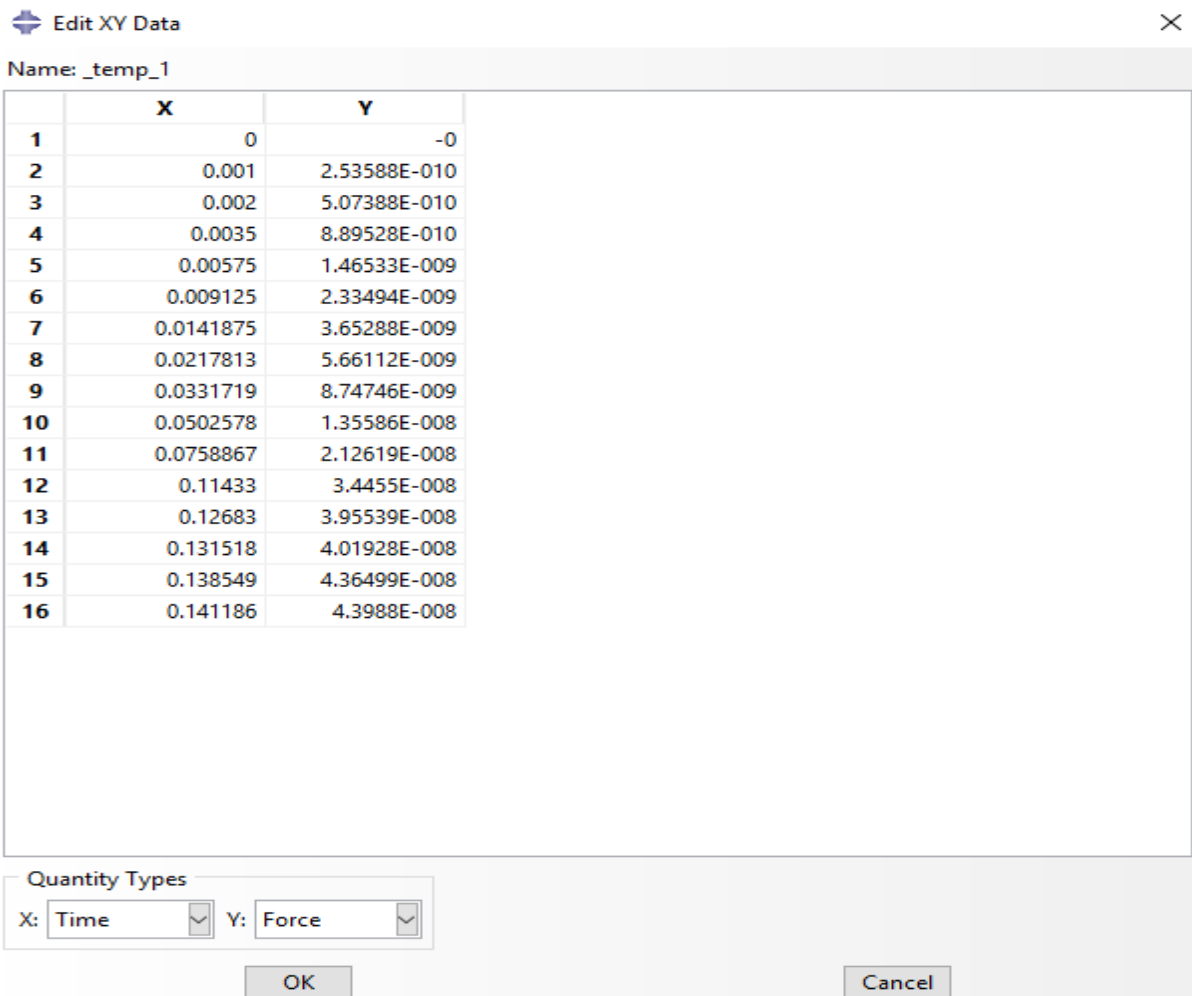


Εικόνα 4-67 Παραμορφωμένο σχήμα για ποσοστό αναλογίας όγκου 10% και CNT με 1 καμπύλη

Στην Εικόνα 4-68 και Εικόνα 4-69 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου καθώς και τα στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.

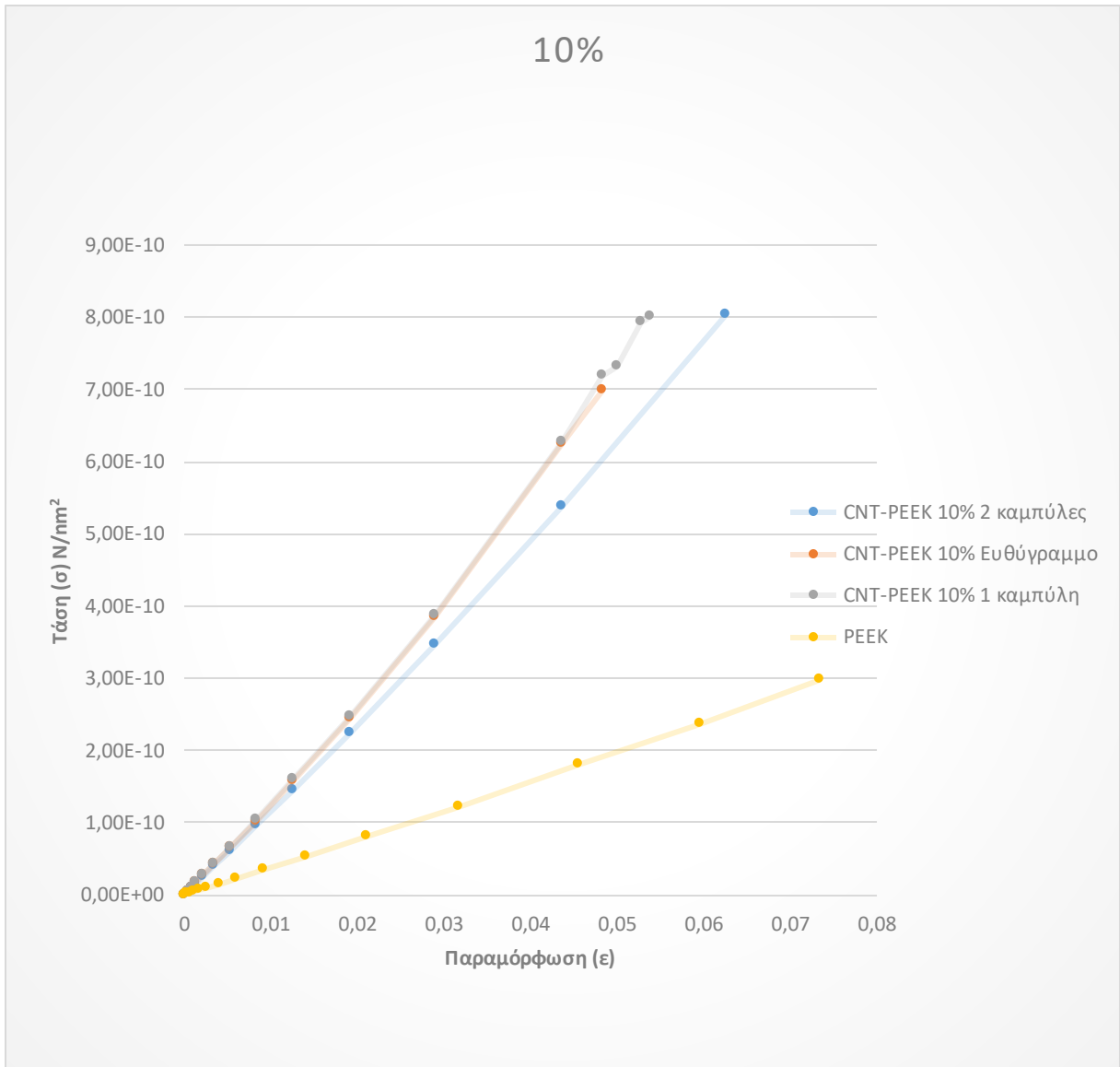


Εικόνα 4-68: Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης-χρόνου για ποσοστό αναλογίας όγκου 10%



Εικόνα 4-69: Ζεύγη χρόνου-συνισταμένης δύναμης της παραπάνω γραφικής απεικόνισης

4.2.6.4 Παρουσίαση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης

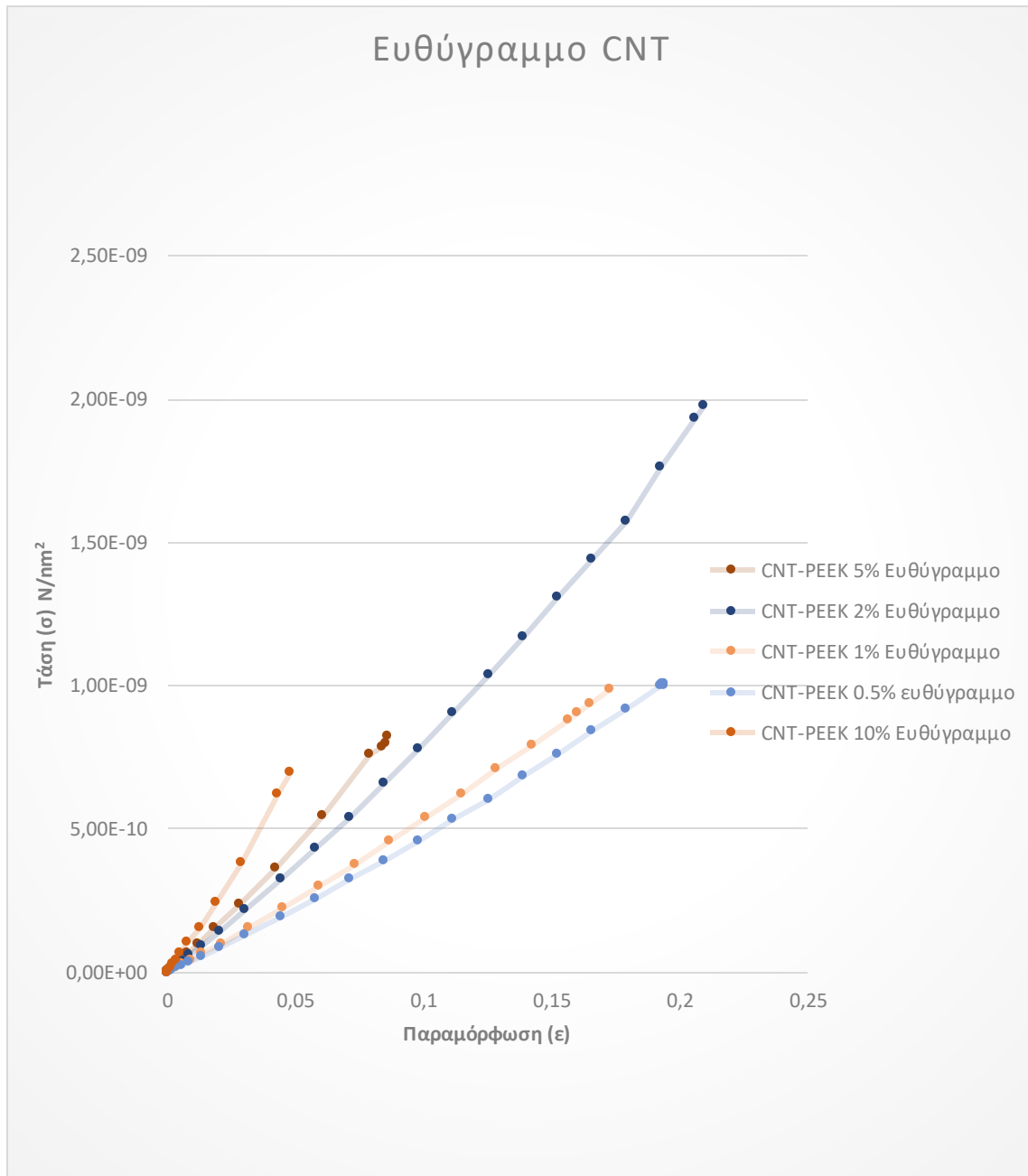


Εικόνα 4-70: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για ποσοστό αναλογίας όγκου 10% για την κάθε καμπυλότητα του CNT

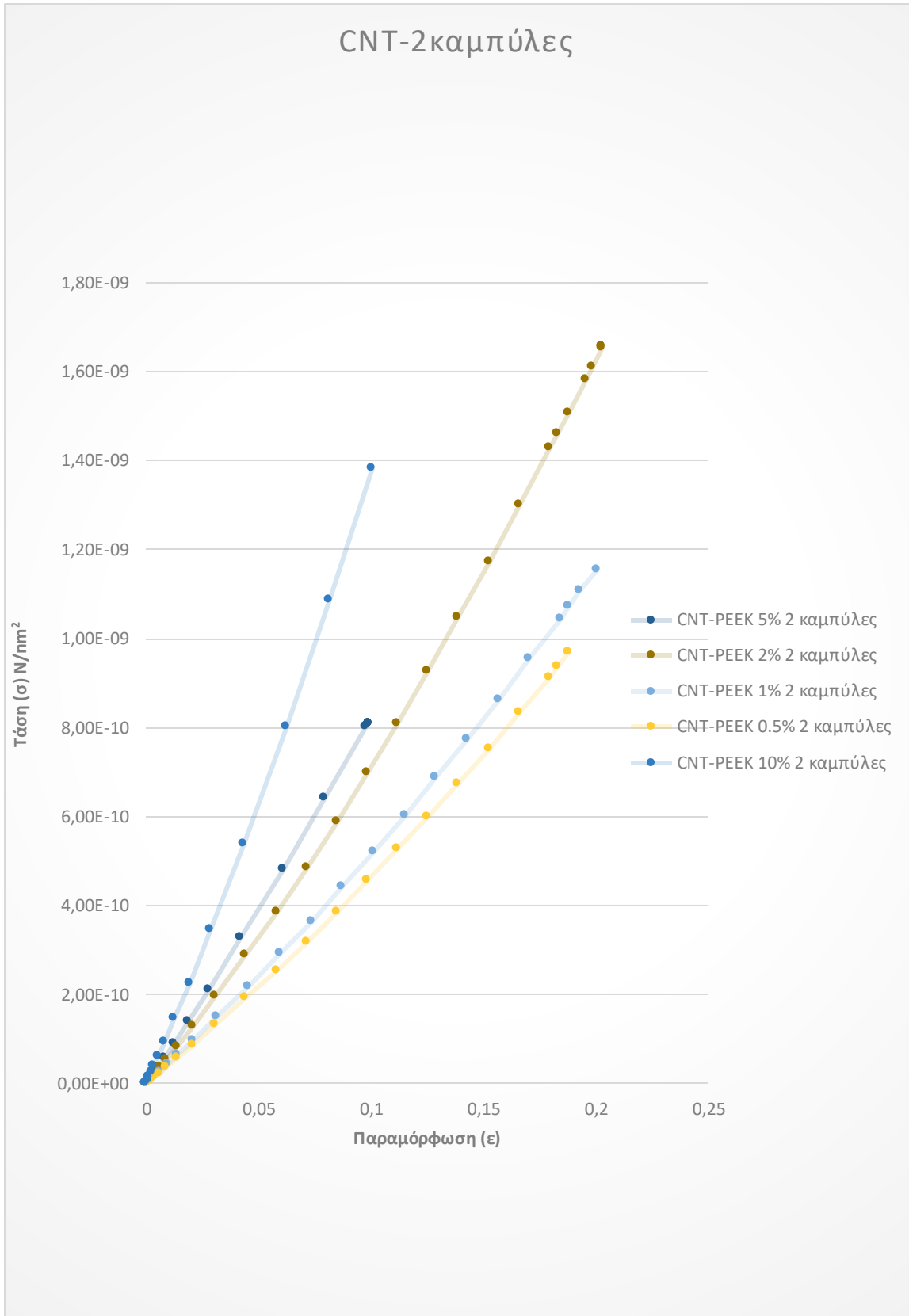
4.3 Σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών ποσοστών αναλογίας όγκου

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ο συνδυασμός των διαγραμμάτων για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας για τα διαφορετικά ποσοστά αναλογίας.

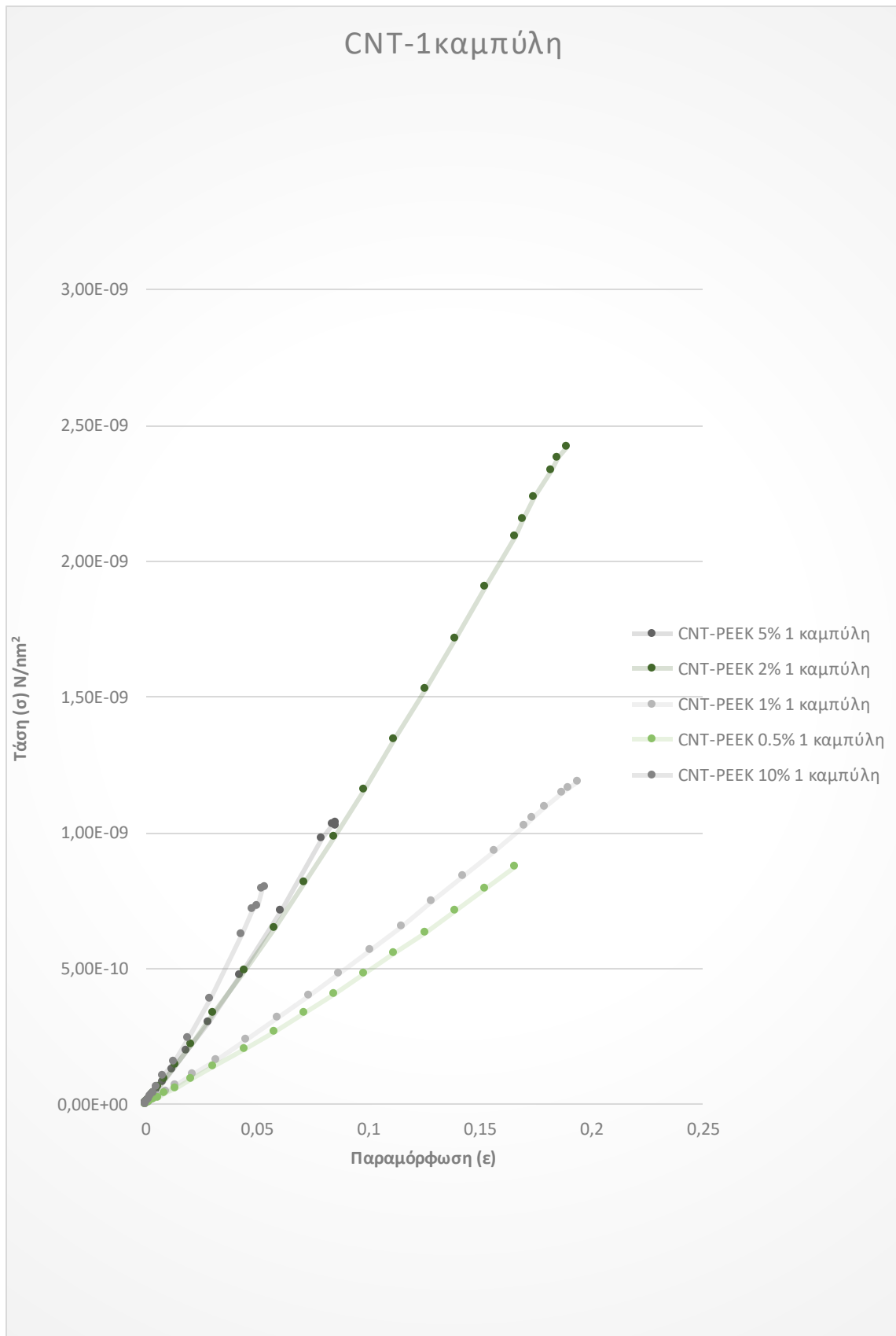
Στην Εικόνα 4-71 φαίνονται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για την περίπτωση του ευθύγραμμου CNT. Στην Εικόνα 4-72 δίνονται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για την περίπτωση του CNT 2 καμπύλων ενώ στην Εικόνα 4-73 παρουσιάζονται οι καμπύλες για την περίπτωση του CNT 1 καμπύλης. Όπως βλέπουμε από τα παρακάτω διαγράμματα, όσο αυξάνεται το ποσοστό αναλογίας από 0,5% έως 10% αυξάνεται και η δυσκαμψία του μοντέλου ανεξάρτητα του σχήματος του CNT που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 4-71: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για τα διάφορα ποσοστά αναλογίας όγκου με ευθύγραμμο CNT



Εικόνα 4-72: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για τα διάφορα ποσοστά αναλογίας όγκου με CNT 2 καμπύλων



Εικόνα 4-73: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για τα διάφορα ποσοστά αναλογίας όγκου με CNT 1 καμπύλης

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε διερεύνηση της επιρροής λόγω γεωμετρικής μη γραμμικότητας στις ιδιότητες σύνθετων υλικών ενισχυμένων με νανοσωλήνες άνθρακα. Για τη διερεύνηση αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Abaqus, με τη βοήθεια του οποίου έγινε εξαγωγή των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων για τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων αυτών έγινε η διεξαγωγή διαφόρων συμπερασμάτων.

Στη διπλωματική αυτή παρουσιάστηκαν δύο ειδών συγκρίσεις:

1. Σύγκριση μεταξύ των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων ώστε να εξεταστεί η επιρροή της μη γραμμικότητας στο κάθε ποσοστό όγκου (0.5%,1%,2%,5%,10%). Σε αυτή την περίπτωση για κάθε ποσοστό παρουσιάστηκαν σε κοινό διάγραμμα οι τρεις περιπτώσεις καμπυλότητας του νανοσωλήνα άνθρακα και συγκρίθηκαν μεταξύ τους.
2. Σύγκριση που αφορούσε τα ίδια ποσοστά όγκου και τις ίδιες περιπτώσεις μη γραμμικότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω μόνο που σε αυτή την περίπτωση εξετάστηκε η σχέση μεταξύ διαφορετικών ποσοστών αναλογίας και ίδιας καμπυλότητας του νανοσωλήνα άνθρακα. Συγκεκριμένα μπήκαν σε κοινά διαγράμματα οι περιπτώσεις όλων των ποσοστών με την κάθε μορφή νανοσωλήνα άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική.

Από τις παραπάνω συγκρίσεις προέκυψαν τα εξής ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

- Όπως φαίνεται από την πρώτη σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε όλες τις περιπτώσεις μπορεί εύκολα να βγει ένα συμπέρασμα ως προς τη διαφορά δυσκαμψίας λόγω της μη γραμμικότητας. Συγκεκριμένα έγινε η παρατήρηση ότι η καμπύλη στην οποία το σύνθετο υλικό εμφάνιζε τη μεγαλύτερη δυσκαμψία ήταν αυτή όπου ο νανοσωλήνας άνθρακα είχε τη μορφή της -1 καμπύλης-, ενώ ακολουθούσαν το μοντέλο με τον νανοσωλήνα ευθύγραμμης μορφής και ύστερα εκείνο στο οποίο ο νανοσωλήνας άνθρακα έχει τη μορφή δύο καμπύλων. Το παραπάνω αποτέλεσμα παραπάνω είναι μη αναμενόμενο καθώς λόγω καμπυλότητας του CNT περιμέναμε να έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία το μοντέλο με το ευθύγραμμο CNT και όχι αυτό με την -1 καμπύλη-. Επιπρόσθετα με τη σύγκριση των προαναφερθέντων διαγραμμάτων με το διάγραμμα της περίπτωσης όπου δεν υπάρχει νανοσωλήνας άνθρακα έχουμε το αναμενόμενο συμπέρασμα ότι στο σύνθετο υλικό η δυσκαμψία είναι σημαντικά αυξημένη όσο αυξάνονται τα ποσοστά όγκου του CNT ως προς το PEEK. Επίσης παρατηρείται ότι στην περίπτωση του ποσοστού όγκου 10% το μοντέλο με το ευθύγραμμο CNT και το μοντέλο με το CNT -1 καμπύλης- έχουν διαγράμματα που τείνουν να συμπέσουν.
- Μέσω της δεύτερης σύγκρισης προκύπτει το συμπέρασμα ότι για την ίδια καμπυλότητα όσο αυξάνεται το ποσοστό όγκου του νανοσωλήνα άνθρακα στο σύνθετο υλικό τόσο αυξάνεται η δυσκαμψία.

-
- Πέραν των παραπάνω συγκρίσεων παρατηρήθηκε ότι όταν γίνεται η μη γραμμική ανάλυση στο ΡΕΕΚ για την περίπτωση που δεν περιλαμβάνει CNT, εμφανίζεται μία μη γραμμικότητα στην καμπύλη στην οποία αυξάνεται συνεχώς η δυσκαμψία. Αυτό πρέπει να οφείλεται στην συνεχή αύξηση της επιφάνειας λόγω συμπίεσης του υλικού σύμφωνα με την οποία υπολογίζονται οι δυνάμεις και οι τάσεις.
 - Τέλος συμπεραίνεται ότι η μη γραμμική ανάλυση δεν είχε μεγάλη προσθετική αξία στην έρευνα μας, γιατί δεν παρατηρήθηκε σημαντική μεταβολή στην αλλαγή δυσκαμψίας του εκάστοτε σύνθετου υλικού όπως περιμέναμε ότι θα συμβαίνει λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς του CNT προερχόμενης εκ της καμπυλότητάς του.

6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται οι πίνακες του Excel που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να μετατραπούν τα διαγράμματα δυνάμεων-χρόνου σε διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων τα οποία και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.

6.2 Πίνακες υπολογισμών

6.2.1 ΡΕΕΚ χωρίς ύπαρξη υλικού CNT

ΡΕΕΚ					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	400	0.00E+00
0.001	0.02	0.000277778	4.15E-10	400	1.04E-12
0.002	0.04	0.000555556	8.29E-10	400	2.07E-12
0.0035	0.07	0.000972222	1.45E-09	400	3.63E-12
0.00575	0.115	0.001597222	2.39E-09	400	5.97E-12
0.009125	0.1825	0.002534722	3.79E-09	400	9.48E-12
0.014188	0.28375	0.003940972	5.91E-09	400	1.48E-11
0.021781	0.435626	0.006050362	9.09E-09	400	2.27E-11
0.033172	0.663438	0.009214422	1.39E-08	400	3.47E-11
0.050258	1.005156	0.013960522	2.12E-08	400	5.29E-11
0.075887	1.517734	0.021079642	3.22E-08	400	8.05E-11
0.11433	2.2866	0.031758332	4.91E-08	400	1.23E-10
0.16433	3.2866	0.045647222	7.17E-08	400	1.79E-10
0.21433	4.2866	0.059536112	9.50E-08	400	2.38E-10
0.26433	5.2866	0.073425222	1.19E-07	400	2.98E-10
0.31433	6.2866	0.087313892	1.44E-07	400	3.60E-10
0.36433	7.2866	0.101202782	1.70E-07	400	4.24E-10
0.41433	8.2866	0.115091672	1.96E-07	400	4.91E-10
0.46433	9.2866	0.128980562	2.24E-07	400	5.60E-10
0.51433	10.2866	0.142869442	2.52E-07	400	6.31E-10
0.56433	11.2866	0.156758332	2.82E-07	400	7.04E-10
0.61433	12.2866	0.170647222	3.12E-07	400	7.81E-10
0.66433	13.2866	0.184536112	3.44E-07	400	8.60E-10
0.71433	14.2866	0.198425222	3.77E-07	400	9.42E-10
0.76433	15.2866	0.212313892	4.11E-07	400	1.03E-09
0.81433	16.2866	0.226202782	4.46E-07	400	1.12E-09
0.86433	17.2866	0.240091672	4.83E-07	400	1.21E-09
0.91433	18.2866	0.253980562	5.21E-07	400	1.30E-09
0.96433	19.2866	0.267869442	5.61E-07	400	1.40E-09
1	20	0.277777778	5.90E-07	400	1.48E-09

6.2.2 Αναλογία όγκου 0.5%

CNT-PEEK 0.5% ευθύγραμμο					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	784	0.00E+00
0.001	0.02	0.000270270	8.80E-10	784	1.12E-12
0.002	0.04	0.000540541	1.76E-09	784	2.25E-12
0.0035	0.07	0.000945946	3.08E-09	784	3.93E-12
0.00575	0.115	0.001554054	5.07E-09	784	6.46E-12
0.00913	0.1825	0.002466216	8.05E-09	784	1.03E-11
0.01419	0.28375	0.003834459	1.25E-08	784	1.60E-11
0.02178	0.435626	0.005886838	1.93E-08	784	2.46E-11
0.03317	0.663438	0.008965378	2.95E-08	784	3.76E-11
0.05026	1.005156	0.013583189	4.49E-08	784	5.73E-11
0.07589	1.517734	0.020509919	6.83E-08	784	8.72E-11
0.11433	2.2866	0.0309	1.04E-07	784	1.33E-10
0.16433	3.2866	0.044413514	1.52E-07	784	1.94E-10
0.21433	4.2866	0.057927027	2.02E-07	784	2.57E-10
0.26433	5.2866	0.071440541	2.53E-07	784	3.23E-10
0.31433	6.2866	0.084954054	3.06E-07	784	3.90E-10
0.36433	7.2866	0.098467568	3.61E-07	784	4.60E-10
0.41433	8.2866	0.111981081	4.17E-07	784	5.32E-10
0.46433	9.2866	0.125494595	4.75E-07	784	6.06E-10
0.51433	10.2866	0.139008108	5.35E-07	784	6.82E-10
0.56433	11.2866	0.152521622	5.97E-07	784	7.61E-10
0.61433	12.2866	0.166035135	6.59E-07	784	8.41E-10
0.66433	13.2866	0.179548649	7.22E-07	784	9.21E-10
0.71433	14.2866	0.193062162	7.83E-07	784	9.98E-10
0.71746	14.3491	0.193906757	7.90E-07	784	1.01E-09
0.71775	14.35496	0.193985946	7.87E-07	784	1.00E-09
0.71819	14.36376	0.194104865	7.87E-07	784	1.00E-09
0.71835	14.36704	0.194149189	7.87E-07	784	1.00E-09

CNT-PEEK 0.5% 2 καμπύλες					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm²)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm²)
0	0	0	0	784	0.00E+00
0.001	0.02	0.00027027	8.72E-10	784	1.11E-12
0.002	0.04	0.000540541	1.74E-09	784	2.23E-12
0.0035	0.07	0.000945946	3.06E-09	784	3.90E-12
0.00575	0.115	0.001554054	5.02E-09	784	6.41E-12
0.00913	0.1825	0.002466216	7.98E-09	784	1.02E-11
0.01419	0.28375	0.003834459	1.24E-08	784	1.58E-11
0.02178	0.435626	0.005886838	1.91E-08	784	2.44E-11
0.03317	0.663438	0.008965378	2.92E-08	784	3.73E-11
0.05026	1.005156	0.013583189	4.45E-08	784	5.68E-11
0.07589	1.517734	0.020509919	6.77E-08	784	8.64E-11
0.11433	2.2866	0.0309	1.03E-07	784	1.32E-10
0.16433	3.2866	0.044413514	1.51E-07	784	1.92E-10
0.21433	4.2866	0.057927027	2.00E-07	784	2.55E-10
0.26433	5.2866	0.071440541	2.51E-07	784	3.20E-10
0.31433	6.2866	0.084954054	3.03E-07	784	3.87E-10
0.36433	7.2866	0.098467568	3.57E-07	784	4.56E-10
0.41433	8.2866	0.111981081	4.13E-07	784	5.27E-10
0.46433	9.2866	0.125494595	4.71E-07	784	6.00E-10
0.51433	10.2866	0.139008108	5.30E-07	784	6.76E-10
0.56433	11.2866	0.152521622	5.91E-07	784	7.54E-10
0.61433	12.2866	0.166035135	6.54E-07	784	8.34E-10
0.66433	13.2866	0.179548649	7.17E-07	784	9.15E-10
0.67683	13.5366	0.182927027	7.35E-07	784	9.37E-10
0.69558	13.9116	0.187994595	7.60E-07	784	9.70E-10

CNT-PEEK 0.5% 1 καμπύλη					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	784	0.00E+00
0.001	0.02	0.000270270	9.20E-10	784	1.17E-12
0.002	0.04	0.000540541	1.84E-09	784	2.35E-12
0.0035	0.07	0.000945946	3.22E-09	784	4.11E-12
0.00575	0.115	0.001554054	5.30E-09	784	6.75E-12
0.00913	0.1825	0.002466216	8.41E-09	784	1.07E-11
0.01419	0.28375	0.003834459	1.31E-08	784	1.67E-11
0.02178	0.435626	0.005886838	2.02E-08	784	2.57E-11
0.03317	0.663438	0.008965378	3.08E-08	784	3.93E-11
0.05026	1.005156	0.013583189	4.69E-08	784	5.99E-11
0.07589	1.517734	0.020509919	7.15E-08	784	9.11E-11
0.11433	2.2866	0.0309	1.09E-07	784	1.39E-10
0.16433	3.2866	0.044413514	1.59E-07	784	2.03E-10
0.21433	4.2866	0.057927027	2.11E-07	784	2.69E-10
0.26433	5.2866	0.071440541	2.64E-07	784	3.37E-10
0.31433	6.2866	0.084954054	3.20E-07	784	4.08E-10
0.36433	7.2866	0.098467568	3.77E-07	784	4.80E-10
0.41433	8.2866	0.111981081	4.35E-07	784	5.55E-10
0.46433	9.2866	0.125494595	4.96E-07	784	6.32E-10
0.51433	10.2866	0.139008108	5.58E-07	784	7.11E-10
0.56433	11.2866	0.152521622	6.20E-07	784	7.91E-10
0.61433	12.2866	0.166035135	6.87E-07	784	8.77E-10

6.2.3 Αναλογία όγκου 1%

CNT-PEEK 1% Ευθύγραμμο					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	400	0.00E+00
0.001	0.02	0.000277778	5.23E-10	400	1.31E-12
0.002	0.04	0.000555556	1.05E-09	400	2.61E-12
0.0035	0.07	0.000972222	1.83E-09	400	4.58E-12
0.00575	0.115	0.00159722	3.01E-09	400	7.52E-12
0.009125	0.1825	0.00253472	4.78E-09	400	1.20E-11
0.014188	0.28375	0.00394097	7.44E-09	400	1.86E-11
0.021781	0.435626	0.00605036	1.15E-08	400	2.86E-11
0.033172	0.663438	0.00921442	1.75E-08	400	4.38E-11
0.050258	1.005156	0.0139605	2.67E-08	400	6.67E-11
0.075887	1.517734	0.02107964	4.06E-08	400	1.02E-10
0.11433	2.2866	0.03175833	6.20E-08	400	1.55E-10
0.16433	3.2866	0.04564722	9.07E-08	400	2.27E-10
0.21433	4.2866	0.05953611	1.20E-07	400	3.01E-10
0.26433	5.2866	0.073425	1.51E-07	400	3.77E-10
0.31433	6.2866	0.08731389	1.83E-07	400	4.56E-10
0.36433	7.2866	0.10120278	2.15E-07	400	5.38E-10
0.41433	8.2866	0.11509167	2.49E-07	400	6.22E-10
0.46433	9.2866	0.12898056	2.83E-07	400	7.07E-10
0.51433	10.2866	0.14286944	3.18E-07	400	7.95E-10
0.56433	11.2866	0.15675833	3.52E-07	400	8.80E-10
0.57683	11.5366	0.16023056	3.62E-07	400	9.06E-10
0.59558	11.9116	0.16543889	3.76E-07	400	9.40E-10
0.623705	12.4741	0.17325139	3.96E-07	400	9.90E-10

CNT-PEEK 1% 2 καμπύλες					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	400	0.00E+00
0.001	0.02	0.00027778	5.09E-10	400	1.27E-12
0.002	0.04	0.00055556	1.02E-09	400	2.54E-12
0.0035	0.07	0.00097222	1.78E-09	400	4.45E-12
0.00575	0.115	0.00159722	2.93E-09	400	7.32E-12
0.009125	0.1825	0.00253472	4.65E-09	400	1.16E-11
0.014188	0.28375	0.00394097	7.24E-09	400	1.81E-11
0.021781	0.435626	0.00605036	1.11E-08	400	2.79E-11
0.033172	0.663438	0.00921442	1.70E-08	400	4.26E-11
0.050258	1.005156	0.0139605	2.60E-08	400	6.49E-11
0.075887	1.517734	0.02107964	3.95E-08	400	9.88E-11
0.11433	2.2866	0.03175833	6.03E-08	400	1.51E-10
0.16433	3.2866	0.04564722	8.81E-08	400	2.20E-10
0.21433	4.2866	0.05953611	1.17E-07	400	2.92E-10
0.26433	5.2866	0.073425	1.46E-07	400	3.66E-10
0.31433	6.2866	0.08731389	1.77E-07	400	4.43E-10
0.36433	7.2866	0.10120278	2.09E-07	400	5.22E-10
0.41433	8.2866	0.11509167	2.41E-07	400	6.03E-10
0.46433	9.2866	0.12898056	2.75E-07	400	6.88E-10
0.51433	10.2866	0.14286944	3.10E-07	400	7.75E-10
0.56433	11.2866	0.15675833	3.46E-07	400	8.64E-10
0.61433	12.2866	0.17064722	3.82E-07	400	9.55E-10
0.66433	13.2866	0.18453611	4.18E-07	400	1.05E-09
0.67683	13.5366	0.18800833	4.29E-07	400	1.07E-09
0.69558	13.9116	0.19321667	4.44E-07	400	1.11E-09
0.723705	14.4741	0.20102917	4.62E-07	400	1.16E-09

CNT-PEEK 1% 1 καμπύλη					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	400	0.00E+00
0.001	0.02	0.000277778	5.54E-10	400	1.39E-12
0.002	0.04	0.000555556	1.11E-09	400	2.77E-12
0.0035	0.07	0.000972222	1.94E-09	400	4.85E-12
0.00575	0.115	0.00159722	3.19E-09	400	7.98E-12
0.009125	0.1825	0.00253472	5.07E-09	400	1.27E-11
0.014188	0.28375	0.00394097	7.89E-09	400	1.97E-11
0.021781	0.435626	0.00605036	1.21E-08	400	3.04E-11
0.033172	0.663438	0.00921442	1.86E-08	400	4.64E-11
0.050258	1.005156	0.0139605	2.83E-08	400	7.07E-11
0.075887	1.517734	0.02107964	4.31E-08	400	1.08E-10
0.11433	2.2866	0.03175833	6.58E-08	400	1.64E-10
0.16433	3.2866	0.04564722	9.61E-08	400	2.40E-10
0.21433	4.2866	0.05953611	1.27E-07	400	3.19E-10
0.26433	5.2866	0.073425	1.60E-07	400	4.00E-10
0.31433	6.2866	0.08731389	1.93E-07	400	4.83E-10
0.36433	7.2866	0.10120278	2.28E-07	400	5.69E-10
0.41433	8.2866	0.11509167	2.63E-07	400	6.58E-10
0.46433	9.2866	0.12898056	2.99E-07	400	7.49E-10
0.51433	10.2866	0.14286944	3.37E-07	400	8.42E-10
0.56433	11.2866	0.15675833	3.73E-07	400	9.33E-10
0.61433	12.2866	0.17064722	4.10E-07	400	1.02E-09
0.62683	12.5366	0.17411944	4.23E-07	400	1.06E-09
0.64558	12.9116	0.17932778	4.38E-07	400	1.10E-09
0.673705	13.4741	0.18714028	4.58E-07	400	1.15E-09
0.684252	13.68504	0.19007	4.67E-07	400	1.17E-09
0.700072	14.00144	0.19446444	4.75E-07	400	1.19E-09

6.2.4 Αναλογία όγκου 2%

CNT-PEEK 2% Ευθύγραμμο

Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	196	0.00E+00
0.001	0.02	0.0002703	3.59E-10	196	1.83E-12
0.002	0.04	0.000540541	7.17E-10	196	3.66E-12
0.0035	0.07	0.000945946	1.26E-09	196	6.41E-12
0.00575	0.115	0.001554054	2.07E-09	196	1.05E-11
0.00913	0.1825	0.002466216	3.28E-09	196	1.67E-11
0.01419	0.28375	0.003834459	5.12E-09	196	2.61E-11
0.02178	0.435626	0.005886838	7.88E-09	196	4.02E-11
0.03317	0.663438	0.008965378	1.21E-08	196	6.15E-11
0.05026	1.005156	0.013583189	1.84E-08	196	9.39E-11
0.07589	1.517734	0.020509919	2.81E-08	196	1.43E-10
0.11433	2.2866	0.0309	4.31E-08	196	2.20E-10
0.16433	3.2866	0.044413514	6.33E-08	196	3.23E-10
0.21433	4.2866	0.057927027	8.44E-08	196	4.31E-10
0.26433	5.2866	0.071440541	1.06E-07	196	5.43E-10
0.31433	6.2866	0.084954054	1.29E-07	196	6.60E-10
0.36433	7.2866	0.098467568	1.53E-07	196	7.81E-10
0.41433	8.2866	0.111981081	1.78E-07	196	9.07E-10
0.46433	9.2866	0.125494595	2.03E-07	196	1.04E-09
0.51433	10.2866	0.139008108	2.30E-07	196	1.17E-09
0.56433	11.2866	0.152521622	2.57E-07	196	1.31E-09
0.61433	12.2866	0.166035135	2.82E-07	196	1.44E-09
0.66433	13.2866	0.179548649	3.08E-07	196	1.57E-09
0.71433	14.2866	0.193062162	3.46E-07	196	1.76E-09
0.76433	15.2866	0.206575676	3.80E-07	196	1.94E-09
0.77683	15.5366	0.209954054	3.88E-07	196	1.98E-09

CNT-PEEK 2% 2 καμπύλες					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm²)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm²)
0	0	0	0	196	0.00E+00
0.001	0.02	0.00027027	3.24E-10	196	1.65E-12
0.002	0.04	0.000540541	6.49E-10	196	3.31E-12
0.0035	0.07	0.000945946	1.14E-09	196	5.79E-12
0.00575	0.115	0.001554054	1.87E-09	196	9.53E-12
0.00913	0.1825	0.002466216	2.97E-09	196	1.51E-11
0.01419	0.28375	0.003834459	4.62E-09	196	2.36E-11
0.02178	0.435626	0.005886838	7.12E-09	196	3.63E-11
0.03317	0.663438	0.008965378	1.09E-08	196	5.56E-11
0.05026	1.005156	0.013583189	1.66E-08	196	8.48E-11
0.07589	1.517734	0.020509919	2.54E-08	196	1.29E-10
0.11433	2.2866	0.0309	3.88E-08	196	1.98E-10
0.16433	3.2866	0.044413514	5.69E-08	196	2.91E-10
0.21433	4.2866	0.057927027	7.58E-08	196	3.87E-10
0.26433	5.2866	0.071440541	9.54E-08	196	4.87E-10
0.31433	6.2866	0.084954054	1.16E-07	196	5.91E-10
0.36433	7.2866	0.098467568	1.37E-07	196	6.99E-10
0.41433	8.2866	0.111981081	1.59E-07	196	8.11E-10
0.46433	9.2866	0.125494595	1.82E-07	196	9.27E-10
0.51433	10.2866	0.139008108	2.05E-07	196	1.05E-09
0.56433	11.2866	0.152521622	2.30E-07	196	1.17E-09
0.61433	12.2866	0.166035135	2.55E-07	196	1.30E-09
0.66433	13.2866	0.179548649	2.80E-07	196	1.43E-09
0.67683	13.5366	0.182927027	2.86E-07	196	1.46E-09
0.69558	13.9116	0.187994595	2.95E-07	196	1.51E-09
0.72371	14.4741	0.195595946	3.10E-07	196	1.58E-09
0.73425	14.68504	0.198446486	3.16E-07	196	1.61E-09
0.75007	15.00144	0.202722162	3.24E-07	196	1.65E-09
0.75156	15.0311	0.203122973	3.25E-07	196	1.66E-09
0.75169	15.03388	0.203160541	3.25E-07	196	1.66E-09

CNT-PEEK 2% 1 καμπύλη					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm²)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm²)
0	0	0	0	196	0.00E+00
0.001	0.02	0.0002703	5.54E-10	196	2.83E-12
0.002	0.04	0.000540541	1.11E-09	196	5.65E-12
0.0035	0.07	0.000945946	1.94E-09	196	9.90E-12
0.00575	0.115	0.001554054	3.19E-09	196	1.63E-11
0.00913	0.1825	0.002466216	5.07E-09	196	2.59E-11
0.01419	0.28375	0.003834459	7.89E-09	196	4.03E-11
0.02178	0.435626	0.005886838	1.21E-08	196	6.20E-11
0.03317	0.663438	0.008965378	1.86E-08	196	9.48E-11
0.05026	1.005156	0.013583189	2.83E-08	196	1.44E-10
0.07589	1.517734	0.020509919	4.31E-08	196	2.20E-10
0.11433	2.2866	0.0309	6.58E-08	196	3.35E-10
0.16433	3.2866	0.044413514	9.61E-08	196	4.90E-10
0.21433	4.2866	0.057927027	1.27E-07	196	6.50E-10
0.26433	5.2866	0.071440541	1.60E-07	196	8.15E-10
0.31433	6.2866	0.084954054	1.93E-07	196	9.86E-10
0.36433	7.2866	0.098467568	2.28E-07	196	1.16E-09
0.41433	8.2866	0.111981081	2.63E-07	196	1.34E-09
0.46433	9.2866	0.125494595	2.99E-07	196	1.53E-09
0.51433	10.2866	0.139008108	3.37E-07	196	1.72E-09
0.56433	11.2866	0.152521622	3.73E-07	196	1.90E-09
0.61433	12.2866	0.166035135	4.10E-07	196	2.09E-09
0.62683	12.5366	0.169413514	4.23E-07	196	2.16E-09
0.64558	12.9116	0.174481081	4.38E-07	196	2.24E-09
0.67371	13.4741	0.182082432	4.58E-07	196	2.34E-09
0.68425	13.68504	0.184932973	4.67E-07	196	2.38E-09
0.70007	14.00144	0.189208649	4.75E-07	196	2.42E-09

6.2.5 Αναλογία όγκου 5%

CNT-PEEK 5% Ευθύγραμμο					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	108	0.00E+00
0.001	0.02	0.00037037	3.17E-10	108	2.94E-12
0.002	0.04	0.000740741	6.34E-10	108	5.87E-12
0.0035	0.07	0.001296296	1.11E-09	108	1.03E-11
0.00575	0.115	0.00212963	1.83E-09	108	1.69E-11
0.00913	0.1825	0.00337963	2.91E-09	108	2.69E-11
0.01419	0.28375	0.00525463	4.54E-09	108	4.20E-11
0.02178	0.435626	0.008067148	7.01E-09	108	6.49E-11
0.03317	0.663438	0.012285889	1.08E-08	108	9.96E-11
0.05026	1.005156	0.018614	1.65E-08	108	1.53E-10
0.07589	1.517734	0.028106185	2.54E-08	108	2.35E-10
0.11433	2.2866	0.042344444	3.93E-08	108	3.64E-10
0.16433	3.2866	0.060862963	5.90E-08	108	5.47E-10
0.21433	4.2866	0.079381481	8.20E-08	108	7.59E-10
0.22683	4.5366	0.084011111	8.51E-08	108	7.88E-10
0.23152	4.63036	0.085747407	8.64E-08	108	8.00E-10
0.23328	4.6655	0.086398148	8.92E-08	108	8.26E-10

CNT-PEEK 5% 2 καμπύλες					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	108	0.00E+00
0.001	0.02	0.00037037	2.91E-10	108	2.70E-12
0.002	0.04	0.000740741	5.83E-10	108	5.39E-12
0.0035	0.07	0.001296296	1.02E-09	108	9.45E-12
0.00575	0.115	0.00212963	1.68E-09	108	1.55E-11
0.00913	0.1825	0.00337963	2.67E-09	108	2.47E-11
0.01419	0.28375	0.00525463	4.16E-09	108	3.85E-11
0.02178	0.435626	0.008067148	6.42E-09	108	5.94E-11
0.03317	0.663438	0.012285889	9.84E-09	108	9.11E-11
0.05026	1.005156	0.018614	1.50E-08	108	1.39E-10
0.07589	1.517734	0.028106185	2.30E-08	108	2.13E-10
0.11433	2.2866	0.042344444	3.54E-08	108	3.28E-10
0.16433	3.2866	0.060862963	5.21E-08	108	4.82E-10
0.21433	4.2866	0.079381481	6.94E-08	108	6.42E-10
0.26433	5.2866	0.0979	8.67E-08	108	8.03E-10
0.26746	5.3491	0.099057407	8.76E-08	108	8.11E-10
0.26775	5.35496	0.099165926	8.75E-08	108	8.10E-10
0.26778	5.35552	0.099176296	8.75E-08	108	8.10E-10
0.26782	5.35634	0.099191481	8.75E-08	108	8.10E-10
0.26783	5.35664	0.099197037	8.74E-08	108	8.10E-10

CNT-PEEK 5% 1 καμπύλη					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm²)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm²)
0	0	0	0	108	0.00E+00
0.001	0.02	0.00037037	4.05E-10	108	3.75E-12
0.002	0.04	0.000740741	8.09E-10	108	7.49E-12
0.0035	0.07	0.001296296	1.42E-09	108	1.31E-11
0.00575	0.115	0.00212963	2.33E-09	108	2.16E-11
0.00913	0.1825	0.00337963	3.72E-09	108	3.44E-11
0.01419	0.28375	0.00525463	5.80E-09	108	5.37E-11
0.02178	0.435626	0.008067148	8.97E-09	108	8.31E-11
0.03317	0.663438	0.012285889	1.38E-08	108	1.28E-10
0.05026	1.005156	0.018614	2.12E-08	108	1.97E-10
0.07589	1.517734	0.028106185	3.28E-08	108	3.04E-10
0.11433	2.2866	0.042344444	5.11E-08	108	4.74E-10
0.16433	3.2866	0.060862963	7.73E-08	108	7.16E-10
0.21433	4.2866	0.079381481	1.06E-07	108	9.82E-10
0.22683	4.5366	0.084011111	1.12E-07	108	1.03E-09
0.23152	4.63036	0.085747407	1.12E-07	108	1.04E-09
0.23196	4.63914	0.08591	1.11E-07	108	1.03E-09

6.2.6 Αναλογία όγκου 10%

<u>CNT-PEEK 10% Ευθύγραμμα</u>					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm ²)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma = \Sigma F/A$) (N/nm ²)
0	0	0	0	55	0.00E+00
0.001	0.02	0.00038095	2.53E-10	55	4.59E-12
0.002	0.04	0.0007619	5.05E-10	55	9.18E-12
0.0035	0.07	0.00133333	8.85E-10	55	1.61E-11
0.00575	0.115	0.00219048	1.46E-09	55	2.65E-11
0.009125	0.1825	0.00347619	2.32E-09	55	4.22E-11
0.014188	0.28375	0.00540476	3.63E-09	55	6.60E-11
0.021781	0.435626	0.00829764	5.63E-09	55	1.02E-10
0.033172	0.663438	0.01263691	8.69E-09	55	1.58E-10
0.050258	1.005156	0.01914583	1.35E-08	55	2.45E-10
0.075887	1.517734	0.02890922	2.11E-08	55	3.84E-10
0.11433	2.2866	0.04355429	3.43E-08	55	6.24E-10
0.12683	2.5366	0.04831619	3.85E-08	55	7.00E-10
0.14558	2.9116	0.05545905	2.94E-08	55	5.35E-10
0.152611	3.05222	0.05813752	7.18E-08	55	1.31E-09

CNT-PEEK 10% 2 καμπύλες					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	55	0.00E+00
0.001	0.02	0.00038095	2.35E-10	55	4.28E-12
0.002	0.04	0.0007619	4.70E-10	55	8.55E-12
0.0035	0.07	0.00133333	8.24E-10	55	1.50E-11
0.00575	0.115	0.00219048	1.36E-09	55	2.47E-11
0.009125	0.1825	0.00347619	2.16E-09	55	3.93E-11
0.014188	0.28375	0.00540476	3.37E-09	55	6.13E-11
0.021781	0.435626	0.00829764	5.21E-09	55	9.48E-11
0.033172	0.663438	0.01263691	8.02E-09	55	1.46E-10
0.050258	1.005156	0.01914583	1.23E-08	55	2.24E-10
0.075887	1.517734	0.02890922	1.90E-08	55	3.46E-10
0.11433	2.2866	0.04355429	2.96E-08	55	5.37E-10
0.16433	3.2866	0.0626019	4.42E-08	55	8.04E-10
0.21433	4.2866	0.08164952	5.99E-08	55	1.09E-09
0.26433	5.2866	0.10069714	7.61E-08	55	1.38E-09

CNT-PEEK 10% 1 καμπύλη					
Χρόνος	Εξασκούμενη Μετακίνηση (δ) (nm)	ϵ	Συνισταμένη Δύναμη-Αντιδράσεις Στήριξης (ΣF) (N)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (nm^2)	Εξασκούμενες Τάσεις ($\sigma=\Sigma F/A$) (N/nm^2)
0	0	0	0	55	0.00E+00
0.001	0.02	0.00038095	2.54E-10	55	4.61E-12
0.002	0.04	0.0007619	5.07E-10	55	9.23E-12
0.0035	0.07	0.00133333	8.90E-10	55	1.62E-11
0.00575	0.115	0.00219048	1.47E-09	55	2.66E-11
0.009125	0.1825	0.00347619	2.33E-09	55	4.25E-11
0.014188	0.28375	0.00540476	3.65E-09	55	6.64E-11
0.021781	0.435626	0.00829764	5.66E-09	55	1.03E-10
0.033172	0.663438	0.01263691	8.75E-09	55	1.59E-10
0.050258	1.005156	0.01914583	1.36E-08	55	2.47E-10
0.075887	1.517734	0.02890922	2.13E-08	55	3.87E-10
0.11433	2.2866	0.04355429	3.45E-08	55	6.26E-10
0.12683	2.5366	0.04831619	3.96E-08	55	7.19E-10
0.131518	2.63036	0.0501021	4.02E-08	55	7.31E-10
0.138549	2.77098	0.05278057	4.36E-08	55	7.94E-10
0.141186	2.82372	0.05378514	4.40E-08	55	8.00E-10

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1.	D.N. Savvas , V. Papadopoulos, M. Papadrakakis, "The effect of interfacial shear strength on damping behavior of carbon nanotube reinforced composites", International Journal of Solids and Structures, Athens 2012
2.	Papadopoulos V., Savvas D., "Multiscale modeling of damping in carbon nanotube reinforced composites", HSTAM 2013, Crete island, Greece
3.	D. Savvas, "Multiscale analysis of CNT and GnP-reinforced composites using FEM/XFEM", Doctor of Philosophy, November 2014
4.	Χ. Γαντές, Βασικές έννοιες επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, Αθήνα 2015
5.	http://www.omicsonline.org/articles-images/2157-7439-3-142-g003.gif
6.	Μ. Παπαδρακάκης, Πλαστική Ανάλυση Ραβδωτών Φορέων – Σύγχρονες Μέθοδοι, Αθήνα 2013
7.	Μ. Παπαδρακάκης, "Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα, 2001.
8.	Victrex Materials Properties Guide, www.victrex.com
9.	Μ. Παπαδρακάκης, Μη γραμμικά Πεπερασμένα Στοιχεία, Αθήνα 1998
10.	Abaqus/CAE User's Manual
11.	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/FlyingThroughNanotube.png