



**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ  
ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΥΝΘΕΤΟΥ  
ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ - ΚΟΚΚΩΝ SiC ΥΠΟ  
ΚΑΜΨΗ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ  
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΤΟΥ

**ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ Α. ΤΣΙΠΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**Β. ΚΥΤΟΠΟΥΛΟΣ**

**ΑΝΑΠΛ.ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΦΛΕΒΑΡΗΣ 2018**







ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ - ΚΟΚΚΩΝ SiC ΥΠΟ ΚΑΜΨΗ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ Α. ΤΣΙΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Β. ΚΥΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23<sup>η</sup> Φεβρουαρίου 2018.

(Υπογραφή)

.....  
Β. Κυτόπουλος  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

(Υπογραφή)

.....  
Ε. Θεοτόκογλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

(Υπογραφή)

.....  
Β. Κεφαλάς  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*(Υπογραφή)*

.....

**ΤΣΙΠΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ**

Διπλωματούχος Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π.

© 2018 – All rights reserved



## Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η θεωρητική και πειραματική μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετου υλικού με μήτρα εποξειδικής ρητίνης ενισχυμένης με έγκλεισμα κόκκων καρβιδίου του πυριτίου σε κανονικές συνθήκες καθώς και σε συνθήκες υγρασίας. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την σύγκριση των πειρατικών τιμών των ελαστικών σταθερών του υλικού με τις προβλεπόμενες τιμές από διάφορα θεωρητικά μοντέλα. Για το σκοπό αυτό τα δοκίμια του σύνθετου υλικού καταπονήθηκαν με κάμψη τριών σημείων.

Τα δοκίμια προετοιμάστηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή NASI/ASTM D790-71 και η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε με τις θεωρητικές τιμές που προήλθαν από τα μοντέλα των Counto(2.1), Paul(2.2), Guth και Smallwood(2.4), Einstein(2.7), Kerner(2.6), Mooney(2.9), Eilers και Van Dyck(2.10), E.Sideridis και P.S Theocarlis(2.12) και Halpin-Tsai(2.13) για την ελαστικότητα. Για την πειραματική και θεωρητική τάση θραύσης χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα των Nielsen(2.19), Nicolais και Narkis(2.20), Schrage(2.26) και Halpin-Tsai(2.13). Έγινε ακόμη προσπάθεια να προσδιορισθεί η επίδραση του ποσοστού πλαστικοποιητή στις ιδιότητες του υλικού και έγινε και χρήση πρότυπων δοκιμίων αλουμινίου και σιδήρου για να ευρεθεί το μοντέλο που ανταποκρίνεται καλύτερα στις πειραματικές μετρήσεις.

Τα δοκίμια σε συνθήκες υγρασίας προετοιμάστηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D 570 και χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια θεωρητικά μοντέλα με σκοπό να δούμε την επίδραση του νερού στην ακρίβεια των μοντέλων. Κάνοντας χρήση του μοντέλου διάχυσης του Fick παρατηρήσαμε τον ρυθμό απορρόφησης του νερού και την συμπεριφορά του υλικού σε συνθήκες κορεσμού.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βέλτιστη επιλογή θεωρητικού μοντέλου ανάλογα με το ποσοστό πλαστικοποιητή, το ποσοστό εγκλείσματος και υγρασίας. Αυτό γίνεται εφικτό παρατηρώντας ποιο από τα παραπάνω μοντέλα προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές τιμές. Έτσι γνωρίζοντας τις συνθήκες δημιουργίας κάθε δοκιμίου εποξειδικής ρητίνης μπορούμε από πριν να έχουμε μια καλή πρόβλεψη για την συμπεριφορά του.

**Λέξεις Κλειδιά:** <<εποξειδική ρητίνη, ποσοστό, πλαστικοποιητής, υγροαπορρόφηση, μήτρα >>

## Abstract

The scope of this thesis was the theoretical and experimental study of the mechanical properties of composite materials with epoxy resin matrices reinforced with silicon carbide particles under standard conditions and under humid conditions.. This methodology includes comparison between experimental values and theoretical values based on predetermined theoretical models. For this purpose our test specimens were subjected to three point flexural test.

Our test samples were prepared under the ASTM D790-71 standard and comparisons were made versus the values given by the theoretical models of Counto(2.1), Paul(2.2), Guth and Smallwood(2.4), Einstein(2.7), Kerner(2.6), Mooney(2.9), Eilers and Van Dyck(2.10), E.Sideridis and P.S Theocaris(2.12) and Halpin-Tsai(2.13) for the elastic moduli. For the comparison of theory and experiment for stress we used the models of Nielsen(2.19), Nicolais and Narkis(2.20), Schrage(2.26) and Halpin-Tsai(2.13). We also tried to determine the effect that plasticizers have on the properties of composite materials and we used standard specimens of iron and aluminum in order to determine which model best approximates the experimental values.

The test samples we intended to use to determine the effect of humidity were made under the ASTM D 570 standard and we used the same theoretical model as before in order to check their validity under humidity. We also used the Fick diffusion law to study the rate of water absorption and the material properties under water saturation.

The results can be used in order to help us choose the better model in every combination of plasticizer content, filler quantity and humidity. This can be achieved by knowing beforehand the conditions under which each sample was made and by using the correct model we can make better estimates about its mechanical properties.

**Keywords:** << epoxy resin, percentage, plasticizer, water absorption, matrix>>



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Από τη θέση αυτή επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τους επιβλέποντες κ. Βικτ. Κυτόπουλο, αναπληρωτή του Ε.Μ.Π. και Αιμ. Σιδερίδη αναπληρωτή του Ε.Μ.Π. κατ' αρχήν για την ανάθεση του θέματος και στη συνέχεια για την βοήθεια και το ενδιαφέρον που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.



# **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ-ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ-ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

<b>1.1 ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ</b>	<b>17</b>
1.1.1 Γενικά ορισμός	17
1.1.2 Ιδιότητες υγρών εποξειδικών ρητινών	18
1.1.3 Πλαστικοποιητές για τις εποξειδικές ρητίνες	18
<b>1.2 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ</b>	<b>19</b>
1.2.1 Περιγραφή του πολυμερούς	19
1.2.2 Πρόσθετα υλικά στα πολυμερή	19
1.2.3 Τεχνολογικές απαιτήσεις για τα πρόσθετα υλικά	21
1.2.4 Μέθοδοι ενσωμάτωσης των πρόσθετων υλικών στα πολυμερή	21
<b>1.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ</b>	<b>22</b>
1.3.1 Ορισμός	22
1.3.2 Γενική περιγραφή	22
1.3.3 Παράμετροι που ορίζουν ένα σύνθετο υλικό	23
1.3.4 Κατάταξη και ταξινόμηση των σύνθετων υλικών	23
1.3.5 Διάκριση και χαρακτηριστικά των φάσεων στα υλικά	24
1.3.6 Κύριοι μηχανισμοί θραύσης	27
1.3.7 Απεικόνιση και περιγραφή των μικροφαινομένων θραύσης	30
<b>1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ</b>	<b>34</b>
1.4.1 Γενική περιγραφή	34
1.4.2 Ιδιότητες	34

1.4.3 Κοκκώδη σύνθετα υλικά	36
-----------------------------	----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

<b>2.1 ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ</b>	<b>39</b>
2.1.1 Μέτρο ελαστικότητας (E) σύνθετων υλικών	39
2.1.2 Το μοντέλο του Counto	39
2.1.3 Το μοντέλο του Paul	39
2.1.4 Μέτρα ελαστικότητας με σφαιρικά εγκλείσματα	40
2.1.5 Το μοντέλο των Sato και Furukawa	43
2.1.6 Περιορισμοί θεωρητικών μοντέλων σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών	44
2.1.7 Θεωρητική μελέτη μοντέλων για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του κοκκώδους υλικού	47
2.1.8 Διφασικό μοντέλο	47
<b>2.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ</b>	<b>49</b>
2.2.1 Τάσεις θραύσης	49
2.2.2 Μοντέλο των Sahu- Broutman	49
2.2.3 Ο νόμος των δυνάμεων ( The power law )	50
2.2.4 Η εξίσωση LEIDNER-WOODAMS	51
2.2.5 Περιορισμοί των θεωρητικών μοντέλων σχετικά με την αντοχή των σύνθετων υλικών	52
2.2.6 Παραμόρφωση θραύσης των κοκκωδών σύνθετων υλικών	54
2.2.7 Ο μηχανισμός της ενισχυτικής δράσης των εγκλεισμάτων στα πολυμερή	54

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

## **ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ**

<b>3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b>	<b>57</b>
3.1.1 Γενικά	57
3.1.2 Υλικά κατασκευής δοκιμίων	57
3.1.3 Κατασκευή και προετοιμασία των δοκιμίων	58
3.1.4 Προδιαγραφή κανονισμού NASI/ASTM D790-71	60
3.1.5 Σκοπός και περιγραφή της μεθόδου	60
3.1.6 Μηχανή δοκιμής	61
3.1.7 Στελέχη φορτίσεως και στηρίξεως	62
3.1.8 Δοκίμια	62
3.1.9 Περιγραφή λειτουργίας ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης	63
<b>3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ</b>	<b>66</b>
<b>3.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b>	<b>67</b>
3.3.1 Μέτρο ελαστικότητας	67
3.3.2 Τάση	70

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ**

<b>4.1 Υδροαπορρόφηση</b>	<b>102</b>
4.1.1 Μοντέλο διάχυσης τύπου Fick	102
<b>4.2 Προδιαγραφή ASTM D 570</b>	<b>106</b>
4.2.1 Προδιαγραφή ASTM D 570	106
4.2.2 Σκοπός	106
4.2.3 Σημασία	106
4.2.4 Συσκευές (Εξαρτήματα)	107
4.2.5 Δοκίμια	107

4.2.6 Προετοιμασία δοκιμών	108
4.2.7 Διαδικασία εμφάνισης	108
4.2.8 Επαναληπτική προετοιμασία των δοκιμών	110
4.2.9 Υπολογισμοί και έκθεση	110
4.2.10 Περιγραφή εμφάνισης δοκιμών, μετρήσεις και αποτελέσματα	111
<b>4.3 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων</b>	<b>114</b>
4.3.1 Υδροαπορροφητικότητα	114
4.3.2 Μέτρο ελαστικότητας	115
4.3.3 Τάση θραύσης	117
4.4.4 Παραμόρφωση θραύσης	118

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### Α. Εφαρμογές σύνθετων υλικών

Η ταχεία ανάπτυξη των σύνθετων υλικών και η συνεχής βελτίωση των ιδιοτήτων τους είχε σαν αποτέλεσμα την εκτεταμένη εφαρμογή τους σε πολλούς τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας. Αναφέροντας πιο συγκεκριμένα στοιχεία, θα σταθούμε περισσότερο σε εφαρμογές που αφορούν την αεροναυπηγική. Με βάση τις εφαρμογές αυτές, μπορούμε να αντιληφθούμε την πληθώρα των χρήσεων των συνθέτων υλικών σε ολόκληρη τη βιομηχανία γενικότερα.

Η βιομηχανία αεροσκαφών δείχνει έντονο ενδιαφέρον στα ινώδη και κοκκώδη σύνθετα υλικά. Η χρήση αυτών των νέων υλικών προσφέρει τη δυνατότητα μείωσης του βάρους των δομικών υλικών του αεροσκάφους σε ποσοστό 50%. Βασικά δομικά στοιχεία, όπως δοκοί δαπέδου και κολώνες προσφέρουν τη δυνατότητα ελαχιστοποίησης του βάρους, η οποία επηρεάζει άμεσα και το κόστος. Πιο σύνθετα μέρη, όπως οι επιφάνειες ελέγχου στα οποία επίσης χρησιμοποιούνται τα υλικά αυτά η ελάττωση του βάρους είναι λιγότερο αισθητή.

Η βασική ιδέα του σχεδιασμού με σύνθετα υλικά δεν είναι καινούργια στην αεροναυπηγική. Στα δομικά στοιχεία των αεροσκαφών χρησιμοποιείται μια ποικιλία συνθέτων υλικών όπως για παράδειγμα φαίνεται στον πίνακα Π. Ε. Ι .

	Ποσοστό δομικού βάρους	
	Boeing 707 Subsonic	Boeing SST Supersonic
Αλουμίνιο	72.4	78.9
Ατσάλι	15.5	8.9
Μαγνήσιο	2.7	1
Τιτάνιο	0.2	0.2
Σύνθετα υλικά	0.9	4.2
Διάφορα	8.3	6.8
ΣΥΝΟΛΟ	100%	100%

Π. Ε. Ι

Για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή το υλικό επιλέγεται έτσι ώστε να ικανοποιεί τα σχετικά σχεδιαστικά και λοιπά κριτήρια που απαιτούνται. Τα προηγμένα σύνθετα υλικά προσφέρουν στο σχεδιαστή ένα νέο εύρος υλικών με μοναδικές ιδιότητες.

Πολλά υλικά που έχουν την προαπαιτούμενη αντοχή και σκληρότητα, κατατάσσονται στην προηγμένη κατηγορία των συνθέτων και έχουν γίνει δημοφιλή τα τελευταία χρόνια ενώ προσφέρονται σε ποικιλία σχημάτων, μεγεθών και κόστους. Για παράδειγμα οι ίνες Βορίου και γραφίτη έχουν τις περισσότερες εφαρμογές λόγω του ότι διατίθενται σε πολύ λογική τιμή και προσφέρουν υψηλές τιμές αντοχής και σκληρότητας χρησιμοποιούμενες ως ενίσχυση σε σύνθετα υλικά με εποξειδική μήτρα. Το Βυρρήλιο είναι υλικό έξι φορές καλύτερο από το Αλουμίνιο στην περίπτωση που απαιτείται σκληρότητα αλλά λόγω της χαμηλής του αντοχής και ψαθυρότητας χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις που η αντοχή δεν απαιτείται ως πρωτεύων χαρακτηριστικό.

Συνοψίζοντας, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται στα εξής μέρη των επιβατηγών αεροσκαφών.

- Δοκοί δαπέδου
- Φύλλο συμπίεσης
- Επιφάνειες ελέγχου
- Μπροστινό μέρος πτερυγίου προσγείωσης
- Αεροτομές
- Φύλλα οροφής
- Καθίσματα

Άλλος ένας κλάδος της αεροναυπηγικής που χρησιμοποιούνται τα σύνθετα υλικά είναι αυτός που κατασκευάζει αεροσκάφη καθέτου απογείωσης και προσγείωσης [ VTOL. (Vertical take off and landing) ], όπως για παράδειγμα τα ελικόπτερα. Πιθανόν η πιο σημαντική χρήση των σύνθετων υλικών για τα σκάφη VTOL είναι για τον κύριο έλικα. Η δυνατότητα διαμόρφωσης κάθε αεροδυναμικού σχήματος και οι ελαστικές ιδιότητες που μπορούν να επιτευχθούν καθιστούν



επιτελική τη χρήση των συνθέτων υλικών. Άλλα μέρη όπου χρησιμοποιούμε σύνθετα υλικά σε αυτόν τον τομέα είναι το σύστημα ελέγχου και το πλαίσιο (κύριο σώμα).

Επίσης σημαντική είναι η συμβολή των σύνθετων υλικών και συγκεκριμένα αυτών με ίνες άνθρακος στην κατασκευή αθλητικών ειδών όπως για παράδειγμα ρακέτες του τένις και μαστούνια του γκολφ. Ενώ τυπικές εφαρμογές χυτών εποξειδωτικών αποτελούν οι κατασκευές ανθεκτικών σε χημικά αντλιών και σωλήνων, εργαλείων, μητρών καθώς και ηλεκτρομαγνητικών μονωτικών ειδών. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν ποδήλατα, τρίχες για πινέλα, κουπιά, καθώς και κάθε εξαρτήματα όπου το βάρος, η ακαμψία και η αντοχή είναι σημαντικά.

Ακόμη σημαντική μπορεί να θεωρηθεί η συμβολή των σύνθετων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία όπου η εξέλιξη τους θεωρείται από πολλούς όμοια με αυτήν των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Έτσι για παράδειγμα ένα από τα σημαντικότερα κατασκευαστικά μέρη του αυτοκινήτου που είναι ο άξονας μεταδόσεως της ροπής κατασκευάζεται από εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακος για την ελαχιστοποίηση του βάρους και του κόστους παραγωγής. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν συγκολλητικό πλαστικών και μεταλλικών κομματιών σε βάρκες και αυτοκίνητα, ώστε να υπάρχει τέλεια στεγανότητα.

# 1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ-ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ-ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

### 1.1. ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

#### 1.1.1. Γενικός ορισμός

Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στην κατηγορία θερμοσκληρυνόμενων ή θερμοσταθερών πολυμερών. Είναι προϊόντα ατελούς πολυμερισμού που θερμαινόμενα γίνονται μαλακά. Με την αύξηση όμως της θερμοκρασίας ο πολυμερισμός καθίσταται πλήρης και σκληραίνονται οριστικά.

Με τον όρο εποξείδιο ή εποξειδικό ονομάζουμε την χημική ομάδα που αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου ενωμένο με δύο άτομα άνθρακα τα οποία είναι ήδη ενωμένα με άτομα άλλων στοιχείων. Έτσι το μόριο τώρα μιας εποξειδικής ρητίνης σχηματίζεται από περισσότερα από ένα εποξείδια που ενώνονται υπό μορφή ευθείας ή δακτυλίου και είναι και αυτό ένα γιγάντιο μόριο πολυμερούς.

Οι εποξειδικές ρητίνες εκτός του ότι οι ίδιες είναι σύνθετα υλικά σε μικροσκοπική κλίμακα, παίζουν σπουδαίο ρόλο στον τομέα των μακροσκοπικά σύνθετων υλικών γιατί αποτελούν σχεδόν πάντα το ένα από τα δύο ή περισσότερα προϊόντα που συνδυάζονται για να δώσουν το τελικό σύνθετο υλικό, ενώ σε πάρα πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και εντελώς μόνες τους.

Οι εποξειδικές ρητίνες διακρίνονται από χαμηλού ιξώδους υγρά μέχρι υψηλού σημείου τήξεως στερεά. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες παρουσιάζουν ισχυρή αντίσταση τριβής, καθώς επίσης και πολύ καλή χημική αντίσταση, ενώ τα πλεονεκτήματα των στερεών εποξειδικών ρητινών σε σύγκριση με των υγρών είναι η μηχανική αντοχή, η εύκολη επεξεργασία τους, η υψηλή χημική αντίσταση και άριστο κολλώδες.

### **1.1.2. Ιδιότητες υγρών εποξειδικών ρητινών**

Οι υγρές εποξειδικές ρητίνες παρουσιάζουν τις παρακάτω ιδιότητες:

- Χαμηλή υγροσκοπικότητα και ικανοποιητική αντοχή στην επίδραση διαλύματος οξέων, βάσεων και πολλών οργανικών διαλυτών. Είναι υγρά με χαμηλό ιξώδες, καθώς και τα μίγματα τους με πρόσθετα (πλαστικοποιητές, σκληρυντές ) με αποτέλεσμα την εύκολη κατεργασία τους.
- Οι βασικές τους ιδιότητες μπορούν να τροποποιούνται κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής (ανάμιξη με κάποιο πρόσθετο της επιλογής μας, χρήση τροποποιητικών και συνθέσεων), κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την ποικιλία των εφαρμογών.
- Υψηλή δύναμη συγκόλλησης, στη σύγχρονη τεχνολογία πλαστικών, ιδιότητα που είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν παρατηρηθεί.
- Εύκολη επεξεργασία των ρητινών από 5°C έως 150°C, ενώ αυτό εξαρτάται και από την εκλογή του προσθέτου.
- Μικρή συστολή κατά τον πολυμερισμό κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τους. Αυτής η μικρή συστολή είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα για εποξειδικές ρητίνες.
- Εξασφαλίζουν πρόσφυση σε ξηρές και υγρές επιφάνειες, ενώ στερεοποιούνται και κάτω από την επιφάνεια ύδατος. Η πρόσφυση εξασφαλίζεται πάνω σε γνωστά δομικά υλικά, όπως σκυρόδεμα, μέταλλα, μάρμαρα, πέτρα και ξύλο.
- Παρουσιάζουν καλή χημική αντίσταση, που εξαρτάται από το πρόσθετο που χρησιμοποιείται. Συνολικά οι περισσότερες ρητίνες έχουν υψηλή αντίσταση στα καυστικά και καλή μέχρι άριστη στα οξέα.
- Συνδυάζουν υψηλή αντοχή, δεν έχουν όγκο κατά την σκλήρυνση και δεν γίνονται εύθραυστες. Είναι απόλυτα μη διαβρωτικές και είναι κατάλληλες για χρήση σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ή δομικό χάλυβα.

### **1.1.3. Πλαστικοποιητές για τις εποξειδικές ρητίνες**

Ο όρος πλαστικοποιητής στην τεχνολογία των εποξειδικών ρητινών σημαίνει:

- i. Συστατικό μεγάλου μοριακού βάρους που έστω και σε μικρή έκταση, αντιδρά με την ρητίνη κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης με αποτέλεσμα να προκαλεί ευκαμψία αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ των σημείων διασταύρωσης.
- ii. Αδρανές συστατικό μεγάλου μοριακού βάρους που προστίθεται στην ρητίνη για να προκαλέσει μηχανική πλαστικοποίηση.

Ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο προστίθενται πλαστικοποιητές στις εποξειδικές ρητίνες είναι η ελάττωση του έμφυτου εύθραυστου των εποξειδικών ρητινών. Το αποτέλεσμα της προσθήκης του πλαστικοποιητή είναι η αύξηση της δυνατότητας παραμόρφωσης και για το λόγο αυτό πολλά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Χαρακτηριστικό των πλαστικοποιημένων υλικών είναι οι υποβαθμισμένες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, η μικρή αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια, ιδιαίτερα σε διαλύτες, καθώς και σε μεγάλες θερμοκρασίες.

## **1.2. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ**

### **1.2.1. Περιγραφή του πολυμερούς**

Το μόριο ενός πολυμερούς είναι ένα μόριο μεγάλου μεγέθους (μακρομόριο) που αποτελείται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες. Οι δομικές αυτές μονάδες είναι απλά χημικά παράγωγα τα οποία προέρχονται από τα αντίστοιχα μονομερή ή αρχικά υλικά με άνοιγμα διπλού δεσμού.

Ένα πολυμερές υλικό ικανοποιεί τον ορισμό του σύνθετου υλικού, που θα δοθεί παρακάτω, σε μικροσκοπική κλίμακα γιατί αποτελείται από δομικές μονάδες προερχόμενες από αντίστοιχα μονομερή ή αρχικά υλικά που συνήθως έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες από τις δικές του.

### **1.2.2. Πρόσθετα υλικά στα πολυμερή**

Από τα πρώτα βήματα της ανάπτυξης της βιομηχανίας των πολυμερών έχει διαπιστωθεί, ότι η ενσωμάτωση πρόσθετων στοιχείων στα πολυμερή παρέχει πολύ χρήσιμα υλικά.

Ο όρος πρόσθετα υλικά αναφέρεται σε εκείνα τα υλικά που διαχέονται μέσα στο πολυμερές χωρίς να προκαλέσουν σημαντική αλλαγή στη δομή τους. Για το λόγο αυτό εξαιρούνται οι καταλύτες, τα μέσα σκλήρυνσης, που χρησιμοποιούνται στα θερμοσκληρυνόμενα συστήματα.

Η ταξινόμηση των πρόσθετων υλικών γίνεται ανάλογα με τη λειτουργία τους και όχι με κάποια χημική βάση. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται ως εξής:

\* Πρόσθετα που τροποποιούν τις μηχανικές ιδιότητες :

- (i) Πλαστικοποιητές
- (ii) Εγκλείσματα
- (iii) Μέσα δυσκαμψίας

\* Πρόσθετα για τη μείωση του κόστους :

- (i) Διαλύτες
- (ii) Κοκκώδη εγκλείσματα

\* Πρόσθετα που βοηθούν τη διεργασία παραγωγής :

- (i) Σταθεροποιητές
- (ii) Λιπαντικά
- (iii) Θιξοτροπικά μέσα

\* Πρόσθετα που τροποποιούν τις ιδιότητες επιφανείας.

\* Τροποποιητές οπτικών ιδιοτήτων.

\* Μέσα πρόληψης γήρανσης κ.α.

### **1.2.3. Τεχνολογικές απαιτήσεις για τα πρόσθετα υλικά**

#### *i) Αναμειξιμότητα και κινητικότητα των πρόσθετων υλικών*

Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται στην περίπτωση αυτή είναι οι παρακάτω:

1. Ικανοποιητική διαδικασία ενσωμάτωσης του πρόσθετου στη μήτρα του πολυμερούς.
2. Πλήρης αναμειξιμότητα και κινητικότητα ή ικανότητα διάχυσης των μορίων του πρόσθετου μέσα στη μήτρα, όταν η λειτουργία του δεν είναι σε μοριακό επίπεδο.
3. Μερική αναμειξιμότητα, όταν ασκείται στην ενδιάμεση φάση ισχυρή έλξη μεταξύ πολυμερούς και προσθέτου.

#### *ii) Τοξικότητα των πρόσθετων υλικών*

Τόσο κατά τη διάρκεια της ανάμειξης όσο και κατά τη διάρκεια της κατανάλωσης το πρόσθετο υλικό δεν πρέπει να αποτελεί κίνδυνο για την υγεία. Μεγαλύτερη προσοχή πρέπει να δώσουμε στην περίπτωση που το πολυμερές πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη συσκευασία τροφίμων ή την κατασκευή παιχνιδιών.

#### *iii) Μετανάστευση και κατανάλωση των πρόσθετων υλικών*

Κατά τη διάρκεια της διεργασίας το πρόσθετο δεν πρέπει να εξαερώνεται, ούτε να εκρέει στην επιφάνεια της μήτρας. Αυτό σημαίνει ότι το πρόσθετο υλικό πρέπει να έχει σε μεγάλες θερμοκρασίες χαμηλή τάση ατμών, ενώ δεν πρέπει να καθιζάνει ή να κρυσταλλοποιείται έξω από τη μήτρα του πολυμερούς αφήνοντας κατά αυτό τον τρόπο ένα λεπτό στρώμα από κατάλοιπα. Τέλος, το πρόσθετο δεν πρέπει να εκχειλίζεται από υγρά με τα οποία πιθανόν το πολυμερές θα έλθει σε επαφή.

### **1.2.4. Μέθοδοι ενσωμάτωσης των πρόσθετων υλικών στα πολυμερή**

#### *i) Το πολυμερές είναι αναμίξιμο με το πρόσθετο*

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλαστικοποιητές και το σύστημα που προκύπτει στην περίπτωση αυτή είναι μονοφασικό και οι αλυσίδες του πολυμερούς περιβάλλονται από τα μόρια του προσθέτου.

ii) *Το πολυμερές είναι μη αναμίξιμο με το πρόσθετο*

Στην προκειμένη περίπτωση το σύστημα είναι διαφορετικό και τα μίγματα που προκύπτουν καλούνται σύνθετα υλικά. Ειδικότερα στην περίπτωση που το πρόσθετο είναι μεταλλικό έγκλεισμα τα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλη σημασία. Όσον αφορά τα εγκλείσματα είναι πιο σκληρά από τη μήτρα και οι ιδιότητες του συστήματος βρίσκονται κάπου ανάμεσα στις ιδιότητες των δύο συστατικών.

Η ενσωμάτωση των πρόσθετων υλικών στη μήτρα του υλικού εξαρτάται από τις παρακάτω παραμέτρους :

- \* Από τη φυσική μορφή και τη συγκέντρωση του προσθέτου.
- \* Από το βαθμό διασποράς ή διαλυτότητας του προσθέτου στο τελικό μίγμα.
- \* Από τη φυσική μορφή και τα χαρακτηριστικά τήξης του πολυμερούς.
- \* Από τη φυσική μορφή του συστήματος που πρόκειται να παραχθεί.

## **1.3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

### **1.3.1. Ορισμός**

Ορίζουμε ως σύνθετο υλικό εκείνο το οποίο αποτελείται από δύο ή περισσότερα υλικά συνδεδεμένα μακροσκοπικά ή μικροσκοπικά, έτσι ώστε να προκύψει ένα πολυφασικό σύστημα με φυσικές ιδιότητες διαφορετικές από τις ιδιότητες εκείνες των αρχικών υλικών, ενώ σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να διατηρούν πολλές από τις αρχικές φυσικές ιδιότητες.

### **1.3.2. Γενική περιγραφή**

Το απλούστερο σύνθετο υλικό αποτελείται από δύο χαρακτηριστικά μέρη από τα οποία το ένα είναι η μήτρα (matrix) και το άλλο είναι το έγκλεισμα (filler).

Με τον όρο μήτρα (matrix) καλούμε τη μία ή περισσότερες συνεχείς φάσεις που αποτελούν το σύνθετο υλικό, ενώ τα υπόλοιπα υλικά που μπορεί και αυτά να

είναι ένα ή περισσότερα, θα αποτελούν αντίστοιχα μία ή περισσότερες ασυνεχείς ή διάχυτες φάσεις που λέγονται εγκλείσματα (filler).

Η μήτρα και το εγκλείσμα σε ένα σύνθετο υλικό αναλαμβάνουν διαφορετικά καθήκοντα. Έτσι η μήτρα αποτελεί το συνδετικό υλικό το οποίο συνδέει , προστατεύει και υποστηρίζει την ασυνεχή φάση στο εγκλείσμα. Επίσης η μήτρα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για το λόγο ότι μεταφέρει τις τάσεις μέσα στο σύνθετο υλικό. Το εγκλείσμα με τη σειρά του συνεισφέρει στην αντοχή και την ακαμψία του σύνθετου υλικού.

### **1.3.3. Παράμετροι που ορίζουν ένα σύνθετο υλικό**

Για την περιγραφή ενός σύνθετου υλικού θα πρέπει να αναφέρουμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- \* τη συγκέντρωση και την κατανομή συγκέντρωσης των σωματιδίων
- \* το σχήμα των σωματιδίων
- \* το μέγεθος και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων
- \* το προσανατολισμό των σωματιδίων
- \* την τοπολογία των σωματιδίων

Η συμπεριφορά ενός σύνθετου υλικού εξαρτάται σημαντικά από την περιεκτικότητα των αρχικών υλικών. Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την περιγραφή ενός σύνθετου υλικού με μία ή περισσότερες διάχυτες φάσεις μέσα σε μια συνεχή είναι:

- i) το είδος των υλικών των διάχυτων φάσεων (εγκλεισμάτων)
- ii) η γεωμετρία της διάχυτης φάσης
- iii) το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται ως μήτρα.

### **1.3.4. Κατάταξη και ταξινόμηση των σύνθετων υλικών**

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την φύση της μήτρας και των συστατικών πρόσμιξης των εγκλεισμάτων ως εξής:



1. Διάκριση ως προς την προέλευση της μήτρας:

- σύνθετα με πλαστική μήτρα.
- σύνθετα με μεταλλική μήτρα.

2. Διάκριση ως προς την μορφή του εγκλείσματος:

- έγκλεισμα με μορφή ινών
- έγκλεισμα με μορφή κόκκων
- έγκλεισμα με μορφή φύλλων

### **1.3.5. Διάκριση και χαρακτηριστικά των φάσεων στα υλικά**

#### **1.) Κύρια φάση**

Ως κύρια φάση του σύνθετου υλικού, ορίζεται αυτή που βρίσκεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% της περιεκτικότητας του συνόλου του συνθέτου.

Τα σύνθετα των οποίων η μήτρα είναι πλαστική, διακρίνονται σύμφωνα με τις φυσικές ιδιότητες της μήτρας σε:

i. *Θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά*

Τα υλικά αυτά είναι προϊόντα ατελούς πολυμερισμού που θερμαινόμενα στην αρχή γίνονται μαλακά και στη συνέχεια με την αύξηση της θερμοκρασίας σκληραίνουν οριστικά καθώς ο πολυμερισμός γίνεται πλήρης.

Οι ιδιότητες τους οφείλονται σε χημικές αντιδράσεις που προέρχονται από την δημιουργία πολυμερών μακρομορίων. Οι χημικές αντιδράσεις υποβοηθούνται από ειδικούς καταλύτες. Συνήθη θερμοσκληρυνόμενα υλικά είναι οι πολυεστερικές ρητίνες, οι ρητίνες φαινόλης-φορμαλεϋδης, μελαμίνης, ρητίνες σιλικόνης και οι εποξειδικές ρητίνες.

ii. *Ελαστομερή*

Τα ελαστομερή ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερών προσθήκης. Τα μακρομόρια βρίσκονται με την μορφή ίνας συσπειρωμένης κατά τρόπο τυχαίο που ξεδιπλώνεται κατά την έκτασή της. Με την άρση της έντασης το μόριο επανέρχεται στην αρχική του μορφή.

Με τον όρο ελαστομερές εννοούμε το υλικό που σε θερμοκρασία δωματίου, αν υποστεί εφελκυσμό τότε διπλασιάζει το αρχικό του μήκος, ενώ μετά την απομάκρυνση της τάσης επανέρχεται σχεδόν απότομα στις αρχικές του διαστάσεις. Συνήθως σαν εγκλείσματα χρησιμοποιούνται υλικά από πυριτικά άλατα, άργιλο, άνθρακα, ίνες γυαλιού, τάλκ κ.α.

### iii. *Θερμοπλαστικά*

Τα θερμοπλαστικά ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερών συμύκνωσης που λαμβάνονται από την αντίδραση δύο μορίων με δύο χαρακτηριστικές ομάδες από μονομερή με ένα διπλό δεσμό.

Είναι διαλυτά σε ορισμένους διαλύτες και κατά την θέρμανση μαλακώνουν όταν φθάσουν στην υαλώδη θερμοκρασία  $T_g$ . Αν στην συνέχεια θερμανθούν πάνω από την υαλώδη θερμοκρασία και κατόπιν ψυχθούν, τότε επανακτούν την αντοχή τους. Στις υψηλές θερμοκρασίες οι δεσμοί σπάνε και το πολυμερές αποσυντίθεται.

Τα υλικά αυτά καλύπτουν μεγάλο αριθμό προϊόντων. Χρησιμοποιούνται με κάποια μέσα ενίσχυσης, διότι από μόνα τους εμφανίζουν μεγάλο συντελεστή διαστολής και πτωχές μηχανικές όπως αντοχή σε σκληρότητα, ερπυσμό, εφελκυσμό, κρούση.

## **2). Διάχυτη ή δευτερεύουσα φάση**

Η διάχυτη ή δευτερεύουσα φάση μπορεί να διακριθεί ως εξής:

### i. *Δευτερεύουσα συνεχής φάση*

Το πιο συνηθισμένο υλικό για τον σκοπό αυτό είναι το γυαλί. Μια μέθοδος πολύ διαδεδομένη για την δημιουργία αυτής της φάσης, είναι η συνένωση πολλών φύλλων μαζί που θα αποτελέσουν ένα έλασμα, στο οποίο θα προστεθεί ρητίνη και με την επίδραση θερμότητας και πίεσης θα στερεοποιηθούν σε μια ενιαία μάζα.

Άλλα υλικά που χαρακτηρίζουν την φάση ως συνεχή λόγω της μορφολογίας τους είναι το Rayon και το πολυακρilonιτρίλιο.

Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν λεπτά φύλλα από μέταλλα, με σειρά επιλογής χαλκό, αλουμίνιο και νικέλιο σε συνδυασμό με εποξειδικές ρητίνες ή πολυεστέρες.

### ii. *Δευτερεύουσα διεσπαρμένη φάση*

Το κοινό χαρακτηριστικό για την ποικιλία των υλικών που μπορεί να χαρακτηριστεί ως διεσπαρμένη φάση είναι το παρεμφερές μέγεθος της διαμέτρου των κόκκων των υλικών. Η διάμετρος θεωρητικά δεν πρέπει να διαφέρει από 1μm.

Τα υλικά αυτά είναι συνήθως στερεές χημικά αδρανείς ουσίες που προστίθενται στο πολυμερές για την τροποποίηση των ιδιοτήτων με παράλληλη επιδίωξη τη μείωση του κόστους του συνθέτου.

Η ταξινόμηση των εγκλεισμάτων σε συνάρτηση κάποιων παραμέτρων και οι αντίστοιχες ιδιότητες τους είναι απαραίτητο να γίνουν λόγω της μεγάλης ποικιλίας τους. Οι παράμετροι αυτοί είναι λόγω της χημικής τους σύνθεσης (π.χ. ανθρακικό ασβέστιο), λόγω της προέλευσης τους (π.χ. ορυκτό, σύνθετο), της φυσικής τους μορφής (π.χ. ίνα, σφαίρα, ράβδος, δισκίο) και της λειτουργίας τους (π.χ. ενίσχυση, κόστος).

Ο πιο απλός τρόπος ταξινόμησης των εγκλεισμάτων είναι σε οργανικά και ανόργανα. Στη συνέχεια υποδιαιρούνται σε ινώδη και μη ινώδη, ανάλογα με το μέγεθος τους, τα φυσικά τους χαρακτηριστικά, την πυκνότητα τους, κ.α.

Αν και θεωρητικά ο αριθμός και το είδος των εγκλεισμάτων που είναι αποδεκτός για να ενσωματωθούν σε ένα πολυμερές είναι μεγάλος, στην πράξη περιορίζεται πάρα πολύ λόγω των προϋποθέσεων που πρέπει να ικανοποιούν.

Επιδιώκουμε τα εξής:

- Χαμηλό κόστος και εύκολη διαθεσιμότητα.
- Χαμηλή διαλυτότητα στο νερό και σε άλλους διαλύτες.
- Μέγιστη βελτίωση των επιθυμητών φυσικών ιδιοτήτων.
- Κατάλληλο ειδικό βάρος.
- Ικανοποιητική αντοχή.
- Μικρή απορρόφηση υγρασίας.
- Απαλλαγή από χημικές τοξικές ουσίες.
- Ικανότητα διαβρέξεως.
- Θερμική αντοχή.
- Μη αναφλεξιμότητα.
- Απουσία οσμής.
- Επιθυμητό χρώμα.

### **1.3.6. Κύριοι μηχανισμοί θραύσης**

Οι κύριοι μηχανισμοί θραύσης πολλών θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών, όπως είναι οι εποξειδικές ρητίνες ενισχυμένων με εγκλείσματα είναι τρείς.

Ο μηχανισμός καθήλωσης της ρωγμής ( crack-pinning )

Ο μηχανισμός διατμητικής διαρροής ( shear yielding )

Ο μηχανισμός αποϊνώσης ( crazing )

#### **1) Ο μικρομηχανισμός της καθήλωσης**

Το 1971 οι Lange και Redford παρατήρησαν ότι η ενέργεια θραύσης των θερμοσκληρυνόμενων εποξειδικών ρητινών, αυξάνει σε μεγάλο βαθμό όταν αυτές ενισχύονται με ψαθυρά εγκλείσματα, κυρίως κοκκώδους εγκλείσματος.

Παρατήρησαν ότι ο βαθμός της αύξησης της στερότητας εξαρτάται από την περιεκτικότητα και το μέγεθος του εγκλείσματος.

Οι δύο αυτοί συγγραφείς υποστήριξαν ότι η κύρια αιτία της αύξησης της στερότητας είναι το φαινόμενο της καθήλωσης της ρωγμής.

Η αύξηση της ενέργειας θραύσης στα ψαθυρά υλικά, οφείλεται στη δημιουργία μιας δευτερεύουσας ψαθυρής φάσης, που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του μετώπου της διαδεδομένης ρωγμής με τους κόκκους του εγκλείσματος που είναι διασπαρμένοι μέσα στη μήτρα.

Με τη βοήθεια της θραυσιογραφικής ανάλυσης διαπίστωσαν πως τα ίχνη που αφήνει η παραπάνω αλληλεπίδραση πάνω στην ψαθυρή μήτρα είναι "κομήτες" που σχηματίζονται στην περιοχή πίσω από το έγκλεισμα και οφείλονται στην ένωση δύο τμημάτων του μετώπου τη ρωγμής, που βρίσκονται σε δύο διαφορετικά επίπεδα θραύσης.

#### **2) Ο μηχανισμός διατμητικής διαρροής**

Εκτεταμένες διατμητικές διαρροές συνοδεύουν την εξέλιξη της θραύσης. Αποτελούν τον κύριο μηχανισμό θραύσης σε πολλά σκληρά μονοφασικά πολυμερή και η παρουσία τους είναι έντονη στα ψαθυρά πολυμερή όταν περιέχουν εγκλείσματα κυρίως ελαστικού χαρακτήρα.

Το κύριο χαρακτηριστικό του μηχανισμού της διατμητικής διαρροής είναι ότι στη μήτρα αναπτύσσονται τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις κυρίως γύρω από τα εγκλείσματα.

Πολλοί ερευνητές υποστήριξαν πως η κύρια λειτουργία του εγκλείσματος είναι να παράγει τριαξονική καταπόνηση στη μήτρα. Αυτό είναι εφικτό μόνο όταν υπάρχει καλή πρόσφυση μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη συγκέντρωση των τάσεων πραγματοποιείται στον "ισημερινό" του εγκλείσματος, έτσι αυξάνει η τοπική απελευθέρωση της έντασης και το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή την έναρξη των διατμητικών διαρροών στη μήτρα. Επίσης υποστήριξαν ότι σφαιρικά κενά, όταν στην περιοχή τους αναπτύσσεται διαξονική καταπόνηση, μπορούν να προκαλέσουν διατμητικές διαρροές, όμως αυτά δεν μπορούν να εμποδίσουν την εξέλιξη της ρωγμής, έτσι θεωρούνται λιγότερο ενεργά από τα εγκλείσματα.

Ο Haaf προσπάθησε να εξηγήσει το φαινόμενο των διατμητικών διαρροών με τη χρήση οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Παρατήρησε ότι από τα διασπαρμένα εγκλείσματα ξεκινούν μικροδιατμητικές ζώνες υπό γωνία  $55^{\circ}$ - $60^{\circ}$  ως προς τη διεύθυνση που εφαρμόζεται η καταπόνηση και το μέγεθος αυτών εξαρτάται από το μέγεθος του εγκλείσματος. Δεν μπόρεσε να ερμηνεύσει την απόκλιση της γωνίας των διατμητικών ζωνών από τη γωνία  $45^{\circ}$  όπου αναπτύσσεται η μέγιστη διατμητική τάση. Παρατήρησε επίσης τη δημιουργία κοιλοτήτων που αναπτύσσονται ευθύγραμμα κατά μήκος των διατμητικών ζωνών.

Οι Donald και Kramer μετά από μελέτες με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μικρού μεγέθους ελαστικά εγκλείσματα ευνοούν την εξέλιξη των διατμητικών διαρροών, ενώ εγκλείσματα με διάμετρο της τάξης  $1.5\mu\text{m}$  ευνοούν την ανάπτυξη του φαινομένου της αποϊνώσης

Όμως η παρουσία ψαθυρών εγκλεισμάτων οδηγεί στην ανάπτυξη διατμητικών διαρροών. Η διαφορά τους από τα ελαστικά είναι ότι η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων παρατηρείται στον "πόλο" των σφαιρικών συντεταγμένων, όταν υπάρχει καλή πρόσφυση με τη μήτρα ενώ στον "ισημερινό" στην αντίθετη περίπτωση.

### 1) Ο μικρομηχανισμός της αποϊνώσης

Το φαινόμενο της αποϊνώσης εμφανίζεται κυρίως στην ψαθυρή θραύση. Αναπτύσσεται, όταν προκαλείται σε μια περιοχή του πολυμερούς τοπική διαρροή υπό

συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και εμφανίζεται κυρίως σαν ένα μικρό ρήγμα το οποίο συγκρατείται με προσανατολισμένες ίνες.

Οι μικρομηχανισμοί της αποϊνώσης και διατμητικής διαρροής πολλές φορές συνυπάρχουν στην ψαθυρή θραύση και αναπτύσσονται κυρίως όταν μεταξύ μήτρας-εγκλείσματος υπάρχει καλή πρόσφυση.

Η πρόσφυση μήτρας-εγκλείσματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφολογία της επιφάνειας θραύσης. Όταν εποξειδική ρητίνη είναι ενισχυμένη με απαραμόρφωτα σφαιρικά εγκλείσματα τα οποία έχουν υποστεί ειδική κατεργασία ώστε να υπάρχει καλή πρόσφυση μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος, το μέτωπο της ρωγμής σταματά μπροστά από αυτά. Παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση τάσεων, στην περιοχή γύρω από το έγκλεισμα, η οποία οδηγεί στη θραύση του εγκλείσματος και στην επανέναρξη της διάδοσης του μετώπου. Το φαινόμενο αυτό απαιτεί μικρή απορρόφηση ενέργειας. Όταν τα εγκλείσματα είναι απαραμόρφωτα και δεν έχει γίνει η απαραίτητη κατεργασία για την καλή πρόσφυση τους με τη μήτρα, τότε με την ανακαίτηση της ρωγμής μπροστά από αυτά, αναπτύσσεται συγκέντρωση τάσεων μικρότερη από την προαναφερθείσα. Το μέτωπο της ρωγμής περνά πάνω από το έγκλεισμα και προκαλεί την αποκόλληση του από την μήτρα. Για την πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας απαιτείται μεγάλη απορρόφηση ενέργειας.

Τέλος, το μέγιστο ποσοστό ενέργειας απορροφάται όταν υπάρχει καλή πρόσφυση μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος και τα εγκλείσματα δέχονται παραμορφώσεις. Στην περιοχή του εγκλείσματος η συγκέντρωση των τάσεων είναι μικρότερη σε σχέση με τις δύο άλλες περιπτώσεις. Το κύριο χαρακτηριστικό της θραύσης εδώ είναι η ανάπτυξη έντονης μικρομορφολογίας στην περιοχή γύρω από το έγκλεισμα, που οφείλεται στις παραμορφώσεις που έχουν το χρόνο και την ικανότητα να αναπτυχθούν.

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται φανερό ότι στα σύνθετα υλικά η προσπάθεια βελτίωσης μιας παραμέτρου μπορεί να οδηγεί στη μείωση της τιμής μιας άλλης, όπως είναι φανερό ότι συμβαίνει με την τάση θραύσης όπου η αύξηση της οδηγεί στη μείωση της ενέργειας θραύσης.

Επομένως πρέπει κάθε φορά να γνωρίζουμε την εφαρμογή που θα έχει στο σύνθετο υλικό που παρασκευάζουμε και να επιλέγουμε τις κατάλληλες συνθήκες και υλικά που θα δίνουν τις προβλεπόμενες ιδιότητες.

### **1.3.7. Απεικόνιση και περιγραφή των μικροφαινομένων θραύσης**

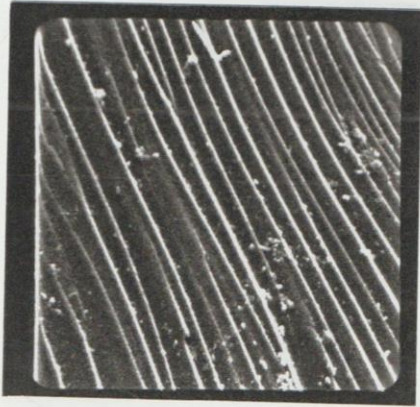
Στις φωτογραφίες F.1.1, F.1.2, F.1.3, F.1.4 παρουσιάζεται η μικροτοπογραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου σε περιεκτικότητα κόκκων 0% ( χωρίς κόκκους SiC) και πλαστικοποιητή 17%. Στις φωτογραφίες αυτές παρατηρούμε την εμφάνιση τοπικών γραμμώσεων διαφόρων ειδών. Οι λεπτές γραμμές ανακαίτισης αντιστοιχούν σε μια αλλαγή του μετώπου διάδοσης της ρωγμής προς μια άλλη διεύθυνση ενώ οι τραχείς και "ευρείες" γραμμές ανακαίτισης φανερώνουν ότι έχουμε και "αναπήδηση" της ρωγμής. Δηλαδή αλλαγή διεύθυνσης αλλά και του επιπέδου του μετώπου διάδοσης της ρωγμής. Επίσης στις φωτογραφίες F.1.3 και F.1.4 είναι φανερή η γραμμή που έχει αφήσει κάποια ατέλεια του δοκιμίου ( ίσως η ύπαρξη κάποιου κόκκου). Η γραμμή αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη και παχειά κοντά στην ατέλεια, ενώ γίνεται λιγότερο έντονη και λεπτότερη καθώς απομακρύνεται από αυτή.

Στις φωτογραφίες F.2.1, F.2.2, F.2.3, F.2.4 και F.2.5 παρουσιάζεται η μικροτοπογραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου σε περιεκτικότητα κόκκων 0% ( χωρίς κόκκους SiC) και πλαστικοποιητή 35%. Παρατηρούμε ότι σ'αυτό το δοκίμιο δεν παρουσιάζεται έντονα το φαινόμενο των γραμμών ανακαίτισης. Στη φωτογραφία F.2.1, που είναι από μια "πανοραμική" φωτογραφία, παρατηρούμε πολύ έντονη αλλαγή του επιπέδου θραύσης. Και σ'αυτό το δοκίμιο η ύπαρξη ατέλειας ( F.2.4, F.2.5) δημιουργεί παραβολή. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία δευτερευόντων ρωγμών σε περιοχές όπου έχουμε ταχεία διάδοση της κύριας ρωγμής με ταυτόχρονες μικροανακαίτισεις λόγω πολύ μικρών ατελειών. Επίσης παρατηρούμε ότι η παραβολική αυτή επιφάνεια έχει συγκεκριμένο προσανατολισμό, ο οποίος ταυτίζεται με τη φορά διάδοσης του μετώπου της ρωγμής.

Στις φωτογραφίες F.4.5, F.4.6 παρουσιάζεται η μικροτοπογραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου σε περιεκτικότητα κόκκων 30%. Και σ'αυτές τις φωτογραφίες παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή των κόκκων SiC ενώ ως προς το μέγεθος και το σχήμα παρουσιάζεται ανομοιομορφία. Στις φωτογραφίες F.4.5, F.4.6 παρατηρούμε επίσης τη δημιουργία "κομητών" λόγω της αλληλεπίδρασης του μετώπου διάδοσης της ρωγμής με τους κόκκους του εγκλείσματος που είναι διάσπαρτοι στην μήτρα.

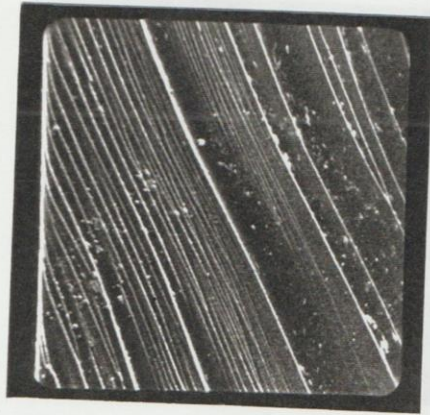


1



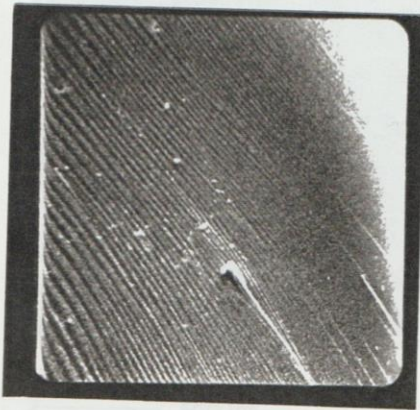
150 μm

2



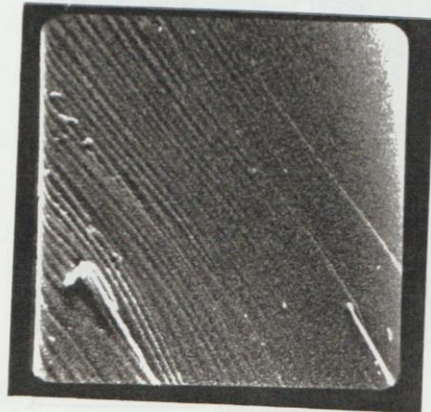
300 μm

3



300 μm

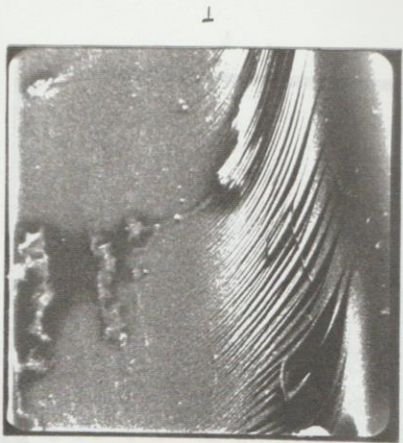
4



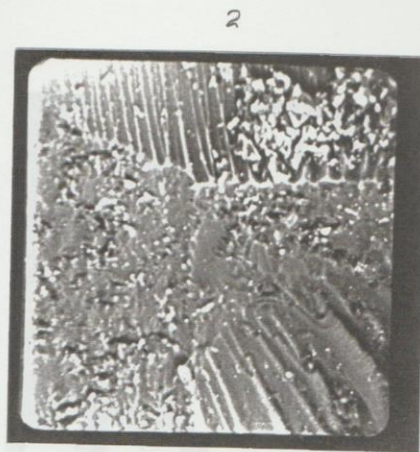
120 μm

F.1





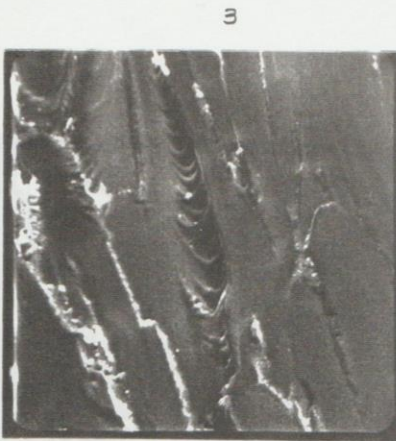
2000 μm



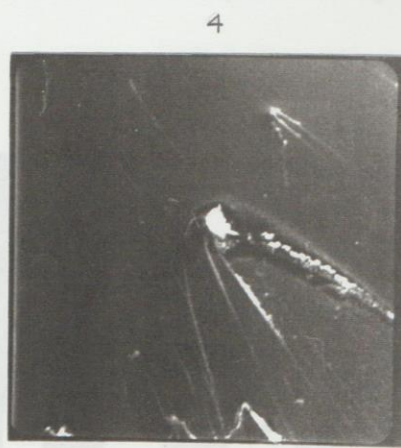
199 μm

2000 μm

200 μm



600 μm



1200 μm

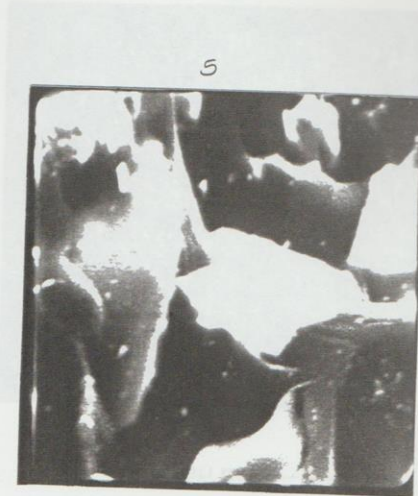


120 μm

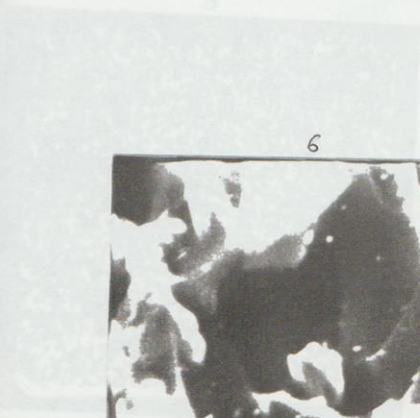
F2



2000μm



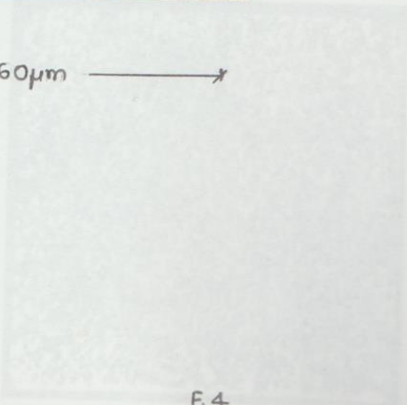
60μm



60μm



2000μm



F. 4

## **1.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

### **1.4.1. Γενική περιγραφή**

Τα εγκλείσματα είναι ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται μέσα στη μήτρα των εποξειδικών ρητινών, έχουν πολύ μικρές διαστάσεις και μορφή πούδρας-σκόνης με μέση διάμετρο 0,015m. Όσο αυξάνει η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε έγκλεισμα, τόσο αυξάνει το ιξώδες και η ρητίνη μετατρέπεται από υγρό σε μια πιο στερεή μορφή.

Τα εγκλείσματα ρυθμίζουν το ιξώδες των ρητινών, ελαττώνουν το ποσοστό συστολής και το συντελεστή θερμικής διαστολής, ενώ ταυτόχρονα χρωματίζουν το σύνθετο. Τα εγκλείσματα πρέπει να είναι από χημικής απόψεως ουδέτερα ή ελαφρά βασικά και να μην αντιδρούν με την ρητίνη ή το μέσο σκλήρυνσης.

Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα των εγκλεισμάτων είναι ότι ελαττώνουν το κόστος του σύνθετου με παράλληλο συνδυασμό καλύτερων ποιοτικών ιδιοτήτων.

Για καλύτερα αποτελέσματα, τα εγκλείσματα πρέπει να θερμαίνονται για την απομάκρυνση της υγρασίας και του αέρα που τυχόν απορροφήθηκε και μετά να ενσωματώνονται στη ρητίνη. Επίσης είναι σκόπιμη η χρησιμοποίηση κάποιου ειδικού μηχανήματος για πλήρη ανάμειξη.

### **1.4.2. Ιδιότητες**

- *Συμπεριφορά σε εφελκυσμό*

Η παρουσία εγκλεισμάτων στις ρητίνες, γενικά αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας σε αυτές, ενώ αντίθετα η παραμόρφωση θραύσης ελαττώνεται και η μεταβολή αυτή είναι ανάλογη με την περιεκτικότητα της σε έγκλεισμα. Αυτό ισχύει για μετρήσεις σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

- *Συστολή*

Η συστολή κατά τη διάρκεια σκλήρυνσης της ρητίνης ελαττώνεται ανάλογα με την αύξηση της περιεκτικότητας σε έγκλεισμα του σύνθετου υλικού. Αυτό οφείλεται στο ότι η ρητίνη αντικαθίσταται τοπικά από υλικό που δεν εμφανίζει μεταβολή στις διαστάσεις του, σε αντίθεση με την καθαρή ρητίνη.

- *Αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια και διάβρωση*

Μερικά εγκλείσματα όπως π.χ. το ανθρακικό ασβέστιο μειώνουν την αντοχή των ρητινών σε οξέα ενώ άλλα όπως το αλουμίνιο μειώνουν αυτή σε υγρασία. Τα εγκλείσματα γενικά μειώνουν την ταχύτητα διάχυσης του νερού στα σύνθετα υλικά. Τα εγκλείσματα επίσης συμμετέχουν στην διάβρωση των πολυμερών στην επαφή τους με τα μέταλλα.

Ιόντα που υπάρχουν στη στερεοποιημένη μήτρα μπορούν να μεταφέρουν γαλβανικά ρεύματα και να ενισχύσουν τη διάβρωση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της αγωγιμότητας του συνθέτου, λόγω της ικανότητας των εγκλεισμάτων να απελευθερώνουν ιόντα.

- *Ειδική πυκνότητα*

Τα εγκλείσματα που στην πλειοψηφία τους έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από την ρητίνη, αυξάνουν την πυκνότητα των συνθέτων υλικών ανάλογα με την κατ' όγκο περιεκτικότητά τους. Έτσι η παρουσία εγκλεισμάτων μειώνει αισθητά το κόστος του σύνθετου υλικού.

- *Ιξώδες*

Τα εγκλείσματα αυξάνουν το ιξώδες των εποξειδικών ρητινών. Η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη με ινώδη και μικρότερη με κοκκώδη εγκλείσματα.

- *Συντελεστής θερμικής διαστολής*

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής της στερεοποιημένης εποξειδικής ρητίνης ελαττώνεται με την αύξηση της κατ' όγκο συγκέντρωσης σε εγκλείσματα. Η ελάττωση δεν είναι γραμμική.

- *Πρόσφυση*

Τα εγκλείσματα ελαττώνουν το βαθμό συστολής και έτσι αυξάνουν την ικανότητα πρόσφυσης των εποξειδικών ρητινών αποτελεσματικά.

- *Θερμική σταθερότητα*

Ενισχύεται με την παρουσία εγκλεισμάτων. Με τον όρο θερμική σταθερότητα, εννοούμε την κατάσταση του συνθέτου όταν δεν παρατηρούνται αλλοιώσεις στη δομή του συναρτήσει της θερμοκρασίας.

- *Θερμική αγωγιμότητα*

Τα εγκλείσματα αυξάνουν την θερμική αγωγιμότητα των ρητινών αν και σε μεγάλες περιεκτικότητες σε έγκλεισμα αυξάνουν την παρουσία φυσαλίδων αέρα μέσα στο σύνθετο, που ως γνωστόν αποτελούν θερμομονωτικά σώματα. Περισσότερο αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα στην περίπτωση των μεταλλικών ινών, συγκριτικά με τα κοκκώδη μεταλλικά εγκλείσματα.

- *Αντοχή στη συμπίεση*

Τα κοκκώδη εγκλείσματα αυξάνουν την αντοχή σε συμπίεση λόγω της δυσκαμψίας που προκαλούν.

- *Συμπεριφορά στην κρούση*

Τα κοκκώδη εγκλείσματα επηρεάζουν την αντοχή σε κρούση των σκληρυνόμενων εποξειδικών ρητινών σε βαθμό που ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του εγκλείσματος, τον τύπο της ρητίνης και το είδος της δοκιμής κρούσης. Γενικά τόσο τα κοκκώδη όσο και ινώδη εγκλείσματα ενισχύουν την αντοχή των ρητινών σε κρούση.

- *Συμπεριφορά στην κάμψη*

Τα κοκκώδη εγκλείσματα γενικά ελαττώνουν την αντοχή στην κάμψη και αυξάνουν το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη.

- *Σκληρότητα επιφανείας-Αντίσταση στην τριβή*

Τα εγκλείσματα αυξάνουν την σκληρότητα της επιφάνειας του συνθέτου και την αντίσταση τριβής.

### **1.4.3. Κοκκώδη σύνθετα υλικά (Particulate composites)**

Τα κοκκώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από κόκκους ενός υλικού μέσα σε μήτρα ενός άλλου. Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικοί ή όχι, όπως και η μήτρα. Έτσι, από αυτή την άποψη, έχουμε τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς.

#### *I. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος εντός μη μεταλλικής μήτρας*

Παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το σκυρόδεμα (όχι το οπλισμένο). Το σκυρόδεμα αποτελείται από κόκκους άμμου και πέτρας δεμένους με ένα μίγμα τσιμέντου και νερού, το οποίο έχει αντιδράσει χημικά και έχει σκληρύνει. Η αντοχή του σκυροδέματος αποδίδεται στην ύπαρξη κόκκων πέτρας.

Επίσης, φλούδες μη μεταλλικών υλικών, όπως η μίκα ή το γυαλί, μπορούν να αποτελέσουν το κοκκώδες έγκλεισμα μιας γυάλινης ή πλαστικής μήτρας αντίστοιχα και με τον τρόπο αυτό να προκύψει ένα σύνθετο υλικό αυτού του είδους.

## *II. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος εντός μη μεταλλικής μήτρας*

Πολλά υλικά αυτού του είδους έχουν κατασκευασθεί με σκοπό την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, τη μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και τη μείωση της φθοράς της μήτρας. Παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι έγκλεισμα χαλκού μέσα σε εποξειδική ρητίνη, που αυξάνει κατά πολύ την ηλεκτρική αγωγιμότητα αυτής. Επίσης, είναι συνήθη τα σύνθετα υλικά με έγκλεισμα από μέταλλο υπό μορφή φλούδας.

## *III. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος εντός μεταλλικής μήτρας.*

Τα υλικά αυτού του τύπου δεν είναι κράματα. Το μεταλλικό έγκλεισμα έχει μορφή κόκκων μέσα στη μήτρα και δεν είναι διαλυμένο μέσα σε αυτήν, όπως είναι στα κράματα.

Σαν παράδειγμα για αυτήν την κατηγορία να αναφέρουμε τους κόκκους μολύβδου εντός κραμάτων χαλκού και χάλυβα, που σκοπό έχουν τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του κράματος στις εργαλειομηχανές.

## *IV. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος εντός μεταλλικής μήτρας.*

Μη μεταλλικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μορφή κοκκώδους εγκλείσματος μέσα σε μεταλλική μήτρα. Τα προκύπτοντα υλικά ονομάζονται κεραμομέταλλα. Τα κεραμομέταλλα μπορούν να είναι δύο ειδών ανάλογα με το έγκλεισμα. Το πρώτο είδος είναι κεραμομέταλλα με κόκκους οξειδίου ενός μετάλλου



πάνω σε μεταλλική μήτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εργαλείων και σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπου η αντίσταση στη διάβρωση είναι σημαντική. Το άλλο είδος είναι τα κεραμομέταλλα με κόκκους καρβιδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα. Έτσι, το καρβίδιο του βολφραμίου μέσα σε μήτρα κοβαλτίου χρησιμοποιείται σε τμήματα μηχανών τα οποία απαιτούν μεγάλη αντοχή στην οξείδωση και τη διάβρωση, ενώ έχει συντελεστή θερμικής διαστολής παραπλήσιο με αυτόν του χάλυβα και έτσι είναι κατάλληλο για χρήσεις σε βαλβίδες κλπ. Επίσης το καρβίδιο του τιτανίου μέσα σε μήτρα νικελίου ή κοβαλτίου χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, όπως π.χ. σε διάφορα μέρη στροβιλομηχανών. Τέλος τα κεραμομέταλλα χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες ως καύσιμα.

## 2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### 2.1. ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ

##### 2.1.1. Μέτρο ελαστικότητας (E) κοκκωδών σύνθετων υλικών

Από πολλούς ερευνητές αναπτύχθηκαν διάφορα θεωρητικά μοντέλα για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας. Τα μοντέλα αυτά και οι εξισώσεις που προέκυψαν, είναι άλλοτε απλά και άλλοτε πολύπλοκα ανάλογα με τις παραδοχές που ο καθένας χρησιμοποίησε.

##### 2.1.2. Το μοντέλο του Counto

Το μοντέλο για τα σύνθετα υλικά δύο φάσεων το οποίο προτάθηκε από τον Counto [7] προϋποθέτει τέλεια πρόσφυση ανάμεσα στον κόκκο και τη μήτρα. Το μέτρο του σύνθετου υλικού  $E_C$ , δίνεται από την σχέση:

$$\frac{1}{E_C} = \frac{1 - U_f^{1/2}}{E_m} + \frac{1}{\left(1 - U_f^{\frac{1}{2}}\right) U_f^{1/2} E_m + E_f} \quad (2.1)$$

Αυτό το μοντέλο προβλέπει τα μέτρα ελαστικότητας και συμφωνεί με μια ευρεία σειρά από πειραματικά δεδομένα, κυρίως για υλικά από σκυρόδεμα.

##### 2.1.3. Το μοντέλο του Paul

Στην προσεγγιστική λύση του Paul [8] τα συστατικά (οι φάσεις) του συνθέτου υλικού, υποτίθεται ότι είναι στην κατάσταση μακροσκοπικώς ομοιογενούς τάσης. Η πρόσφυση υποτίθεται ότι υπάρχει στην ενδιάμεση επιφάνεια ενός κυβικού εγκλείσματος, το οποίο είναι μέσα σε κυβική μήτρα. Όταν μια ομοιόμορφη τάση εφαρμοσθεί στο σύνορο, το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού δίνεται από τη σχέση:



$$E_C = E_m \left[ \frac{1 + (m-1)U_f^{2/3}}{1 + (m-1)(U_f^{2/3} - U_f)} \right] \quad (2.2)$$

όπου:  $m = E_f / E_m$

#### **2.1.4. Μέτρα ελαστικότητας με σφαιρικά εγκλείσματα**

Τα σφαιρικά εγκλείσματα είναι συνήθως αρκετά μεγάλα, έτσι ώστε η μέση απόσταση μεταξύ τους, ακόμα και για μεγάλες περιεκτικότητες, είναι μεγάλη αν συγκριθεί με τις τιμές της τετραγωνικής ρίζας της απόστασης μεταξύ των άκρων των μακρομορίων του πολυμερούς. Επίσης τα σωματίδια είναι τόσο απομακρυσμένα μεταξύ τους, που δεν μπορούν να συνδέονται μαζί μέσω μιας απλής αλυσίδας πολυμερούς [9].

Για τα σύνθετα υλικά όπου το πάχος του στρώματος του πολυμερούς μεταξύ των σωματιδίων είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του οριακού στρώματος, η επίδραση του οριακού στρώματος στις διάφορες ιδιότητες μπορεί να αμεληθεί. Με βάση αυτή την υπόθεση έχουν προταθεί κατά καιρούς πολλές εξισώσεις που να περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά συνθέτων υλικών με σφαιρικά εγκλείσματα.

Πρώτος που ασχολήθηκε με το θέμα ήταν ο Einstein [10], όταν το 1906 έκανε παρατηρήσεις στο ιξώδες αιωρήματος στερεών σφαιρών διασπαρμένων σε κάποιο Νευτώνιο υγρό και κατέληξε στην εξίσωση:

$$E_C = E_m (1 + 2.5U_f) \quad (2.3)$$

Η εξίσωση αυτή ισχύει για μικρές περιεκτικότητες σε εγκλείσμα και για περιπτώσεις πλήρους συνοχής μεταξύ εγκλείσματος και μήτρας. Με τον όρο *τέλεια συνοχή* εννοούμε ότι δεν υπάρχει σχετική κίνηση μήτρας-σωματιδίων κατά τη διάρκεια φόρτισης μέχρι κάποιου ορίου πάνω από το οποίο σπάει ο δεσμός μήτρας-σωματιδίου.

Προϋπόθεση για την παραπάνω εξίσωση είναι ότι το εγκλείσμα είναι σκληρότερο υλικό από την μήτρα. Ο όγκος του εγκλείσματος είναι η σημαντική παράμετρος για την εξίσωση και όχι το βάρος του. Τέλος το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζει την ενισχυτική τους δράση.

Συνέχισαν την έρευνα οι Guth [11] και Smallwood [12] προτείνοντας την εξίσωση:

$$E_C = E_m (1 + 2.5U_f + 14.1U_f^2) \quad (2.4)$$

Αργότερα συνέχισε ο Kerner [13] με τη σχέση:

$$\frac{E_C}{E_m} = \left[ \frac{\frac{U_f G_f}{(1-5\nu_m)G_m + (8-10\nu_m)G_f} + \frac{U_m}{15(1-\nu_m)}}{\frac{U_f G_m}{(1-5\nu_m)G_m + (8-10\nu_m)G_f} + \frac{U_m}{15(1-\nu_m)}} \right] \quad (2.5)$$

- με G το μέτρο διάτμησης
- και ν ο λόγος Poisson.

Για εγκλείσματα πιο σκληρά από τη μήτρα η εξίσωση (2.5) απλοποιείται ως εξής:

$$\frac{E_C}{E_m} = 1 + \frac{U_f}{U_m} \left[ \frac{15(1-\nu_m)}{(8-10\nu_m)} \right] \quad (2.6)$$

Στην πραγματικότητα δεν ισχύει η προϋπόθεση συνοχής μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος όπως έχει ήδη προαναφερθεί σε παραπάνω παράγραφο. Τότε η πραγματική δράση του εγκλείσματος είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά και σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να ελαττώσει, παρά να αυξήσει το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου.

Ο Einstein, κατά τις παρατηρήσεις που έκανε το 1906 και αναφέρονται παραπάνω, κατέληξε πως όταν μεταξύ του αιωρήματος στερεών σφαιρών και του Νευτώνιου υγρού δεν υπάρχει τέλεια συνοχή ισχύει η εξίσωση:

$$E_C = E_m (1 + U_f) \quad (2.7)$$

Εάν τα σωματίδια είναι φυσαλίδες αέρα ή βρίσκονται μέσα σε κενά τότε η εξίσωση Kerner γράφεται:

$$\frac{1}{E_C} = \frac{1}{E_m} + \frac{U_f}{U_m} \left[ \frac{15(1-\nu_m)}{(7-5\nu_m)} \right] \quad (2.8)$$

Μια βασική παραδοχή για τις παραπάνω θεωρίες είναι ότι τα εγκλείσματα δεν σχηματίζουν συσσωματώματα και αυτό οφείλεται στο ότι τα συσσωματώματα δημιουργούν κοιλότητες αέρα και έτσι ο φαινόμενος όγκος του εγκλείσματος είναι μεγαλύτερος του πραγματικού.

Για την περίπτωση ενάρξεως των συσσωματωμάτων ο *Mooney* [14] διετύπωσε την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{E_C}{E_m} = \exp\left(\frac{25U_f}{1-SU_f}\right) \quad (2.9)$$

όπου

$$S = \frac{\text{φαινόμενος όγκος του εγκλείσματος}}{\text{πραγματικός όγκος του εγκλείσματος}}$$

Η ελάχιστη τιμή του  $S$  είναι η μονάδα. Σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις το  $S$  κυμαίνεται από 1.2 μέχρι 2.

Μια άλλη θεωρία που προτάθηκε από τους *Eilers* και *Van Dyck* [15] περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{E_C}{E_m} = 1 + \frac{kU_f}{1-SU_f} \quad (2.10)$$

όπου:

- $k=1.25$
- $S=1.20$

Στο εργαστήριο Αντοχής Υλικών έχει γίνει μελέτη [16], πάνω στο βαθμό πρόσφυσης μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος. Με βάση τον ορισμό της ενδιάμεσης φάσης που έχει μελετηθεί προτείνεται το ακόλουθο μοντέλο για την περίπτωση των κοκκωδών εγκλεισμάτων. Ο δείκτης  $i$ , αναφέρεται στην ενδιάμεση φάση και  $k$ , είναι μια παράμετρος που περιγράφει το βαθμό σύνδεσης μεταξύ εγκλείσματος και ενδιάμεσης φάσης:

$$E_C = E_f U_f k + E_m U_m + E_i U_i \quad (2.11)$$

Καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος έγινε σε μελέτη του καθηγητή *Π.Σ Θεοχάρη* [17,18], όπου προτείνεται μια σειρά μοντέλων στα οποία θεωρείται ότι αναπτύσσεται μια τρίτη ψευδοφάση μήτρας και εγκλεισμάτων στη διάρκεια του πολυμερισμού της μήτρας.

Επίσης μια άλλη εξίσωση για το μέτρο ελαστικότητας συνθέτου υλικού με εγκλείσματα πρότειναν αργότερα οι *E.Sideridis*, *P.S Theocaris* [19]:

$$\frac{2(1-2\nu_c)}{E_c} = \frac{2\lambda^2 U_f}{E_f} + \frac{1}{E_m} \frac{U_f(1-\lambda)^2(1+\nu_m)+2(\lambda U_f-1)^2(1-2\nu_m)}{1-U_f} \quad (2.12)$$

- όπου  $\nu_c$  δίνεται από την σχέση  $\frac{1}{\nu_c} = \frac{U_f}{\nu_f} + \frac{U_m}{\nu_m}$
- και  $\lambda$  από  $\lambda = \left[ \frac{3(1-\nu_m)E_f}{[2U_f(1-2\nu_m)+1+\nu_m]E_f+2(1-2\nu_f)(1-U_f)E_m} \right]$

Αναφέρουμε ακόμη το μοντέλο Halpin-Tsai. Το μοντέλο αυτό ανήκει σε μια οικογένεια εμπειρικών σχέσεων οι οποίες με την βοήθεια ενός παράγοντα  $\zeta$ , που αλλάζει ανάλογα με το σχήμα του εγκλείσματος, εκφράζουν την σχέση της  $P_c$  ελαστικής ιδιότητας του συνθέτου υλικού με την αντίστοιχη ελαστική ιδιότητα  $P_m$  της μήτρας. Η σχέση είναι:

$$\frac{P_c}{P_m} = \left( \frac{1+\zeta\eta U_f}{1-\eta U_f} \right) \quad (2.13)$$

όπου:

- $\eta = \left( \frac{\frac{P_f}{P_m} - 1}{\frac{P_f}{P_m} + 1} \right)$
- $\zeta = \left( \frac{7-5\nu_m}{8-10\nu_m} \right)$

### **2.1.5. Το μοντέλο των Sato και Furukawa**

Όπως αναφέρθηκε στην παραπάνω παράγραφο πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να εισάγουν κάποιους δευτερεύοντες παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των σύνθετων υλικών. Έτσι για να επιτευχθεί καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων εισήχθησαν εμπειρικοί νόμοι οι οποίοι περιέχουν σταθερές που εκφράζουν τις φυσικοχημικές και φυσικομηχανικές ιδιότητες του συστήματος όπως η πρόσφυση, η συσσώρευση, η ύπαρξη μιας μεσοφάσης κ.α.

Οι *Sato* και *Furukawa* στο μοντέλο τους εισήγαγαν ένα κατάλληλο παράγοντα  $\zeta$  ο οποίος χαρακτηρίζει την δύναμη πρόσφυσης που κυμαίνεται από την τιμή 0 ( τέλεια πρόσφυση ) μέχρι 1 ( μηδενική πρόσφυση ). Η ακριβής σχέση είναι

$$E_C = E_m \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{y^2}{1-y} \right) \left( 1 - \frac{y^3 \zeta}{3} \varphi - \frac{y^2 \zeta}{3(1-y)} \varphi \right) \quad (2.14)$$

όπου:

- $y = u_f^{\frac{1}{3}}$
- $\varphi = \frac{1+y-y^2}{1-y+y^2}$

και για λόγους απλοποίησης

- $P = 1 + \frac{1}{2} \frac{y^2}{1-y}$  που δίνει την μεταβολή ελαστικότητας σε σύνθετα υλικά για τέλεια πρόσφυση.
- $Q = 1 - \frac{y^3 \zeta}{3} \varphi - \frac{y^2 \zeta}{3(1-y)} \varphi$  που δίνει την μεταβολή ελαστικότητας μέσω της πρόσφυσης  $\zeta$  του εγκλείσματος.

Έτσι τελικά παίρνουμε:

$$E_C = E_m P Q \quad (2.15)$$

### 2.1.6. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι στην ανασκόπηση δεν έγινε καμιά προσπάθεια για να συζητηθούν οι προσεγγίσεις, αλλά να δειχθεί ένας αριθμός σε χρήσιμες θεωρητικές υποθέσεις που περιγράφουν τα μέτρα ελαστικότητας ενός συστήματος εγκλεισμάτων. Για τη λεπτομερή συζήτηση των θεωριών γίνεται αναφορά στους *Hashin* και *Hill* [20].

Στην πράξη τα εγκλείσματα κόκκων δεν μπορούν να αποχωρισθούν το ένα από το άλλο και η ενίσχυση του στοιχείου μπορεί να είναι σε μικρή κλίμακα, στην πραγματικότητα είναι ένα συσσωμάτωμα από μικρούς κόκκους. Έτσι λοιπόν ως

απάντηση στο εφαρμοζόμενο φορτίο, η τάση θα κατανεμηθεί ομοιόμορφα ανάμεσα στους κόκκους και τα συσσωματώματα και η παραδοχή τάση ή ομοιόμορφη επιμήκυνση (δηλαδή παραμόρφωση) είναι καθαρά υπεραπλούστευση.

Οι θεωρίες που ασχολούνται με τα συστήματα εγκλεισμάτων δέχονται ότι τα μέτρα ελαστικότητας για δεδομένο εγκλείσμα και μήτρα εξαρτώνται μόνο από την περιεκτικότητα σε όγκο του εγκλείσματος και όχι από το μέγεθος των κόκκων. Όμως γενικά το μέτρο αυξάνει όσο το μέγεθος των κόκκων μειώνεται [21,22,23,24]. Οι *Lewis* και *Nielsen* [21] παραδέχονται ότι όσο το μέγεθος του κόκκου μειώνεται η επιφάνεια των κόκκων αυξάνεται παρέχοντας ένα πιο ενεργό επιφανειακό δεσμό μεταξύ των δύο φάσεων. Αυτό θα μπορούσε να συνοδευθεί από μια κλίση για την αύξηση συσσώρευσης των κόκκων (συσσωματώματα). Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών μπορούν επίσης να μεταβάλλονται όταν αλλάζει το σχήμα (μορφή) κόκκου. Ο *Bueche* [25] παρατήρησε ότι διαφορετικές μορφές εγκλεισμάτων καταλήγουν σε διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Το αποτέλεσμα ήταν ιδιαίτερα έντονο με μεγαλύτερους ή μη σφαιρικούς( μη σφαιροειδείς) κόκκους όπου ένας προτιμώμενος προσανατολισμός θα μπορούσε να τροποποιήσει τη συμπεριφορά παραμόρφωσης.

Ο *Wu* [26] απέδειξε θεωρητικά ότι κόκκοι σε μορφή δίσκου έδωσαν καλύτερη ενίσχυση από βελονοειδούς ή σφαιρικής μορφής κόκκους, αλλά αγνόησε την ανισοτροπία η οποία συνδέεται με την χρήση μη σφαιρικών κόκκων σε σύνθετα υλικά.

Ο *Chow* [27] έχει ασχοληθεί με το πρόβλημα για ευθυγραμμισμένους ελλειψοειδείς κόκκους και προέβλεψε το διάμηκες και εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας. Οι επιδράσεις από το μέγεθος του εγκλείσματος και από την επιφάνεια του εγκλείσματος αγνοήθηκαν. Όμως είναι απίθανο στην πράξη ότι τα εγκλείσματα μπορούν να διαταχθούν ομοιόμορφα με τρόπο που παραδέχεται ο *Chow*, έτσι ώστε η πειραματική επιβεβαίωση των δύο θεωριών να είναι απαραίτητη.

Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων επηρεάζει την περιεκτικότητα του εγκλείσματος στη μήτρα. Μίγματα από κόκκους με διαφορετικό μέγεθος εγκλεισμάτων μπορούν να διαταχθούν πιο πυκνά από εγκλείσματα ενός μεγέθους διότι τα μικρά εγκλείσματα μπορούν να γεμίσουν τον χώρο μεταξύ των στενά διατεταγμένων μεγάλων εγκλεισμάτων και να σχηματίσουν συσσωματώματα. Αυτοί οι κόκκοι που συσσωματώνονται είναι ικανοί να μεταφέρουν ένα μεγαλύτερο μέτρο

ελαστικότητας για την ίδια περιεκτικότητα που προβλέπεται από τις περισσότερες θεωρίες.

Αυτή η επίδραση δημιουργείται όπου υπάρχει μια διαφορετική ενισχυτική ικανότητα άμμου, όπως έχει παρατηρηθεί από τους *Ahmed* και *Jones* [28,19]. Μια εμπειρική τροποποίηση στην εξίσωση η οποία περιλαμβάνει ένα συντελεστή αλληλεπίδρασης εγκλείσματος προτάθηκε από τον *Dickie* [30]. Κάθε μια από τις εξισώσεις εμφανίζεται ικανοποιητική στο να περιγράφει τα δεδομένα των διαφόρων ερευνητών.

Πρέπει να σημειωθεί το σχόλιο από τον *Christensen* [31] επάνω στην εξίσωση του *Kerner*, ότι το σαφές σφάλμα σε αυτή την εξίσωση δεν μπορεί να δειχθεί λόγω της συντομίας της παραγωγίσεως. Αυτό συνεπώς δημιουργεί αμφιβολίες στην εξίσωση του *Kerner* και στις επακόλουθες τροποποιήσεις.

Οι περισσότερες από τις θεωρίες οι οποίες εξηγούν την ενισχυτική δράση των εγκλεισμάτων παραδέχονται τέλεια πρόσφυση ανάμεσα στα εγκλείσματα και την πολυμερική μήτρα. Η περίπτωση της ελλιπούς προσφύσεως ήταν στην ελαστική περιοχή, όπως συζητήθηκε από τους *Sato* και *Furukawa* [32] οι οποίοι παραδέχονται ότι οι συνδεδεμένοι κόκκοι λειτουργούν ως οπές και προβλέπουν μείωση στα μέτρα ελαστικότητας με την αύξηση της περιεκτικότητας σε έγκλεισμα.

Μπορεί να υποστηριχθεί ότι οι μη συνδεδεμένοι κόκκοι δεν λειτουργούν εντελώς ως οπές, επειδή αυτοί συγκρατούν τη μήτρα από την κατάρρευση. Σε αυτή την περίπτωση το μέτρο ελαστικότητας συστήματος εγκλεισμάτων πρέπει να αυξάνει με την αύξηση περιεκτικότητας του εγκλείσματος, η οποία είναι η γενικώς αναμενόμενη συμπεριφορά.

Μια μεταβολή στην πρόσφυση μήτρας-εγκλεισμάτων έχει μικρότερη επίδραση στα μέτρα ελαστικότητας από ότι στην αντοχή. Το τελευταίο είναι περισσότερο εξαρτώμενο από την κατεργασία επιφάνειας [22,33,34]. Στην πραγματικότητα ο βαθμός πρόσφυσης δεν φαίνεται να είναι σημαντικός παράγοντας όσο οι δυνάμεις τριβής ανάμεσα στις φάσεις δεν υπερβαίνονται από την εφαρμοζόμενη τάση.

Οι *Spanoudakis* και *Young* [22] εξέτασαν εγκλείσματα γυαλιού σε εποξειδική ρητίνη και βρήκαν ότι οι καλύτερες συνολικές μηχανικές ιδιότητες αποκτήθηκαν από σύνθετα υλικά που περιείχαν κόκκους οι οποίοι είχαν εμβαπτιστεί σε ουσία (coupling agent) προς αύξηση της προσφύσεως μήτρας-εγκλείσματος.

Είναι ξεκάθαρο από τις προηγούμενες αναφορές ότι τα μέτρα ελαστικότητας ενός συστήματος εγκλεισμάτων είναι μια λεπτομερειακή συνάρτηση της μικροδομής, όπως επίσης και της ποιότητας πρόσφυσης μεταξύ των δύο φάσεων.

### **2.1.7. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ**

Η θεωρητική μελέτη που ακολουθεί βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Οι φάσεις του συνθέτου υλικού (έγκλεισμα και μήτρα) είναι ελαστικά ισότροπα και ομογενή υλικά.
- Ο αριθμός των εγκλεισμάτων είναι μεγάλος και η κατανομή τους ομοιόμορφη, έτσι ώστε το σύνθετο υλικό μπορεί να θεωρηθεί ομοιογενές και ισότροπο ( μακροσκοπικώς ισότροπο υλικό).
- Το έγκλεισμα αποτελείται από κόκκους που έχουν τέλειο σφαιρικό σχήμα.
- Οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο σύνθετο υλικό είναι αρκετά μικρές έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύουν οι γραμμικές σχέσεις-παραμορφώσεων.
- Η κατά όγκο περιεκτικότητα των εγκλεισμάτων είναι αρκετά μικρή, έτσι ώστε η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών να μπορεί να αμεληθεί.

Για τον προσδιορισμό των σχέσεων οι οποίες θα δώσουν την θεωρητική έκφραση για το μέτρο ελαστικότητας ( $E_c$ ) του συνθέτου υλικού, θα εφαρμόσουμε την θεωρία της ελαστικότητας στον στοιχειώδη αντιπροσωπευτικό όγκο του συνθέτου, όπου θεωρείται ότι έχει κατά μέσο όρο τις ιδιότητες του κοκκώδους συνθέτου υλικού.

### **2.1.8. Διφασικό μοντέλο**

Στην παράγραφο αυτή θα αναφέρουμε τον τύπο για το μέτρο ελαστικότητας ( $E_c$ ), ο οποίος προκύπτει από το διφασικό μοντέλο του συνθέτου υλικού. Ας θεωρήσουμε το διφασικό μοντέλο του κοκκώδους συνθέτου υλικού, όπου οι δύο ομόκεντρες σφαίρες με ακτίνες  $r_f$  και  $r_m$  παριστάνουν τις δύο φάσεις δηλαδή το έγκλεισμα και τη μήτρα αντίστοιχα. Έστω ότι εφαρμόζουμε μία τάση  $P_1$  στην εξωτερική επιφάνεια της κοίλης σφαίρας με εσωτερική και εξωτερική  $r_f$  και  $r_m$  αντίστοιχα. Τότε στο εσωτερικό της σφαίρας αυτής, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος θα έχουμε κοινή τάση  $P_0$ .



Το πρόβλημα της εύρεσης των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι επιλύσιμο, με την βοήθεια της τασιακής συνάρτησης 35:

$$\Phi = \frac{L}{r} + Mr^2$$

με  $L, M$  σταθερές, και την οποία εφαρμόζουμε για κάθε μια από τις δύο φάσεις του μοντέλου.

Το μέτρο ελαστικότητας ( $E_c$ ) του συνθέτου υλικού μπορεί να προσδιορισθεί αν εφαρμόσουμε την συνθήκη ενεργειακής ισορροπίας στο διαφασικό μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα η ενέργεια παραμορφώσεως του συνθέτου είναι ίση με το άθροισμα των ενεργειών παραμόρφωσης των δύο φάσεων.

Μετά από μια σειρά σχέσεων και πράξεων καταλήγουμε στην έκφραση που δίνει το ( $E_c$ ) και είναι η εξής [19]:

$$\frac{2(1-2\nu_c)}{E_c} = \frac{2\lambda^2 U_f(1-2U_f)}{E_f} + \frac{1}{E_m} \frac{U_f(1-\lambda)^2(1+\nu_m) + 2(\lambda U_f - 1)^2(1-2\nu_m)}{1-U_f} \quad (2.16)$$

όπου

- $\nu_c$  ο λόγος Poisson του σύνθετου υλικού και δίνεται από την σχέση:  $\frac{1}{\nu_c} = \frac{U_f}{\nu_f} + \frac{U_m}{\nu_m}$  (2.16)

- και η παράμετρος  $\lambda$  δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = \frac{P_0}{P_1} = \left[ \frac{3(1-\nu_m)E_f}{[2U_f(1-2\nu_m) + 1 + \nu_m]E_f + 2(1-2\nu_f)(1-U_f)E_m} \right] \quad (2.17)$$

Η αύξηση της ενέργειας θραύσης ανά μονάδα όγκου με την παρουσία εγκλεισμάτων μπορεί να θεωρηθεί σαν βασικό χαρακτηριστικό της ενισχυτικής δράσης των εγκλεισμάτων στα πολυμερή στην ελαστική κατάσταση.

Έτσι τα εγκλείσματα που αυξάνουν την ενέργεια θραύσης θεωρούνται ενεργά, ενώ εκείνα που δεν την αυξάνουν θεωρούνται αδρανή. Το μέγεθος της αύξησης ή της ελάττωσης εξαρτάται από την φύση του εγκλεισματος.

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου ης ενισχυτικής δράσης των εγκλεισμάτων είναι η επίδραση τους στην αντοχή των σύνθετων υλικών. Αυτή η αντοχή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες λόγω της αλληλεπίδρασης μήτρας και εγκλεισματος. Ένας

σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού είναι η διαφοροποιούμενη δομή της ενδιάμεσης φάσης.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η μηχανική αντοχή του σύνθετου υλικού αυξάνει ανάλογα με την περιεκτικότητα και την λεπτότητα του εγκλείσματος. Το θεωρητικό όριο της περιεκτικότητας σε έγκλεισμα καθορίζεται από το ποσό του εγκλείσματος που κάνει πιθανή την ύπαρξη κάποιας ενδιάμεσης φάσης ή ενδιάμεσου στρώματος μεταξύ των σωματιδίων.

Έτσι η ενίσχυση των πολυμερών με την προσθήκη λεπτών κοκκωδών σωματιδίων οφείλεται στο σχηματισμό ενός συνεχούς ενισχυτικού σκελετού, ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων μεταξύ τους.

Παράλληλα η αντοχή του σύνθετου υλικού αυξάνει με την περιεκτικότητα σε έγκλεισμα, με την βέλτιστη (optimum) περιεκτικότητα όπου προκαλείται κορεσμός των κέντρων προσρόφησης μακρομορίων επάνω στην επιφάνεια του εγκλείσματος [5].

## **2.2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΑΡΑΧΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Όπως έχει επισημανθεί από τον *Nielsen* [36] οι θεωρίες για την αντοχή των συνθέτων υλικών με εγκλείσματα είναι λιγότερο αναπτυγμένες από αυτές για τα μέτρα ελαστικότητας. Εκτός από την περίπτωση για ελαστικό (rubber) με εγκλείσματα υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί.

### **2.2.1. Τάσεις θραύσης**

#### **2.2.2. Μοντέλο των Sahu-Broutman**

Στην προσέγγιση των *Sahu* και *Broutman* [37], υποτίθεται ότι το σύνθετο υλικό αστοχεί όταν ένα στοιχείο υποστεί θραύση ως αποτέλεσμα μιας συγκεντρώσεως τάσεως γύρω από το έγκλεισμα. Έπεται ότι η αντοχή πέφτει ταχέως με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων εγκλεισμάτων και παραμένει βασικά σε αυτό το επίπεδο με περαιτέρω προσθήκες εγκλεισμάτων.

Με αυτήν την υπόθεση αυτοί χρησιμοποίησαν την ανάλυση για πεπερασμένα στοιχεία για να μοντελοποιήσουν το σύνθετο υλικό και συσχέτισαν τα αποτελέσματα με τις πειραματικές αντοχές υλικού με εγκλείσματα από σφαίρα γυαλιού μέσα σε θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη.

Οι θεωρητικές προβλέψεις δεν έχουν καλή σύμπτωση με τα πειραματικά δεδομένα διότι το μοντέλο αγνοεί αλληλεπίδραση κόκκων. Επιπλέον τα σύνθετα υλικά είναι πιθανόν να μην έχουν αστοχήσει ως αποτέλεσμα της αστοχίας του πρώτου στοιχείου.

### **2.2.3. Ο νόμος των δυνάμεων (The power law)**

Η δεύτερη προσέγγιση υποθέτει ότι η αντοχή συνθέτου υλικού προσδιορίζεται από την υπάρχουσα έκταση της φέρουσας φορτίο μήτρας λόγω της παρουσίας του εγκλείσματος [38-42].

Στην περίπτωση μια πτωχής προσφύσεως ανάμεσα στη μήτρα και το εγκλείσμα και της απουσίας συγκέντρωσης τάσεως στην ενδιάμεση επιφάνεια κόκκου-μήτρας, η αντοχή περιγράφεται από το νόμο δυνάμεως:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} * [1 - \alpha * U_f^\eta] \quad (2.18)$$

όπου:

- $\sigma_{cu}$  η αντοχή του σύνθετου.
- $\sigma_{mu}$  η αντοχή της μήτρας.
- $\alpha, \eta$  σταθερές εξαρτώμενες από το υποτιθέμενο σχήμα κόκκου και την ταξινόμηση στο μοντέλου του συνθέτου.

Ο *Nielsen*[38] έχει εισηγηθεί έναν παράγοντα συγκεντρώσεως τάσεως,  $K$  με προτεινόμενη τιμή 0,5. Για κυβικούς κόκκους μέσα σε κυβική μήτρα η (2.19) γράφεται ως:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} * [1 - U_f^{2/3}] * K \quad (2.19)$$

Ο *Nicolais* και *Narkis*[41] θεώρησαν μια κυβική μήτρα ενισχυμένη με ομοιομόρφως διασκορπισμένους κόκκους όπου υποτίθεται ότι η θραύση γίνεται στην ελάχιστη εγκάρσια διατομή συνεχούς φάσεως. Η σχέση για την αντοχή δίνεται ως:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} * [1 - 1.21 * U_f^{2/3}] \quad (2.20)$$

Ο *Piggott* και *Leidner* υποστήριξαν ότι η υποτιθέμενη ομοιόμορφη κατανομή των εγκλεισμάτων σε πάρα πολλά μοντέλα είχε μικρή πιθανότητα επιτεύξεως στην πράξη και προτείνουν μια εμπειρική σχέση:

$$\sigma_{cu} = K * \sigma_{mu} - b * U_f \quad (2.21)$$

όπου:

- $K$ : συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων

- b: μια σταθερά εξαρτώμενη από την πρόσφυση κόκκου-μήτρας.

Ο *Landon* πρότεινε:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} * (1 - U_f) - K * U_f * d \quad (2.22)$$

όπου:

- d: είναι η μέση διάμετρος του κόκκου.
- K: η κλίση στο διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής μέσης διαμέτρου κόκκου.

#### 2.2.4. Η εξίσωση των LEIDNER-WOODHAMS

Μια απλούστερη αλλά πιο λεπτομερής προσέγγιση έχει αναπτυχθεί από τον *Leidner* [43] όπου το μοντέλο του σύνθετου υλικού αποτελείται από σφαιρικούς κόκκους μέσα σε μη ελαστική μήτρα. Για να εφαρμοσθεί η θεωρία ενισχύσεως [44] το μέγεθος κόκκου θα προσεγγισθεί στον κύλινδρο. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσδιορισθεί η κατανομή τάσεων στο έγκλεισμα στο σημείο θραύσεως.

Στην περίπτωση μη καλώς συνδεδεμένων κόκκων, η μεταβίβαση τάσεως ανάμεσα στον κόκκο και την μήτρα υποτίθεται ότι γίνεται ως αποτέλεσμα του συνδυασμού της τριβής μεταξύ κόκκων-μήτρας και των παραμενουσών θλιπτικών τάσεων, οι οποίες ενεργούν επάνω στην ενδιάμεση επιφάνεια κόκκου-μήτρας.

Στην περίπτωση από καλά συνδεδεμένους κόκκους οι τάσεις μεταβιβάζονται δια μέσου μηχανισμού διάτμησης. Η μέγιστη τάση είναι στο κόκκο, συνεπώς εξαρτάται από την αντοχή του δεσμού κόκκου-μήτρας.

Η τελική εφελκυστική τάση του συνθέτου ελήφθη απλά ως το άθροισμα του μέγιστου φορτίου που αναλαμβάνεται από την μήτρα και από το έγκλεισμα και δίνεται ως:

$$\sigma_{cu} = (\sigma_a + 0.83 * \tau_m) + \sigma_a * K * (1 - U_f) \quad (2.23)$$

για καλή πρόσφυση μεταξύ των δύο φάσεων και

$$\sigma_{cu} = 0.83 * \sigma_{th} * \alpha * U_f + k * \sigma_{mu} * (1 - U_f) \quad (2.24)$$

στην περίπτωση μη προσφύσεως μεταξύ των δύο φάσεων όπου:

- $\sigma_a$  η αντοχή του ενδιάμεσου επιφανειακού δεσμού
- $\sigma_{mu}$  η αντοχή της μήτρας

- $\tau_m$  η αντοχή σε διάτμηση της μήτρας
- K ο συντελεστής συγκεντρώσεως τάσεων
- k είναι παράμετρος που εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων
- $\sigma_{th}$  η θερμική θλιπτική τάση πάνω στο σύνορο του κόκκου
- α ο συντελεστής τριβής

Υπήρξαν προσπάθειες για τον συσχετισμό της αντοχής των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με κόκκους με την διάμετρο d των εγκλεισμάτων. Για παράδειγμα: ο Hojo έχει βρει ότι η αντοχή εποξειδικής ρητίνης με εγκλείσματα πυριτίου ελαττώνεται όταν το μέγεθος κόκκου αυξάνει ακολουθώντας μια σχέση της μορφής:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} * k * d^{1/2} \quad (2.25)$$

όπου k είναι σταθερά και d η μέση διάμετρος του κόκκου.

Ο Schragger πρότεινε κάποιο μοντέλο που περιγράφεται από εξίσωση διαφορετικής μορφής από τις προηγούμενες:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} * \exp(-r * U_f) \quad (2.26)$$

με  $r=2.66$  που βρέθηκε πειραματικά. Το μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι είναι ακριβώς για περιορισμένη περιοχή εγκλεισμάτων. Η εξ.(2.26) είναι αντίστοιχη με εκείνη που προτάθηκε από τον Passmore για την περίπτωση των πορωδών συστημάτων:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fo} * \exp(-\alpha * P) \quad (2.27)$$

όπου:

- $\sigma_{fo}$  η αντοχή της μήτρας χωρίς πόρους
- α σταθερά
- P η κατά όγκο περιεκτικότητα σε πόρους

### **2.2.5. Περιορισμοί των θεωρητικών μοντέλων σχετικά με την αντοχή των συνθέτων υλικών**

Το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει πολύ την αντοχή σε εφελκυσμό των συστημάτων. Γενικά η αντοχή σε εφελκυσμό αυξάνει με την ελάττωση του μεγέθους. Η αύξηση της ενδιάμεσης επιφάνειας μεταξύ δύο φάσεων παρέχει έναν πολύ αποτελεσματικό δεσμό στην επιφάνεια τους και θεωρείται ότι είναι πολύ σημαντικός παράγων. Το

μέγεθος κόκκου είναι επίσης σχετικό με την εξάρτηση από το μέγεθος της ατέλειας του υλικού.

Ο *Goodier* έχει αποδείξει ότι το τασικό πεδίο κοντά σε ένα κόκκο, είναι ανεξάρτητο από το μέγεθος του κόκκου. Όμως ο όγκος του πολυμερούς που υφίσταται συγκέντρωση τάσεων, αυξήθηκε με την αύξηση στο μέγεθος του κόκκου, άρα η πιθανότητα εύρεσης μιας μεγάλης ατέλειας αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους του κόκκου.

Η επίδραση από την διεπιφανειακή ( λεπτή επιφάνεια μεταξύ δύο φάσεων ) πρόσφυση επί της αντοχής μπορεί να δικαιολογηθεί με όμοιο τρόπο εφόσον ένας αδύναμος δεσμός μεταξύ εγκλεισμάτων και μήτρας θα δράσει ως μια υπάρχουσα ατέλεια που θα παράγει μια κοιλότητα ίση με το μέγεθός της.

Η μορφή (σχήμα) εγκλείσματος αναμένεται να παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της αντοχής του συστήματος εγκλεισμάτων. Όταν έχουμε εγκλείσματα τα οποία δεν έχουν κανονική μορφή η εξασθένηση της αντοχής του συστήματος εγκλεισμάτων οφείλεται σε μεγάλη συγκέντρωση τάσεων που συζευγνύεται με επίδραση μεγέθους. Σε στρογγυλεμένες ρωγμές και εγκλείσματα, η συγκέντρωση τάσης είναι ολιγότερο σημαντική παρά σε εγκλείσματα με οξείες (κοπτερές) γωνίες.

Η προαναφερθείσα αναφορά αποδεικνύει καθαρά ότι αυτά τα υπάρχοντα μοντέλα για την πρόβλεψη της αντοχής θέτουν ένα άνω όριο στην αντοχή ενός συστήματος εγκλεισμάτων.

Όταν γίνεται πρόβλεψη αντοχής ενός υλικού με έγκλεισμα με την χρησιμοποίηση του νόμου των δυνάμεων ( power law), η εκλογή των κατάλληλων σταθερών επηρεάζεται από το σχήμα των κόκκων και την διάταξή τους μέσα στο γεωμετρικό μοντέλο. Επιπλέον η συγκέντρωση τάσεων θα χαμηλώσει αυτές τις τιμές κατά ακαθόριστη ποσότητα.

Από την άλλη, στις αναλύσεις των *Leidner* και *Woodhams*, οι θερμικές τάσεις ( $\sigma_{th}$ ) και της αντοχής του δεσμού μήτρας-κόκκου  $\sigma_c$  είναι δύσκολο να μετρηθούν για πραγματικά σύνθετα υλικά. Στις πολύ χαμηλές περιεκτικότητες κατά όγκο  $U_f$  μπορούν να γίνουν εκτιμήσεις για τις θερμικές τάσεις [45], αλλά σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες κατά όγκο οι υπολογισμοί περιπλέκονται από την παρουσία γειτονικών κόκκων.

### **2.2.6. Παραμόρφωση θραύση των κοκκωδών σύνθετων υλικών**

Παρακάτω αναφέρονται τα διάφορα θεωρητικά μοντέλα που έχουν προβλεφθεί από τους διάφορους ερευνητές για την παραμόρφωση θραύσης.

Ο *Smith* [46] πρότεινε τον παρακάτω τύπο:

$$\epsilon_c = \epsilon_m * (1 - 1,106U_f^{1/3}) \quad (2.28)$$

όπου:

- $\epsilon_c$  η παραμόρφωση θραύσης του συνθέτου
- $\epsilon_m$  η παραμόρφωση θραύσης της μήτρας

Ο *Bueche* [47] πρότεινε μια αντίστοιχη εξίσωση χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο από κυβικά σωματίδια σε κυβική διάταξη:

$$\epsilon_c = \epsilon_m * (1 - U_f^{1/3}) \quad (2.29)$$

Ο *Nielsen* πρότεινε εξίσωση με την ίδια μορφή με την παραπάνω:

$$\epsilon_c = \epsilon_m * (1 - U_f^{1/3}) \quad (2.30)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις στηρίζονται περισσότερο στο πείραμα και λιγότερο στη θεωρία και συνοψίζουν τη συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά με κοκκώδες έγκλεισμα. Περιγράφουν την επίδραση διαφόρων παραγόντων, όπως της κατά όγκο περιεκτικότητας του εγκλείσματος, των συσσωματωμάτων του μεγέθους των σωματιδίων, του μέτρου πρόσφυσης μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος στην μηχανική συμπεριφορά των συνθέτων υλικών.

### **2.2.7. Ο μηχανισμός της ενισχυτικής δράσης των εγκλεισμάτων στα πολυμερή**

Η ενσωμάτωση [21] μέσα στην μήτρα του πολυμερούς πολύ λεπτών σωματιδίων ή ινωδών υλικών, ανόργανης ή οργανικής φύσης συνοδεύεται με αλλαγή των φυσικοχημικών, μηχανικών, θερμικών, ηλεκτρικών και άλλων ιδιοτήτων του υλικού, αν και η βασικότερη επιδίωξη μας είναι η βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων.

Ανάλογα με την αποτελεσματικότητα τους τα εγκλείσματα διακρίνονται σε ενεργά (είναι εκείνα που προκαλούν ενίσχυση) και σε αδρανή (είναι εκείνα που δεν προκαλούν βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού, αλλά προκαλούν μόνο αλλαγή χρωματισμού και μείωση του κόστους).

Αναφορικά με τα ενεργά εγκλείσματα μπορούμε να διακρίνουμε τη δραστηριότητα τους σε δομική, κινητική, και θερμοδυναμική. Με τον όρο δομική δραστηριότητα εννοείται η ικανότητα του εγκλείσματος να επηρεάζει την δομή του πολυμερούς. Έτσι με την ενσωμάτωση των εγκλεισμάτων στη μήτρα παρατηρούνται αλλαγές στο μέγεθος, στο σχήμα και στην κατανομή των δομικών μονάδων.

Με τον όρο κινητική δραστηριότητα εννοείται η ικανότητα του εγκλείσματος να επηρεάζει διάφορες θερμοδυναμικές παραμέτρους του σύνθετου υλικού.

Η ενίσχυση του υλικού λόγω των εγκλεισμάτων μπορεί να συσχετισθεί με την ενέργεια  $W$  θραύσης του πολυμερούς. Μετρείται από το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων.

όπου:

- $L_b$  το μήκος του δοκιμίου στη θραύση
- $L_0$  το αρχικό μήκος του δοκιμίου
- $\sigma$  η επιβαλλόμενη τάση

$$W = \int_{L_0}^{L_b} \sigma * dL \quad (2.31)$$

Η αύξηση της ενέργειας θραύσης ανά μονάδα όγκου με την παρουσία εγκλεισμάτων μπορεί να θεωρηθεί σαν βασικό χαρακτηριστικό της ενισχυτικής δράσης των εγκλεισμάτων στα πολυμερή, στην ελαστική κατάσταση.

Έτσι τα εγκλείσματα που αυξάνουν την ενέργεια θραύσης θεωρούνται ενεργά, ενώ εκείνα που δεν την αυξάνουν θεωρούνται αδρανή. Το μέγεθος της αύξησης ή της ελάττωσης εξαρτάται από την φύση του εγκλείσματος.

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου της ενισχυτικής δράσης των εγκλεισμάτων είναι η επίδραση τους στην αντοχή των σύνθετων υλικών. Αυτή η αντοχή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες λόγω της αλληλεπίδρασης μήτρας και εγκλείσματος. Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού είναι η διαφοροποιούμενη δομή της ενδιάμεσης φάσης.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η μηχανική αντοχή του σύνθετου υλικού αυξάνει ανάλογα με την περιεκτικότητα και την λεπτότητα του εγκλείσματος. Το θεωρητικό όριο της περιεκτικότητας σε εγκλείσμα καθορίζεται από το ποσό του εγκλείσματος που κάνει πιθανή την ύπαρξη κάποιας ενδιάμεσης φάσης ή ενδιάμεσου στρώματος μεταξύ των σωματιδίων.



Έτσι η ενίσχυση των πολυμερών με την προσθήκη λεπτών κοκκωδών σωματιδίων οφείλεται στο σχηματισμό ενός συνεχούς ενισχυτικού σκελετού, σαν το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων μεταξύ τους.

Παράλληλα η αντοχή του σύνθετου υλικού αυξάνει με την περιεκτικότητα σε έγκλεισμα, με την βέλτιστη (optimum) περιεκτικότητα όπου προκαλείται κορεσμός των κέντρων προσρόφησης μακρομορίων επάνω στην επιφάνεια του εγκλείσματος [5].

## **3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ**

#### **3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

##### **3.1.1. Γενικά**

Η πειραματική μελέτη για τον προσδιορισμό των μηχανικών ελαστικών σταθερών γίνεται με πειράματα κάμψης 4 ή 3 σημείων. Τα πειραματικά αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Είναι δυνατό ο προσδιορισμός να γίνει είτε με κάμψη 3 σημείων είτε με κάμψη 4 σημείων. Απλουστευτικά η δοκός μπορεί να αστοχήσει από εφελκυσμό στο κάτω μέρος, από θλίψη στο πάνω, από διάτμηση ή κάποιο συνδυασμό αυτών. Ο τύπος της αστοχίας εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το λόγο μήκους στήριξης προς πάχος  $L/t$ . Με χρήση πειράματος κάμψης 4 σημείων οι πιο πάνω συνθήκες περιορίζουν την επίδραση τους και συνήθως παίρνουμε καλύτερα αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κάμψη 3 σημείων μετρά τις καμπτικές ιδιότητες των πολυστρωμάτων παρά τις ιδιότητες του υλικού.

##### **3.1.2. Υλικά κατασκευής δοκιμίων**

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις εργασίες κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ. Η μήτρα του σύνθετου υλικού είναι σύστημα εποξειδικής ρητίνης-σκληρυντή της εταιρίας SHELL. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ρητίνη EPIKOTE 8282 LV (low viscosity) η οποία παρασκευάζεται από bisphenol A και epichlorohydrin χωρίς να περιέχει διαλύτες. Η ρητίνη είναι μέσο ιξώδους, το οποίο σύμφωνα με τον κατασκευαστή, κυμαίνεται ανάμεσα στα 10-12 Pa.s στους 25°C. Ο σκληρυντής είναι EPILINK 177 με ισοδύναμο ~ 95 και ιξώδες που κυμαίνεται από 0,25-0,5 Pa.s στους 25°C. Η αναλογία ανάμειξης του σκληρυντή

με την ρητίνη είναι 50 p.h.r. Επίσης χρησιμοποιήθηκε και πλαστικοποιητής D.O.P. σε αναλογία 35 p.h.r και ακόμη σε 17 p.h.r και 0 p.h.r με σκοπό να ελαττώσουμε την ψαθυρότητα του συστήματος ρητίνης-σκληρυντή.

Ως έγκλεισμα χρησιμοποιήθηκε ένα μέγεθος κόκκων από υλικό καρβίδιο του πυριτίου (SiC), με μέση τιμή μεγέθους 0.046μm και σε διαφορετικές κατά όγκο περιεκτικότητες (0%, 5%, 10%, 20%, 30%). Επίσης δίνονται και τα παρακάτω:

- Μέτρο ελαστικότητας: (E):  $400 \times 10^9 \text{N/m}^2$
- Τάση θραύσης εφελκυσμού: ( $\sigma_{\text{εφ}}$ ):  $250 \times 10^6 \text{N/m}^2$
- Τάση θραύσης θλίψης: ( $\sigma_{\text{θλ}}$ ):  $650 \times 10^6 \text{N/m}^2$
- Λόγος Poisson: ( $\nu$ ):  $\sim 0,2$
- Πυκνότητα: ( $\rho$ ):  $3,17 \text{gr/cm}^3$

Για την μήτρα (σύστημα: ρητίνη-σκληρυντής-πλαστικοποιητής) υπολογίστηκαν από μετρήσεις:

1) Μέτρο ελαστικότητας (E):  $2,03 \times 10^9 \text{N/m}^2$

λόγος Poisson: ( $\nu$ ):  $\sim 0,391$  [Πλαστικοποιητής: 35 p.h.r]

2) Μέτρο ελαστικότητας (E):  $2,32 \times 10^9 \text{N/m}^2$

λόγος Poisson: ( $\nu$ ):  $\sim 0,443$  [Πλαστικοποιητής: 17 p.h.r]

3) Μέτρο ελαστικότητας (E):  $3,42 \times 10^9 \text{N/m}^2$

λόγος Poisson: ( $\nu$ ):  $\sim 0,384$  [Πλαστικοποιητής: 0 p.h.r]

### **3.1.3. Κατασκευή και προετοιμασία δοκιμίων**

Θερμαίνουμε την ρητίνη στους 35°C περίπου, για να χαμηλώσουμε το ιξώδες της, ούτως ώστε να γίνει πιο εύκολη στη χρήση της αλλά και για να μειώσουμε την πιθανότητα κρυστάλλωσης της λόγω της αποθήκευσης σε χώρο με χαμηλές θερμοκρασίες. Κατόπιν ανάλογα με την περίπτωση αναμιγνύουμε κατάλληλες ποσότητες ρητίνης, πλαστικοποιητή και κόκκων SiC. Ανακατεύουμε το μίγμα για αρκετή ώρα έως ότου να επιτύχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη ομοιογένεια. Ύστερα προσθέτουμε κατάλληλη ποσότητα σκληρυντή και ανακατεύουμε, για λίγα λεπτά ακόμη. Στη συνέχεια τοποθετούμε το μίγμα σε θάλαμο κενού για 15 λεπτά περίπου.

Με τον τρόπο αυτό απελευθερώνονται όλες οι φυσαλίδες του αέρα που εγκλωβίστηκαν με την ανάδευση.

Έπειτα γίνεται απόχυση του μίγματος σε ειδικά κατασκευασμένα από plexiglass καλούπια, τα οποία προηγουμένως έχουμε επαλείψει με ειδικό αποκολλητικό κερί. Για τα δοκίμια με περιεκτικότητα σε κόκκους 0%, 5%, 10% και 20% η απόχυση έγινε σε καλούπια ανοίγματος( πάχος δοκιμίου) 3mm. Για τα δοκίμια με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε κόκκους (30%) χρησιμοποιήθηκαν καλούπια ανοίγματος 4.5mm. Αυτό έγινε για να μπορέσουν τυχόν φυσαλίδες που εγκλωβίστηκαν κατά την απόχυση του μίγματος ( το οποίο σαφώς είναι πιο παχύρευστο όταν έχουμε μεγάλες περιεκτικότητες σε κόκκους ) να ελευθερωθούν ευκολότερα κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης του μίγματος.

Το μίγμα μένει μέσα στο καλούπι και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 24 ώρες. Με την πάροδο του 24ώρου καθώς το υλικό αρχίζει να στερεοποιείται (διατηρώντας όμως μια πλαστικότητα ) το βγάζουμε από τα καλούπια. Από τις πλάκες του υλικού που κατασκευάσαμε κόβουμε με την βοήθεια ειδικής λάμας τα δοκίμια κάμψης σε διαστάσεις και μήκος τέτοιο, ώστε ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου ( σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D 790) να καλύπτουμε το μήκος στήριξης που δίνει η προδιαγραφή. Για να έχουμε λείες ακμές στην συνέχεια τα λειαίνουμε με κατάλληλο λειαντικό τροχό.

Αυτό το κάνουμε για να έχουμε συμμετρικά διαμορφωμένα δοκίμια, αλλά και για το γεγονός ότι μετά την πλήρη στερεοποίηση του το υλικό διαμορφώνεται δύσκολα. Τα έτοιμα πλέον δοκίμια αφήνονται για δύο ημέρες ακόμη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για να συνεχισθεί η σκλήρυνση (πολυμερισμός).

Στην συνέχεια ακολουθούμε μια διαδικασία μετασκλήρυνσης. Τα δοκίμια τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας 80°C για μια ημέρα ώστε να τερματισθούν οι αντιδράσεις της σκλήρυνσης (curing). Έτσι τα δοκίμια αποκτούν κατά μία έννοια ιδιότητες ανεξάρτητες από τις συνθήκες αποθήκευσης. Τα δοκίμια εκτελούνται σε κανονικές συνθήκες εργαστηρίου δηλαδή σε  $32\pm 2^{\circ}\text{C}$  και  $50\pm 5\%$  σχετική υγρασία.

### 3.1.4. Προδιαγραφή κανονισμού NASI/ASTM D790-71

#### 3.1.5. Σκοπός και περιγραφή της μεθόδου

Αυτή η προδιαγραφή προσδιορίζει τις ιδιότητες των ψαθυρών πλαστικών και των μονωτικών υλικών που έχουν μορφή ορθογωνίων ράβδων, τα οποία είτε έχουν βγει από καλούπι κατευθείαν, είτε έχουν κοπεί από φύλλο, πλάκα ή άλλα σώματα. Αυτή η προδιαγραφή είναι γενικά εφαρμόσιμη σε στερεά και ημιστερεά υλικά. Οποσδήποτε, η αντοχή σε κάμψη δεν μπορεί να προσδιορισθεί για εκείνα τα υλικά τα οποία δεν αστοχούν όταν είναι όλκιμα. Δύο μέθοδοι για την δοκιμή περιγράφονται παρακάτω:

- Μέθοδος 1-A: Κάμψη τριών σημείων χρησιμοποιώντας κεντρική σε μία απλά εδραζόμενη δοκό
- Μέθοδος 2-A: Κάμψη τεσσάρων σημείων χρησιμοποιώντας δύο σημεία φόρτισης σε ίσες αποστάσεις από τα σημεία στηρίξεως όπου η απόσταση μεταξύ του σημείου στηρίξεως και του σημείου φορτίσεως ισούται με το ένα τρίτο του μήκους στηρίξεως (support span).

Και οι δύο αυτές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύμφωνα με τις δύο διατάξεις που ακολουθούν.

- Διαδικασία A: Σχεδιασμένη βασικά για υλικά τα οποία αστοχούν σε σχετικά μικρά βέλη (deflections).
- Διαδικασία B: Σχεδιασμένη συγκεκριμένα για εκείνα τα υλικά τα οποία υφίστανται μεγάλα βέλη κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Αντίστοιχα πειράματα μπορούν να πραγματοποιηθούν σύμφωνα με τη μία από τις μεθόδους ή τις διαδικασίες, αρκεί αυτή η μέθοδος ή η διαδικασία να φαίνεται ότι είναι ικανοποιητική για ελεγχόμενο υλικό.

Μια ράβδος ορθογωνικής διατομής λοιπόν δοκιμάζεται σε κάμψη σαν δοκός όπως παρακάτω:

- Μέθοδος 1: Η ράβδος στηρίζεται σε δύο στηρίξεις και φορτίζεται στη μέση της αποστάσεως μεταξύ των στηρίξεων.
- Μέθοδος 2: Η ράβδος στηρίζεται σε δύο στηρίξεις και φορτίζεται σε δύο σημεία, κάθε ένα σε ίση απόσταση από τις παρακείμενες στηρίξεις. Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία φορτίσεως είναι το 1/3 του μήκους στηρίξεως.

Το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι να συμβεί θραύση στην εξωτερική επιφάνεια ή μέχρι την μέγιστη παραμόρφωση των δοκιμίων.

Τα χαρακτηριστικά της κάμψης που προσδιορίζονται από την Μέθοδο 1 είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για ποιοτικό έλεγχο και για προσδιοριστικούς λόγους.

Δοκίμια τα οποία δεν αστοχούν στο σημείο της μέγιστης τάσης στην Μέθοδο 1 τότε θα πρέπει να εξετασθούν με την Μέθοδο 2. Χαρακτηριστικά κάμψης που προσδιορίζονται από την Μέθοδο 2 είναι επίσης χρήσιμα για ποιοτικό έλεγχο και προσδιοριστικούς σκοπούς.

Η βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους είναι η θέση της μέγιστης καμπτικής ροπής (bending moment) και των μεγίστων αξονικών τάσεων (maximum axial stresses).

Οι μέγιστες αξονικές τάσεις εμφανίζονται στο σημείο κάτω από τη θέση φορτίσεως στη Μέθοδο 1 και στην περιοχή ανάμεσα στις θέσεις φορτίσεως στην Μέθοδο 2.

Τα χαρακτηριστικά της κάμψης μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου, την θερμοκρασία, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την ταχύτητα φορτίσεως που ορίζονται στις διαδικασίες Α και Β.

### **3.1.6. Μηχανή Δοκιμής**

Μια κατάλληλα βαθμονομημένη (calibrated) μηχανή δοκιμών η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σταθερές ταχύτητες φορτίσεως (crosshead motion) στο εύρος που υποδεικνύεται και στην οποία το σφάλμα στο σύστημα μέτρησης φορτίου δεν θα υπερβαίνει το  $\pm 1\%$  του μέγιστου φορτίου το οποίο αναμένεται να μετρηθεί. Θα πρέπει να είναι εφοδιασμένη με έναν μηχανισμό μέτρησης βέλους (deflection). Η ακαμψία της μηχανής πρέπει να είναι τέτοια ώστε η ολική ελαστική παραμόρφωση του συστήματος να μην υπερβαίνει το 1% του συνολικού βέλους των δοκιμίων κατά την διάρκεια του πειράματος, ειδικά πρέπει να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες διορθώσεις. Ο μηχανισμός ένδειξης φορτίσεως πρέπει να είναι απαραίτητα απηλλαγμένος από αδρανειακή (inertial lag) στον χρησιμοποιούμενο ρυθμό φορτίσεως.

### **3.1.7. Στελέχη φορτίσεως και στηρίξεως**

Τα στελέχη φορτίσεως και οι στηρίξεις πρέπει να έχουν κυλινδρικές επιφάνειες. Για να αποφύγουμε εκτεταμένη διείσδυση ή αστοχία η οποία οφείλεται στην συγκέντρωση τάσεων ακριβώς κάτω από το στέλεχος φορτίσεως, η ακτίνα του στελέχους ή των στελεχών φορτίσεως και των στηρίξεων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 3.2mm για όλα τα δοκίμια. Για δοκίμια 3.2mm ή μεγαλύτερα σε πάχος, η ακτίνα των στηρίξεων πρέπει να είναι περισσότερο από 1.5 φορές το πάχος του δοκιμίου. Αυτό πρέπει να ισχύει εάν συμβαίνει σημαντική διείσδυση ή αστοχία λόγω συνθλίψεως. Το τόξο στου στελέχους φορτίσεως που είναι σε επαφή με τα δοκίμια πρέπει να είναι ικανοποιητικά μεγάλο, ώστε να αποφευχθεί επαφή των δοκιμίων με τις άκρες του στελέχους ή των στελεχών.

### **3.1.8. Δοκίμια**

#### **α) Συνθήκες**

Τα δοκίμια προετοιμάζονται σε  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  και  $50\pm 5\%$  σχετική υγρασία όχι για λιγότερο από 40h πριν το πείραμα σύμφωνα με την διαδικασία A της μεθόδου D618 για εκείνα τα πειράματα όπου απαιτείται προετοιμασία. Σε περιπτώσεις διαφοράς οι ανοχές πρέπει να είναι  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  και  $\pm 2\%$  αντίστοιχα.

#### **β) Συνθήκες πειράματος**

Τα πειράματα εκτελούνται σε κανονικές συνθήκες εργαστηρίου δηλ.  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  και  $50\pm 5\%$  σχετική υγρασία, εκτός αν προσδιορίζονται αλλιώς στην μέθοδο του πειράματος. Σε περιπτώσεις διαφοράς, οι ανοχές πρέπει να είναι  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  και  $\pm 2\%$  αντίστοιχα.

Τα δοκίμια μπορούν να κοπούν από φύλλα, πλάκες ή σχηματοποιημένα έτοιμα με την βοήθεια τύπου(καλουπιού) ή ακόμη μπορούν να κατασκευασθούν σε οποιοσδήποτε επιθυμητές διαστάσεις.

Για τις ανάγκες του πειράματος τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια παρασκευάστηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D 790 και κόπηκαν σε διαστάσεις τέτοιες ώστε να καλύπτεται το μήκος στήριξης όπως απαιτείται από αυτήν. Τα δοκίμια με περιεκτικότητα σε κόκκους 0%, 5%,10% και 20% των οποίων η απόχυση έγινε σε καλούπι ανοίγματος (πάχος δοκιμίου) 3 mm κόπηκαν σε διαστάσεις ώστε να καλύπτεται το μήκος στήριξης των 76mm και πλάτος 13mm. Τα δοκίμια με

περιεκτικότητα σε κόκκους 30% με πάχος 4.5 mm κόπηκαν σε διαστάσεις ώστε να καλύπτεται το μήκος στήριξης των 102mm και πλάτος 13mm. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν 5 δοκίμια για κάθε περιεκτικότητα (0%, 5%, 10%, 20% και 30%) δηλαδή συνολικά 25 δοκίμια, έτσι ώστε να εξετασθούν για κάθε δείγμα σε περίπτωση ισοτρόπων υλικών η δοκιμίων από το ίδιο καλούπι, λόγω της στατιστικής διασποράς των τιμών μέτρησης στα ψαθυρά υλικά.

### **3.1.9. Περιγραφή λειτουργίας ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης**

Η ονομασία "Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σαρώσεως" αποσκοπεί στο να εντάξει το όργανο αυτό στην ίδια κατηγορία με άλλα οικεία όργανα, τα οποία σχηματίζουν την εικόνα μέσω εστίασης στο χώρο ( οπτικά μικροσκόπια, συμβατικά ηλεκτρονικά μικροσκόπια, τηλεσκόπια ,προβολείς-slide, ανθρώπινο μάτι κ.α.) παρά να υποδεικνύει καθαρά ότι πρόκειται για ένα όργανο που ανήκει σ'εκείνη την κατηγορία, στην οποία η εικόνα σχηματίζεται μέσω σημείων χρονικής διαδοχής.

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σαρώσεως (Η.Μ.Σ.) δημιουργεί την εικόνα του δείγματος με τη χρήση μιας ρυθμιζόμενης ηλεκτρονικής δέσμης ακτίνων, η οποία σαρώνει εγκάρσια την επιφάνεια του δείγματος όμοια με μια ηλεκτρονική δέσμη ακτίνων, που κινείται εγκάρσια στην επιφάνεια μιας τηλεοπτικής οθόνης.

Η κάθε ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα σημείο του δοκιμίου συλλέγεται, ενισχύεται και η διαφορά στην ένταση χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της φωτεινότητας στην καθοδική λυχνία της οθόνης.

Το βασικό γεγονός είναι ότι με το Η.Μ.Σ. μπορούν να προσδιοριστούν ορισμένες γραφικές ιδιότητες του δοκιμίου. Αυτό αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του. Για αυτό το λόγο το Η.Μ.Σ. μπορεί να απεικονίζει επιφάνειες που βρίσκονται σε πολλά επίπεδα εστίασης με τη βοήθεια του μεγάλου βάθους εστίασης.

Για να έχουμε μια καλύτερη γενική ιδέα για τον τρόπο που σχηματίζεται η "ηλεκτρονική" αυτή εικόνα, θα πρέπει να κάνουμε μια σύντομη αναδρομή σε ορισμένες αρχές της φυσικής στερεών σωμάτων που έχουν σχέση με την αλληλεπίδραση μεταξύ δέσμης ηλεκτρονίων και δοκιμίου.

Έτσι μια σειρά πολλών αλληλεπιδράσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί, όταν μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων πέφτει με μεγάλη ενέργεια πάνω στην επιφάνεια του



δοκιμίου. Τα αποτελέσματα αυτών των αλληλεπιδράσεων, λαμβάνονται με κατάλληλους ανιχνευτές και στη συνέχεια αφού ενισχυθούν, εκθέτονται σε καθοδική λυχνία σημείο προς σημείο, έτσι ώστε να συμπίπτουν χρονικά με τη θέση που βρίσκεται η ηλεκτρονική θέση πάνω στο δείγμα.

Για την κατανόηση της φύσης των παραπάνω αλληλεπιδράσεων είναι απαραίτητο να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Καθώς η ηλεκτρονική δέσμη "πρωτογενών" ηλεκτρονίων πύπτει στην επιφάνεια του δοκιμίου αλληλεπιδρά ταυτόχρονα ελαστικά και μη ελαστικά με αυτό. Στις ελαστικές κρούσεις τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια της προσπίπτουσας δέσμης αλλάζουν τη διεύθυνση τους χωρίς μεγάλη απώλεια ενέργειας. Μερικά από αυτά, τα ονομαζόμενα "ανακλώμενα" ηλεκτρόνια υπακούουν το νόμο των συνημιτόνων και λόγω της μεγάλης πυκνότητας τους είναι ευδιάκριτα σε μικρή απόσταση πάνω από την επιφάνεια του δείγματος. Ο αριθμός των ανακλώμενων ηλεκτρονίων ελαττώνεται και πλησιάζει στο μηδέν όταν η διεύθυνση της δέσμης των ηλεκτρονίων γίνεται παράλληλη προς την επιφάνεια του δείγματος. Τα ανακλώμενα είναι υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια και η ικανότητα ανίχνευσης τους εξαρτάται από την τοποθεσία τους και τη γωνία εισόδου τους.

Από την ελαστική επίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με την επιφάνεια του δείγματος δημιουργούνται ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινών X. Υπάρχουν δύο τύποι ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας, τα Auger, τα οποία συνήθως δεν μπορούν να ανιχνευτούν με το Η.Μ.Σ. και τα δευτερογενή όπου κινούνται με ενέργεια 3-10 eV. Τα τελευταία έχουν τόσο χαμηλή ενέργεια έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση τους. Ο ανιχνευτής πρέπει να είναι πλαισιωμένος με ένα θετικά πολωμένο ηλεκτρικό πλέγμα, που θα προσελκύει τα ηλεκτρόνια.

Οι παραπάνω πληροφορίες παρέχονται από το Η.Μ.Σ. και τα όργανα ανίχνευσης με τη χρησιμοποίηση διαφόρων παραμέτρων, στις οποίες περιλαμβάνονται η τάση με την οποία επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια καθώς και η διάμετρος της ηλεκτρονικής δέσμης. Γενικά θεωρείται πως όσο ψηλότερη είναι η τάση και όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της ηλεκτρονικής δέσμης τόσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία με την οποία η διάδοση μετατρέπεται σε σήμα και τόσο πιο καθαρή γίνεται η εικόνα.

Καθώς αυξάνεται η μεγέθυνση, το ίχνος της δέσμης της δέσμης πρέπει να μικραίνει για να υπάρχει καλή ανάλυση του δείγματος. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια παρέχουν

πληροφορίες για τις ιδιότητες του υλικού που βρίσκεται κοντά την επιφάνεια του δοκιμίου. Τα ανακλώμενα ηλεκτρόνια, λόγω της υψηλότερης ενέργειας που διαθέτουν, παρέχουν πληροφορίες για μεγαλύτερα βάθη με λιγότερο απαιτούμενη ενέργεια. Τα σήματα που παρέχουν οι ακτίνες X και το κενό έρχονται από ακόμη μεγαλύτερα βάθη και για τη δημιουργία τους απαιτείται η ελάχιστη ανάλυση του ίχνους της δέσμης και της αλληλεπίδρασης.

Η εικόνα δημιουργείται με τη βοήθεια του ανιχνευτή των δευτερογενών ηλεκτρονίων και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που παρατηρείται. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία της εικόνας είναι η ύπαρξη ενός στρώματος υλικού καλής αγωγιμότητας, όπως είναι ο χρυσός ή χρυσός-παλλάδιο, με το οποίο εξαχνώνεται η επιφάνεια του δείγματος, όταν αυτό δεν είναι καλός αγωγός.

Το βάθος διείσδυσης των πρωτογενών ηλεκτρονίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του υλικού. Τα πιο συμπαγή υλικά, επιτρέπουν μικρότερη διείσδυση και δημιουργούν μεγάλο αριθμό ευδιάκριτων ανακλώμενων ηλεκτρονίων.

Έτσι η αύξηση της πυκνότητας αυξάνει τη λαμπρότητα της εικόνας. Αυτή η διαφορά της έντασης των ανακλώμενων ηλεκτρονίων συνδέεται με ένα μεγάλο αριθμό ατομικών συγκρίσεων, οι οποίες είναι χρήσιμες όταν εξετάζουμε σύνθετα υλικά, όπως είναι το τσιμεντοκονίαμα, το οποίο είναι φτιαγμένο από υλικά διαφορετικών πυκνοτήτων.

Η ικανότητα των ανακλώμενων ηλεκτρονίων να παρέχουν συγκρίσεις σε επίπεδο ατόμων, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον εντοπισμό των ρωγμών καθώς αυτές είναι περιοχές χαμηλής πυκνότητας και εμφανίζονται στην οθόνη πιο σκούρες από την υπόλοιπη επιφάνεια. Αν η ρωγμή έχει γίνει υπό σχετικά μεγάλη γωνία, τότε τα ανακλώμενα ηλεκτρόνια αποδεικνύονται πολύ αποτελεσματικά στον εντοπισμό της. Από την άλλη, αν η ρωγμή έχει γίνει υπό σχετικά μικρή γωνία, το οποίο συμβαίνει όταν το δείγμα στην περιοχή που τελειώνει η ρωγμή, περιέχει σημαντική ποσότητα υλικού αλληλεπιδρά, τότε η αποτελεσματικότητα των ανακλώμενων ηλεκτρονίων είναι μικρή. Στην τελευταία περίπτωση, εάν ελαττώσουμε την ενέργεια των πρωτογενών ηλεκτρονίων, τότε ελαττώνεται ταυτόχρονα και η ένταση της αλληλεπίδρασης, οπότε τα ανακλώμενα ηλεκτρόνια γίνονται πιο αποτελεσματικά. Τέλος μπορούμε να ξεπεράσουμε το παραπάνω εμπόδιο δημιουργώντας την εικόνα

με την ταυτόχρονη χρήση των σημάτων που δίνουν τα δευτερογενή και ανακλώμενα ηλεκτρόνια.

### **3.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ**

Σκοπός των πειραμάτων ήταν η μελέτη της τάσης θραύσης  $\sigma_c$ , του μέτρου ελαστικότητας  $E_c$ , της παραμόρφωσης  $\varepsilon_c$  και του λόγου Poisson ως συνάρτηση της περιεκτικότητας, του ποσοστού πλαστικοποιητή και της παραμονής των δοκιμίων σε αποσταγμένο ύδωρ, όποτε αυτά απορροφούν κάποιο ποσοστό υγρασίας εντός περιόδου 14 ημερών.

Το πείραμα που εκτελέστηκε για την εύρεση των ελαστικών σταθερών ήταν κάμψη 3 σημείων. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων αυτών τα στελέχη στηρίξεως και φορτίσεως τοποθετήθηκαν έτσι ώστε οι άκρες των κυλινδρικών επιφανειών να είναι παράλληλες και η απόσταση μεταξύ των στελεχών φορτίσεως να είναι το ένα τρίτο του μήκους στηρίξεως.

Χρησιμοποιήθηκαν 2 ηλεκτρομηκυσιομέτρα ( strain gages ) τύπου KYOWA KFG - 5 - 120 - D16 -11 κάθετα μεταξύ τους και στην συνέχεια συνδέθηκαν με μια ηλεκτρική γέφυρα έτσι ώστε να δώσει τις παραμορφώσεις του φορτίου στη μηχανή Instron. Οι ενδείξεις ηλεκτρομηκυσιομέτρων ελήφθησαν μέσω ενός αυτόματου ψηφιακού μετατροπέα, για να προκύψουν έτσι οι εγκάρσιες ( $\varepsilon_y$ ) και οι διαμήκεις ( $\varepsilon_x$ ) παραμορφώσεις. Έτσι προέκυψαν τα διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης για δοκίμια χωρίς υγρασία.

Για την μελέτη σε υγρασία δύο δοκίμια (0%, 10%, 20%, 30% και 40%), μετά από παραμονή σε θερμοπανιέρα, σκουπίστηκαν και κολλήθηκαν επάνω τους strain gages. Μετά την πλήρη σταθεροποίηση των gages πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα κάμψης. Το ίδιο έγινε μετά από παραμονή 7 και 14 ημερών (κορεσμός) σε θερμοπανιέρα. Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν τα διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης.

Η τάση που παρατηρείται ανάμεσα στα δυο στελέχη σε κάμψη δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma = \frac{3Pa}{bh^2}$$

όπου:

- "σ" η τάση θραύσης σε MN/m<sup>2</sup>
- "P" το φορτίο στη δεδομένη θέση MN
- "α" η απόσταση μεταξύ του σημείου στήριξης και του στελέχους φόρτισης
- "b" το πλάτος του δοκιμίου m
- "h" το πάχος του δοκιμίου m

### **3.3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

#### **3.3.1. Μέτρο ελαστικότητας**

Εδώ έχουμε να συγκρίνουμε τις πειραματικές τιμές των μέτρων ελαστικότητας ( σε σχέση με το ποσοστό εγκλείσματος) που εμείς υπολογίσαμε από το πείραμα κάμψης 3 σημείων με τις θεωρητικές τιμές οι οποίες προήλθαν από τις σχέσεις των ερευνητών που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό θα κάνουμε για τις 3 διαφορετικές περιεκτικότητες σε πλαστικοποιητή ξεχωριστά, με σκοπό να εξετάσουμε τη συμβολή του στο μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου και παράλληλα το ποσοστό ταύτισης των θεωρητικών μοντέλων με τις πειραματικές τιμές δοκιμίων που περιέχουν πλαστικοποιητή. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις:

Ποσοστό εγκλείσματος	Μέτρο ελαστικότητας(GPa)		
	Πλαστικοποιητής 0 p.h.r	Πλαστικοποιητής 17 p.h.r	Πλαστικοποιητής 35 p.h.r
0%	3,41	2,31	2,03
5%	3,66	3,5	2,48
10%	5,25	3,74	3,8
20%	5,38	4,08	4,15
30%	6,4	5,62	6,6

Έτσι ξεκινώντας για 0 p.h.r πλαστικοποιητή στα διαγράμματα Δ1,Δ2 έχουμε να παρατηρήσουμε την αναμενόμενη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας καθώς

αυξάνεται η περιεκτικότητα σε έγκλεισμα εφόσον το έγκλεισμα είναι καθαρά ελαστικό υλικό, ενώ η μήτρα είναι βισκοελαστικό υλικό με το πρώτο να έχει πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Έτσι με την προσθήκη εγκλείσματος στην μήτρα αποδυναμώνεται η βισκοελαστική συμπεριφορά της και αυξάνεται η ελαστική των κόκκων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα με την προσθήκη του εγκλείσματος το υλικό να συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ψαθυρό και λιγότερο όλκιμο.

Στο διάγραμμα Δ3 φαίνεται ότι τα μοντέλα των Einstein, Kerner και Halpin & Tsai προσεγγίζουν καλύτερα τις πειραματικές τιμές ( με γραμμές απόκλισης 10% από τις πειραματικές ). Έπειτα έγινε για τα τρία αυτά μοντέλα η προσαρμοσμένη καμπύλη 1ου βαθμού και έγινε σύγκριση του συντελεστή διεύθυνσης με αυτόν των πειραματικών δεδομένων στα διαγράμματα Δ4,Δ5,Δ6.

Η ίδια διαδικασία έγινε για τις μετρήσεις με 17 p.h.r πλαστικοποιητή (Δ7,Δ8,Δ9) όπου εδώ παρατηρήθηκε καλύτερη σύγκλιση ( πάλι στα όρια του 10% των πειραματικών τιμών ) με τα μοντέλα των Mooney, Counto και Halpin & Tsai και με προσαρμοσμένη καμπύλη γίνεται σύγκριση των συντελεστών διεύθυνσης στα διαγράμματα Δ10,Δ11 και Δ12.

Όμοια για μετρήσεις 35 p.h.r πλαστικοποιητή (Δ13,Δ14,Δ15) όπου η καλύτερη πρόβλεψη έγινε από το μοντέλο των Guth & Smallwood όπως φαίνεται και από τους συντελεστές διεύθυνσης στο διάγραμμα Δ16.

Στο διάγραμμα Δ17 βλέπουμε τα πειραματικά αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας για τις τρεις περιεκτικότητες σε πλαστικοποιητή και στο Δ18 βλέπουμε πάλι το μέτρο ελαστικότητας αυτή τη φορά όμως (συναρτήσει) της αύξησης του ποσοστού πλαστικοποιητή με κάθε σειρά σημείων να αφορά σταθερή περιεκτικότητα σε έγκλεισμα. Παρατηρούμε ότι η αύξηση της περιεκτικότητας του πλαστικοποιητή επιφέρει μια μείωση των αντίστοιχων τιμών του μέτρου ελαστικότητας για κάθε περιεκτικότητα σε έγκλεισμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό γίνεται λιγότερο ψαθυρό ή περισσότερο όλκιμο. Φαίνεται επίσης στο Δ18 ότι για περιεκτικότητες σε έγκλεισμα άνω του 10% το μέτρο ελαστικότητας να είναι σχεδόν το ίδιο για 17 p.h.r και 35 p.h.r πλαστικοποιητή.

Παρακάτω, απεικονίζονται τα θεωρητικά μοντέλα μαζί με τις πειραματικές τιμές του σιδήρου σε εφελκυσμό (Σ1,Σ2), σε κάμψη (Σ3,Σ4) και του αλουμινίου (Α1,Α2) σε εφελκυσμό τα οποία είναι ήδη γνωστά έτσι ώστε να γίνει καλύτερη εκτίμηση του

μοντέλου το οποίο μπορεί να προβλέψει με μεγαλύτερη ακρίβεια την μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας.

Συγκεντρωτικά, παρατηρούμε αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων που σε ορισμένες περιπτώσεις οφείλονται στο γεγονός ότι οι παραδοχές που ακολούθησαν οι διάφοροι ερευνητές κατά την κατασκευή των θεωρητικών μοντέλων διαφέρουν αρκετά από τις πραγματικές συνθήκες του εργαστηρίου. Οι ερευνητές χρησιμοποιούν στις θεωρίες τους τελειώς σφαιρικούς κόκκους εγκλείσματος και επιπλέον στην πραγματικότητα υπάρχουν συσσωματώματα κόκκων και όχι μεμονωμένοι κόκκοι όπως θέλουν τα περισσότερα μοντέλα. Τα συσσωματώματα των κόκκων εγκλωβίζουν ανάμεσα τους και αέρα με αποτέλεσμα τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας. Τέλος δεν λαμβάνεται υπόψη και ο σημαντικός παράγοντας της αλληλεπίδρασης της μήτρας με το έγκλεισμα και τη δημιουργία φάσης (μεσοφάσης) εκτός από την φάση 1 (μήτρα) και τη φάση 2 (έγκλεισμα).

Παρόλα τα παραπάνω, διαπιστώνουμε ότι με αύξηση της περιεκτικότητας σε έγκλεισμα αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας. Η εξήγηση του γεγονότος αυτού έγκειται στο ότι το έγκλεισμα είναι καθαρά ελαστικό υλικό, ενώ η μήτρα είναι καθαρά βισκοελαστικό υλικό και στο ότι το πρώτο έχει πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από το δεύτερο. Έτσι η προσθήκη εγκλείσματος στη μήτρα αποδυναμώνει τη βισκοελαστική συμπεριφορά της και αυξάνει την ελαστική των κόκκων.

<b>Ποσοστό εγκλείσματος</b>	<b>Ecom(GPa) (εφελκυσμός)</b>	<b>Ecom(GPa) (κάμψη)</b>	<b>Ecom(GPa) (εφελκυσμού)</b>
<b>Uf</b>	<b>Μήτρα σιδήρου</b>		<b>Μήτρα αλουμινίου</b>
0%	3,5	3,5	3,5
5%	4,33	4,15	3,89
10%	4,85	4,55	4,32

15%	5,24	5,05	4,88
20%	6,37	5,65	5,38
30%	7,04	6,4	6,74

### 3.3.2. Τάση

Στην παράγραφο αυτή θα σχολιάσουμε τις πειραματικές καμπύλες για την τάση θραύσης που λάβαμε με το πείραμα κάμψης με τις θεωρητικές καμπύλες που ελήφθησαν από τα μοντέλα των Nielsen (εξ. 2.19), Nikolais & Narkis (εξ. 2.20), Schragger (εξ. 2.26) και Halpin & Tsai (εξ.2.13) ξανά σε τρεις διαφορετικές περιεκτικότητες πλαστικοποιητή (0 p.h.r., 17 p.h.r., 35 p.h.r.). Παρακάτω παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις:

Ποσοστό εγκλείσματος	Τάση(MPa)		
	Πλαστικοποιητής 0 p.h.r	Πλαστικοποιητής 17 p.h.r	Πλαστικοποιητής 35 p.h.r
0%	2,98	2,4	2,8
5%	3,65	3,38	3,3
10%	3,95	4	3,85
15%	4,26	4,34	4,22
20%	4,55	4,62	4,58

Στα διαγράμματα T1,T2,T3 παρατηρούμε ότι οι πειραματικές τιμές εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά από την προβλεπόμενη μέσω των μοντέλων. Έχουμε και για τις θεωρητικές μελέτες των Nielsen, Nikolais & Narkis και Schragger μείωση της τάσης θραύσης κατά την αύξηση περιεκτικότητας σε κόκκους SiC. Αντίθετα οι πειραματικές εμφανίζουν μια αύξηση της τιμής της τάσης θραύσης με την αύξηση της περιεκτικότητας. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί με το ότι για κάθε ψαθυρό

υλικό, η αντοχή σε θλίψη είναι πιο μεγάλη από ότι σε εφελκυσμό. Γνωρίζουμε ότι κατά την κάμψη εμφανίζονται τόσο φαινόμενα εφελκυσμού, όσο και φαινόμενα θλίψης με αποτέλεσμα ο συνδυασμός τους να μας δίνει "σχετική αύξηση" της αντοχής. Αντίθετα το μοντέλο Halpin & Tsai φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα και να ακολουθεί την ανοδική πορεία των τιμών. Χρησιμοποιώντας ως μέτρο σύγκρισης τον σίδηρο, στο διάγραμμα T6 βλέπουμε ότι μόνο το μοντέλο Halpin & Chai δεν επαληθεύει τις πειραματικές τιμές. Η παραπάνω απόκλιση αν και φαίνεται να καθιστά το μοντέλο αυτό ανίκανο να προβλέψει την μεταβολή της τάσης με την αύξηση του ποσοστού εγκλείσματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα του έχει και ο παράγοντας ζ ο οποίος αφορά το μέγεθος των εγκλεισμάτων. Έτσι μια ανομοιομορφία στο μέγεθος των εγκλεισμάτων του σιδήρου θα μπορούσε να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα.

Παρατηρούμε ακόμη, στο διάγραμμα T4, ότι αύξηση της ποσότητας του πλαστικοποιητή στο σύνθετο μειώνει την τάση θραύσης, γεγονός που ήταν αναμενόμενο αφού η χρήση του γνωρίζουμε ότι επιδεινώνει την μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Παρόλα αυτά όμως, στο ίδιο διάγραμμα βλέπουμε ότι οι τιμές της τάσης για ποσοστό εγκλείσματος 10% και παραπάνω είναι σχεδόν ίδιες ανεξαρτήτως ποσοστού πλαστικοποιητή. Αυτό γίνεται ακόμη πιο προφανές στο διάγραμμα T5 όπου η σειρά σημείων για 10%,20% και 30% ποσοστό εγκλείσματος φαίνεται να είναι μια σταθερή ευθεία. Μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα εφόσον φτάσουμε και ξεπεράσουμε το 10% εγκλείσματος η ποσότητα του πλαστικοποιητή που θα προσθέσουμε δεν θα έχει αρνητική επίδραση στην τάση θραύσης.

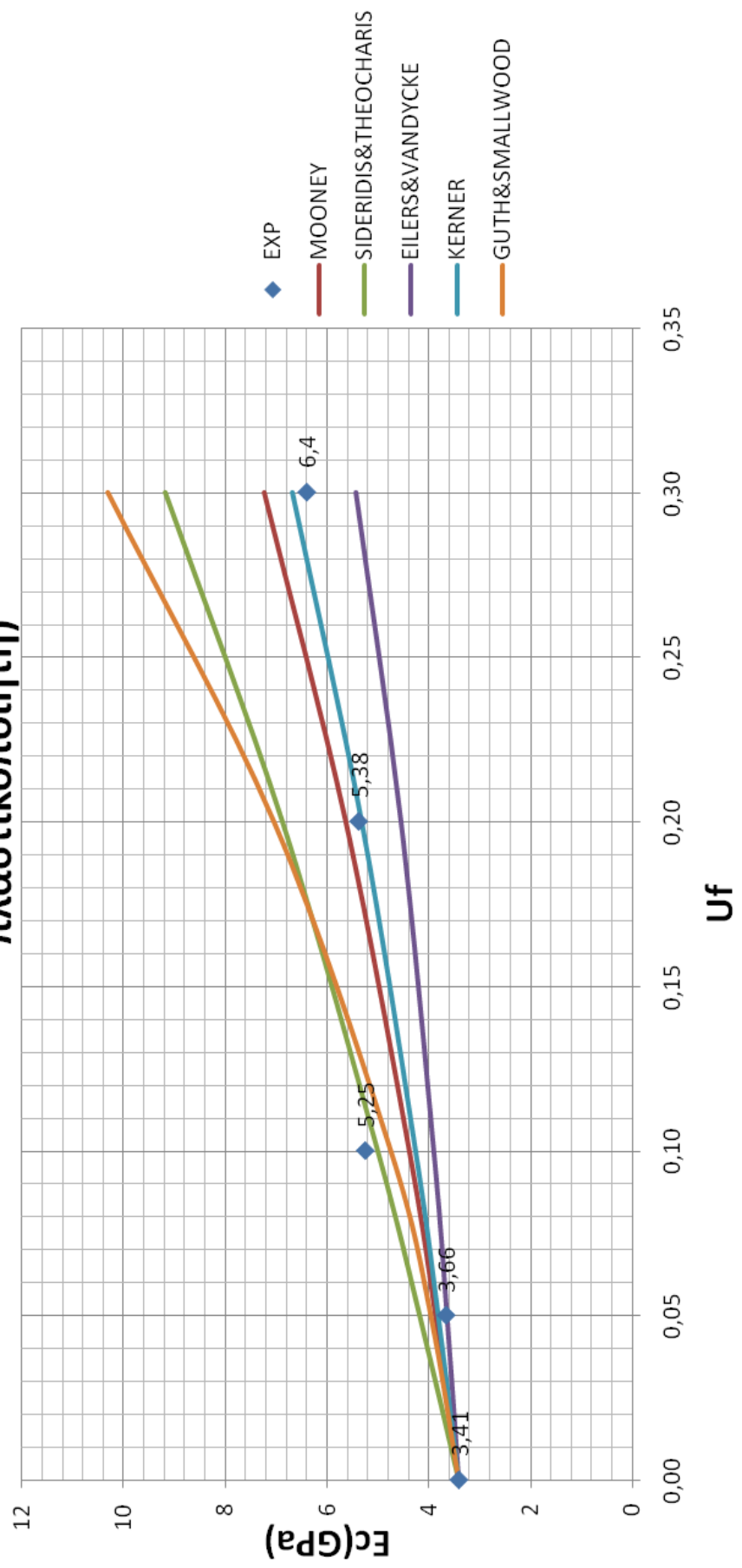
<b><math>\sigma</math>(MPa)</b>	63,2	50,1	43,8
<b>σιδήρου</b>			
<b>Uf</b>	0%	10%	15%



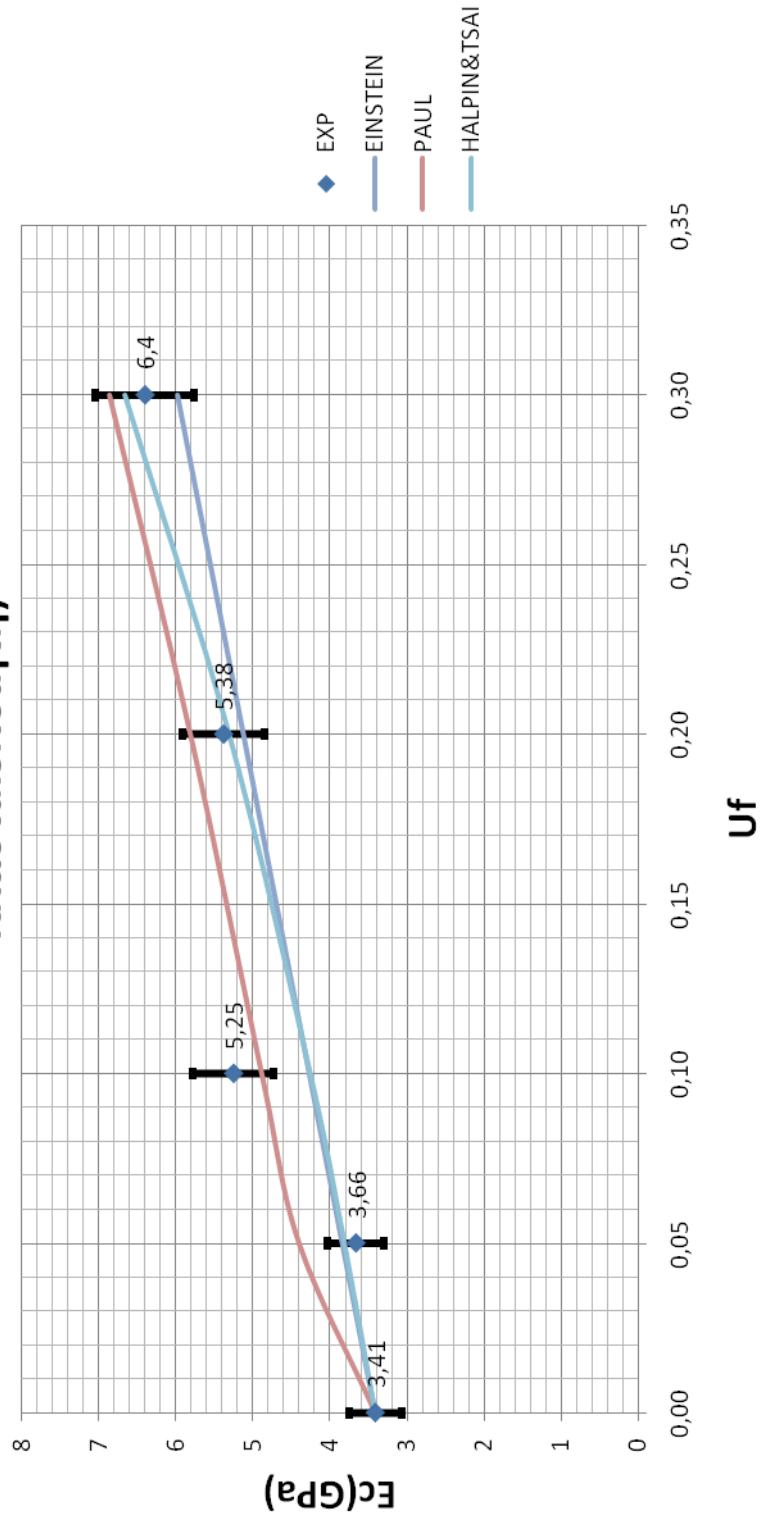
## Δ1. Μέτρο ελαστικότητας $E_{com}$ -ποσοστό κόκκων(0 p.h.r πλαστικοποιητή)



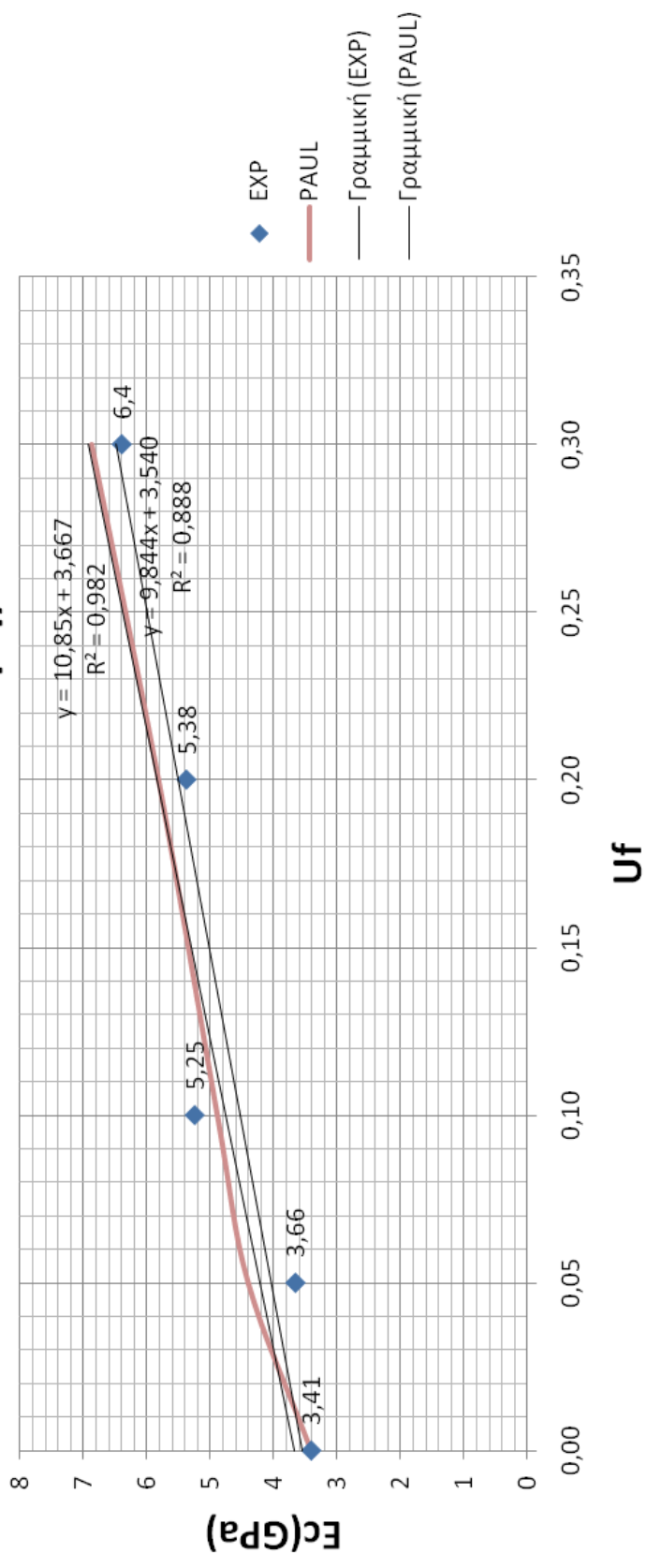
## Δ2. Μέτρο ελαστικότητας E<sub>com</sub>-ποσοστό κόκκων(0 p.h.r πλαστικοποιητή)



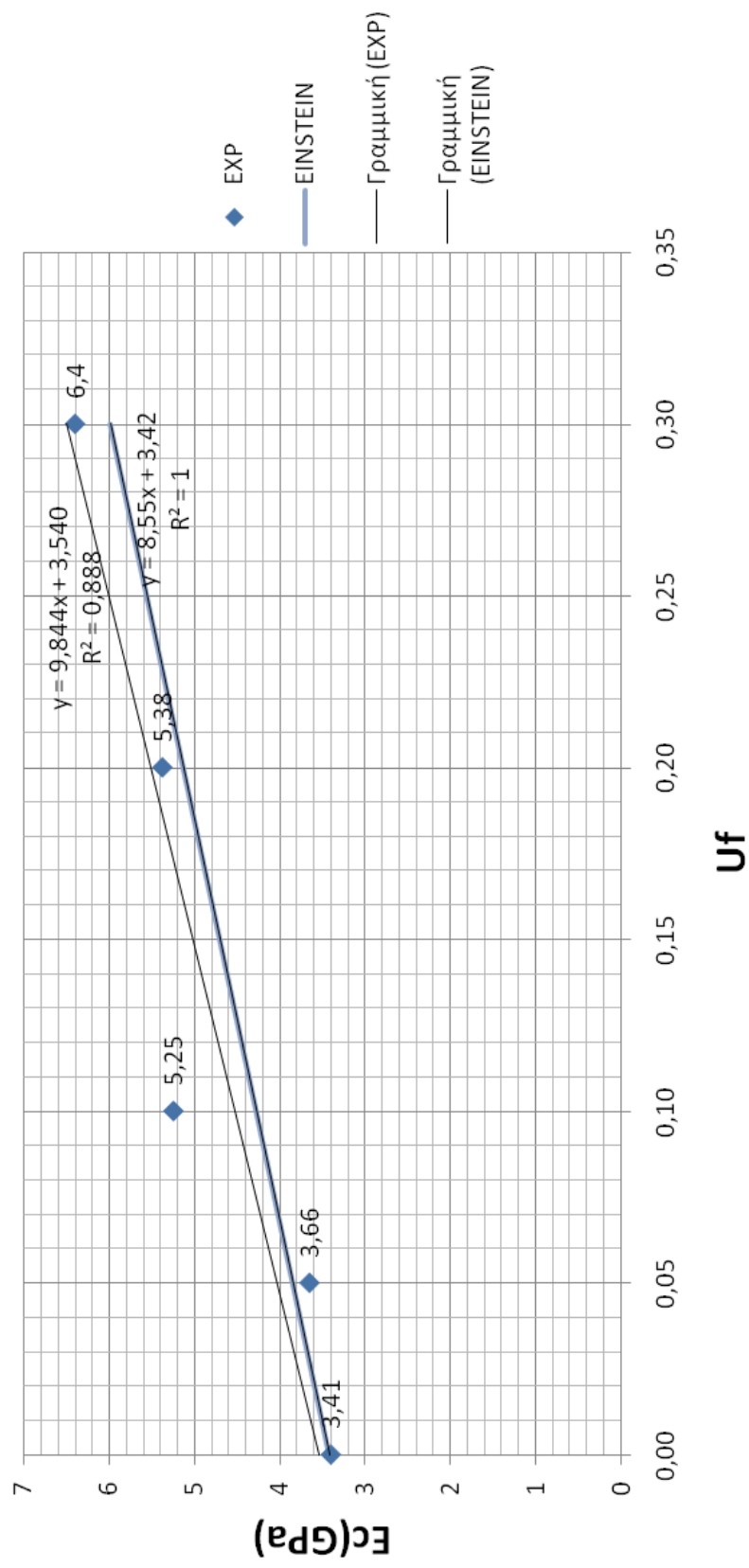
### Δ3. Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(0 p.h.r πλαστικοποιητή)



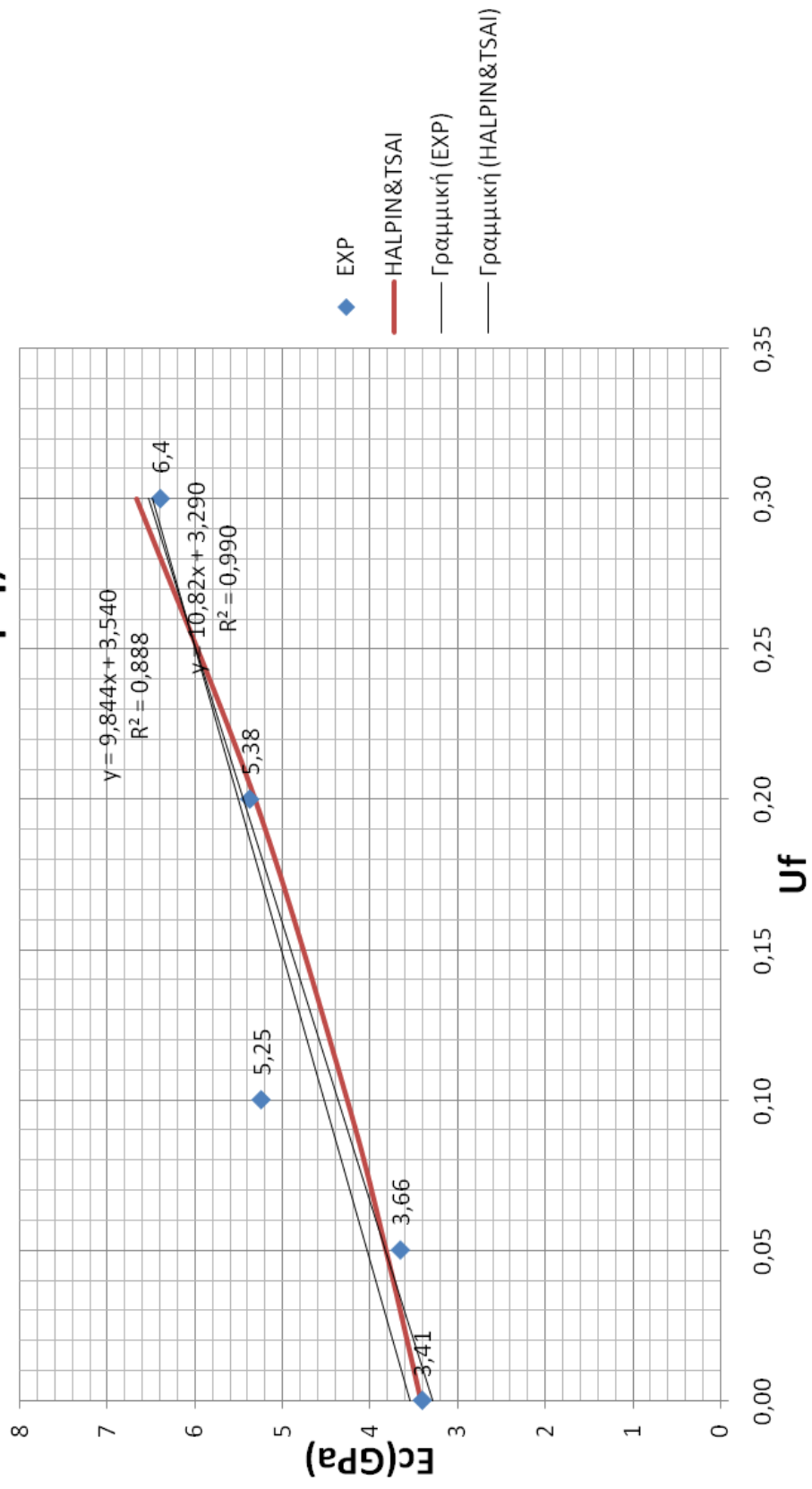
### Δ4. Μέτρο ελαστικότητας Εσομ-ποσοστό κόκκων(0 p.h.r πλαστικοποιητή)



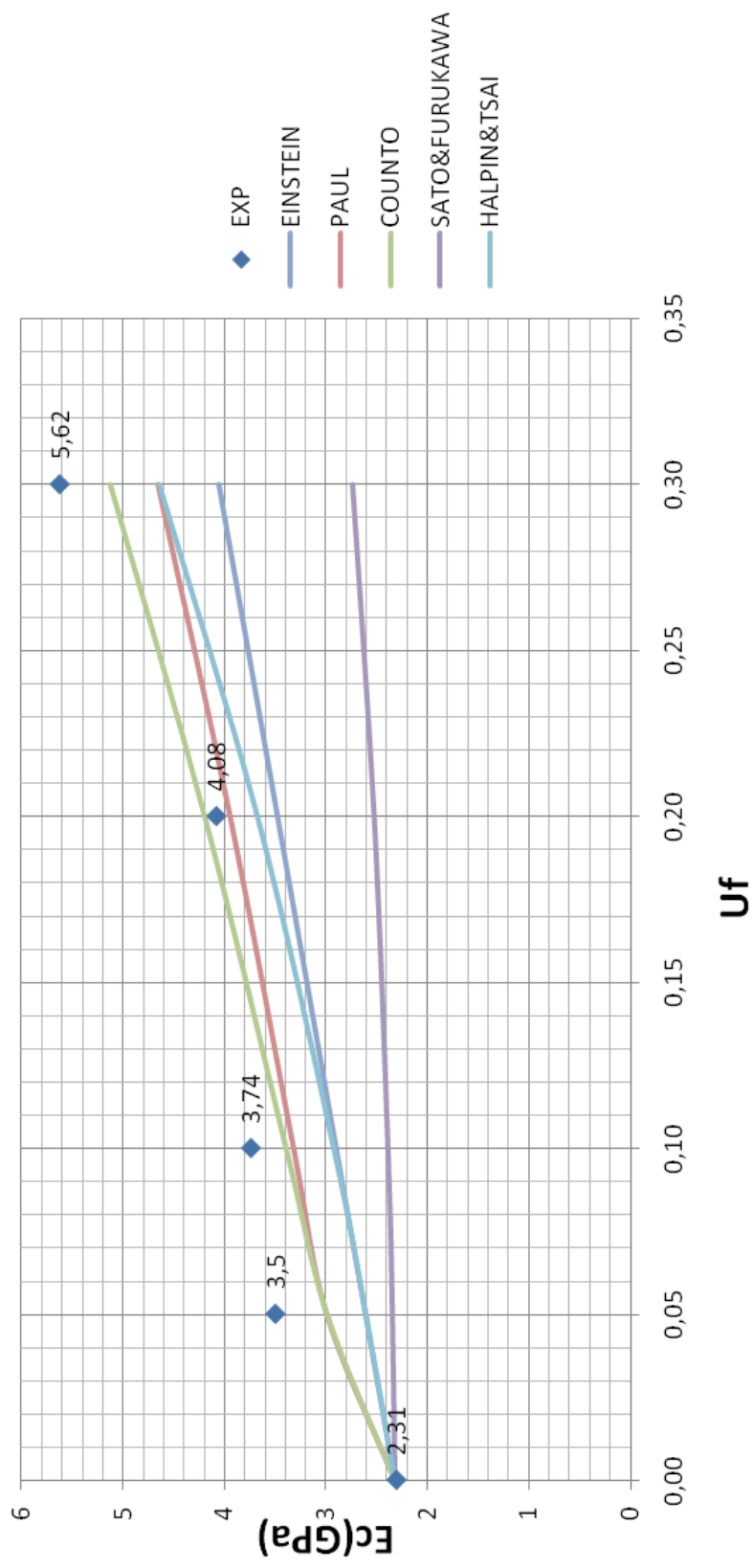
## Δ5. Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(0 p.h.r πλαστικοποιητή)



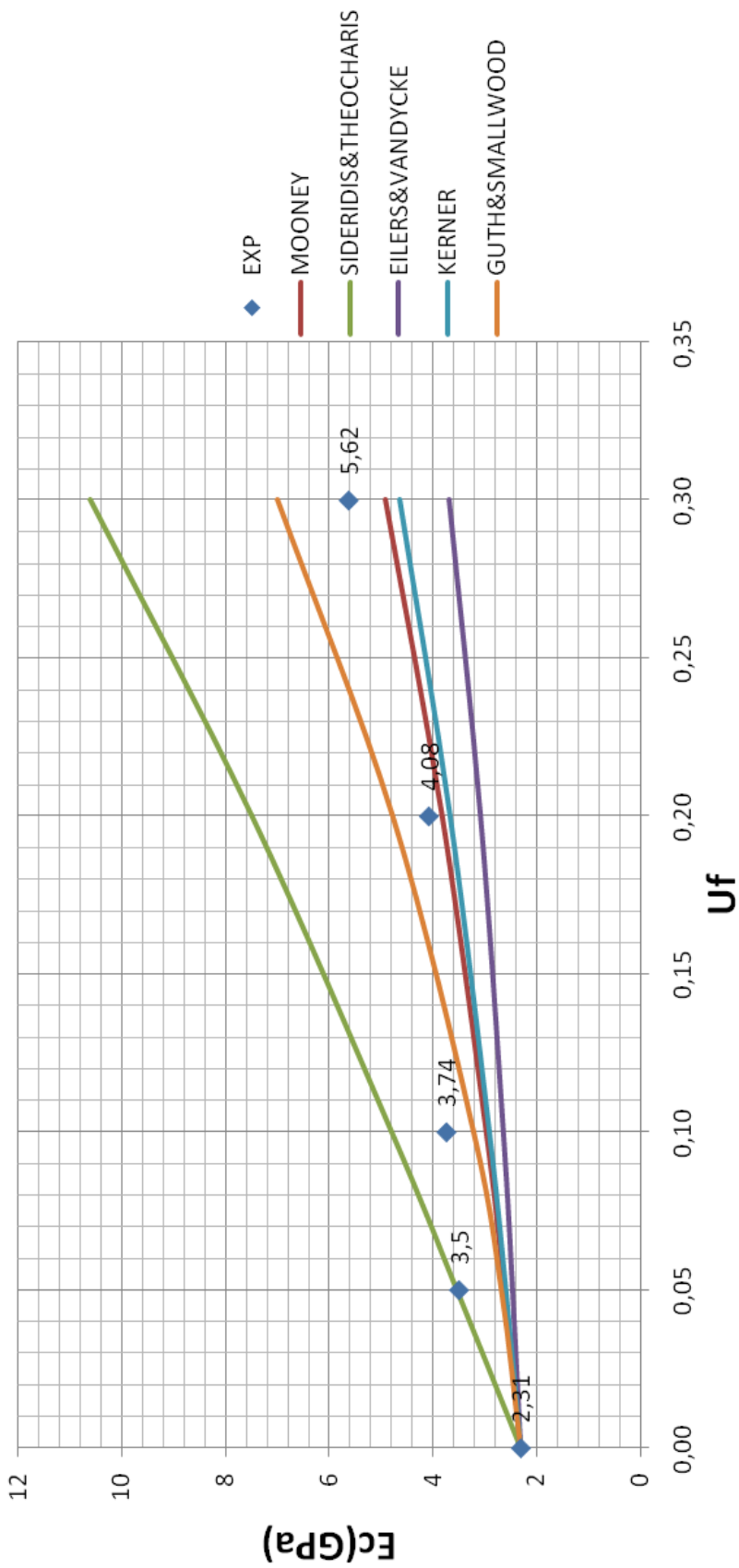
## Δ6 .Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(0 p.h.r πλαστικοποιητή)



## Δ7. Μέτρο ελαστικότητας Εσομ-ποσοστό κόκκων(17 p.h.r πλαστικοποιητή)

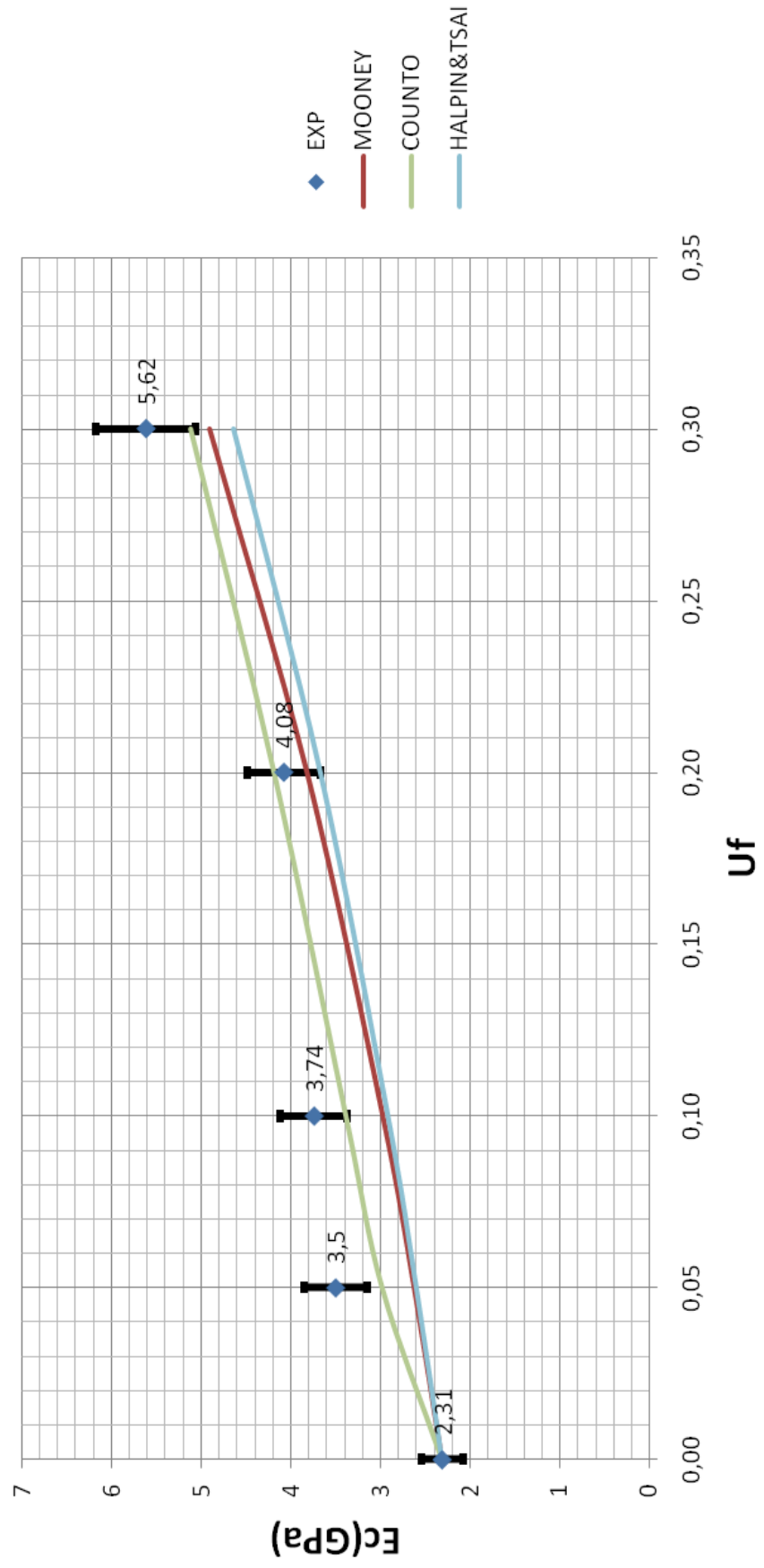


## Δ8. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-ποσοστό κόκκων(17 p.h.r πλαστικοποιητή)

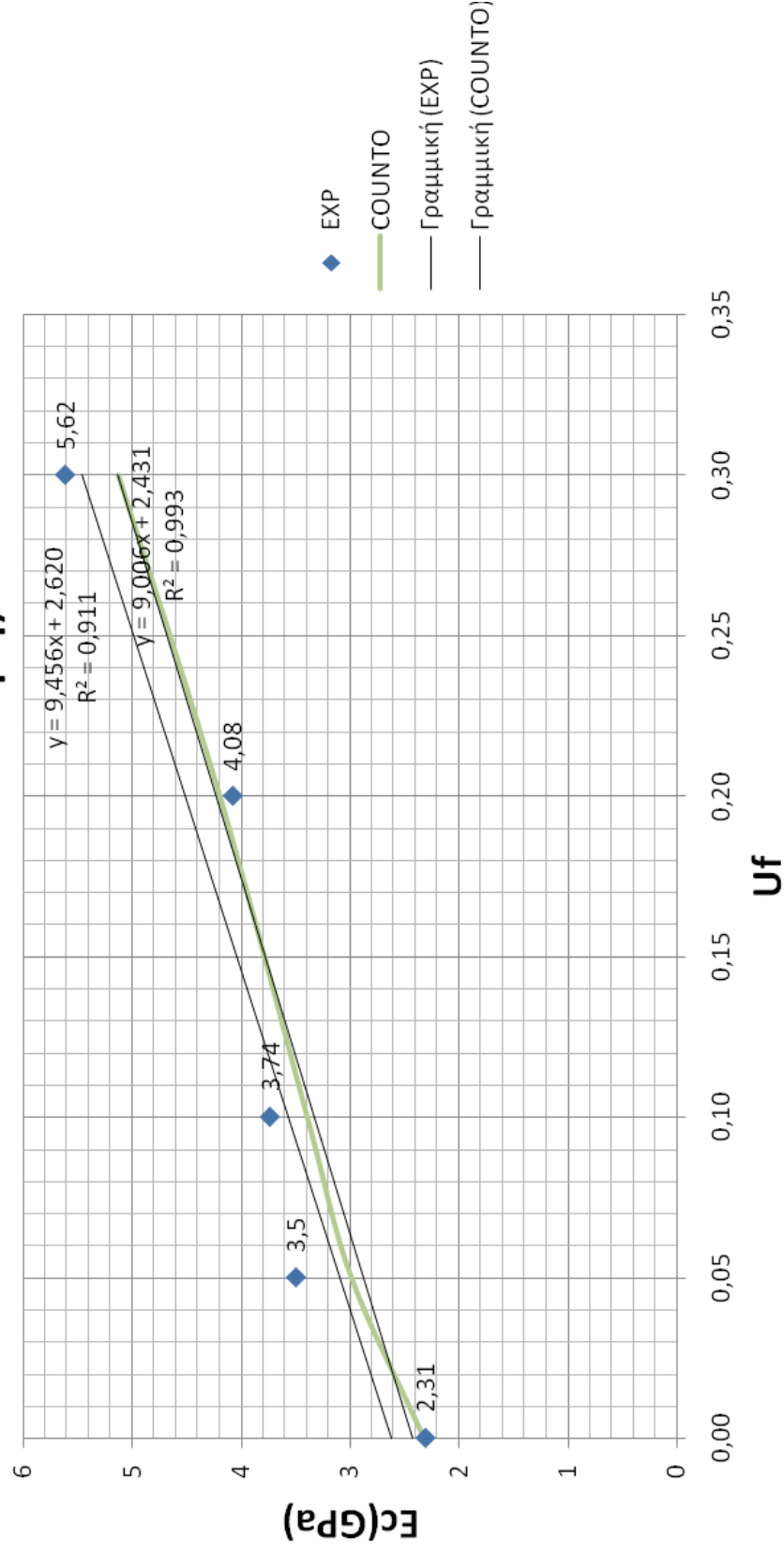




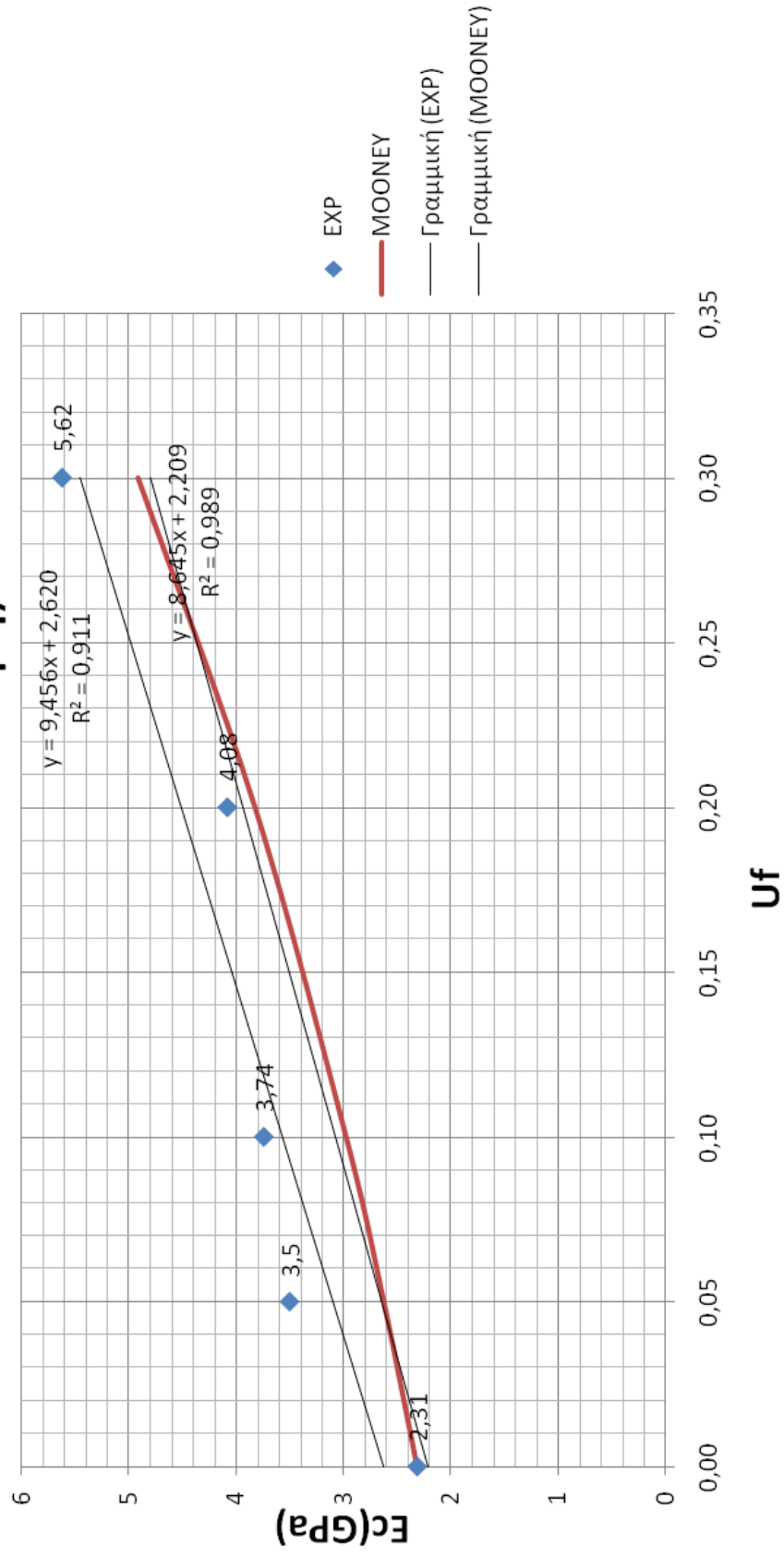
## Δ9. Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(17 p.h.r πλαστικοποιητή)



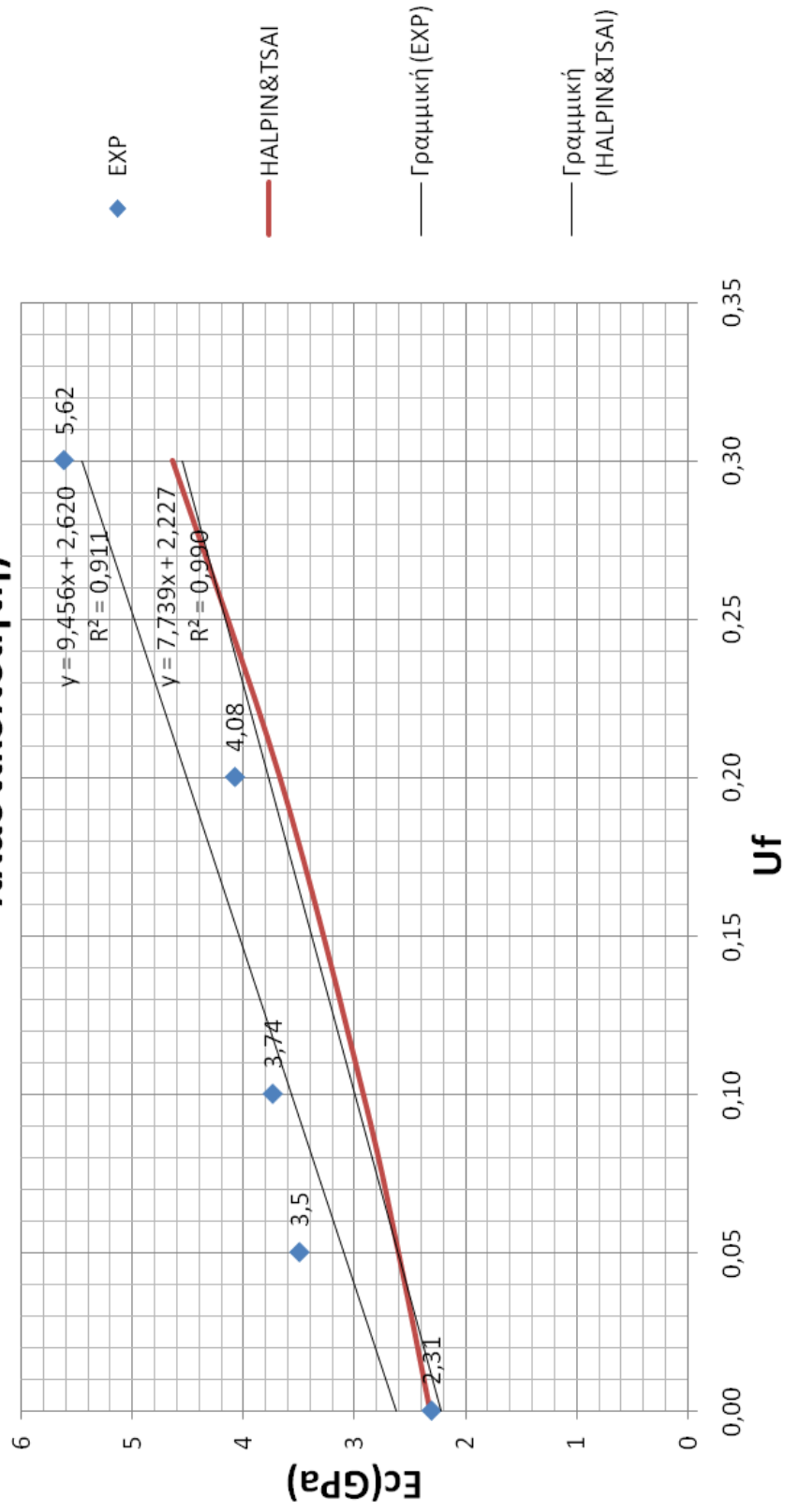
## Δ10. Μέτρο ελαστικότητας Εσom-ποσοστό κόκκων(17 p.h.r πλαστικοποιητή)



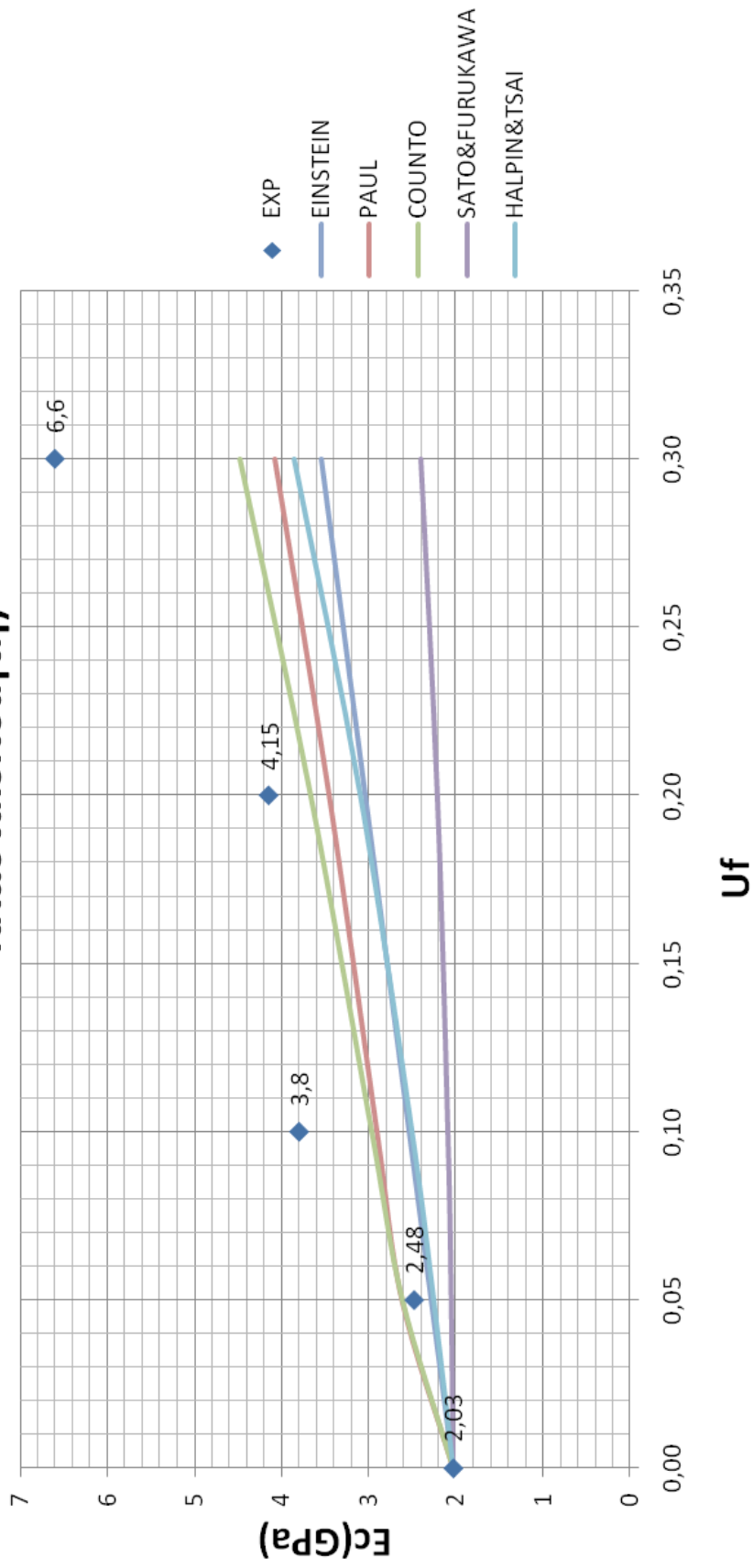
## Δ11. Μέτρο ελαστικότητας Εsom-ποσοστό κόκκων(17 ρ.h.r πλαστικοποιητή)



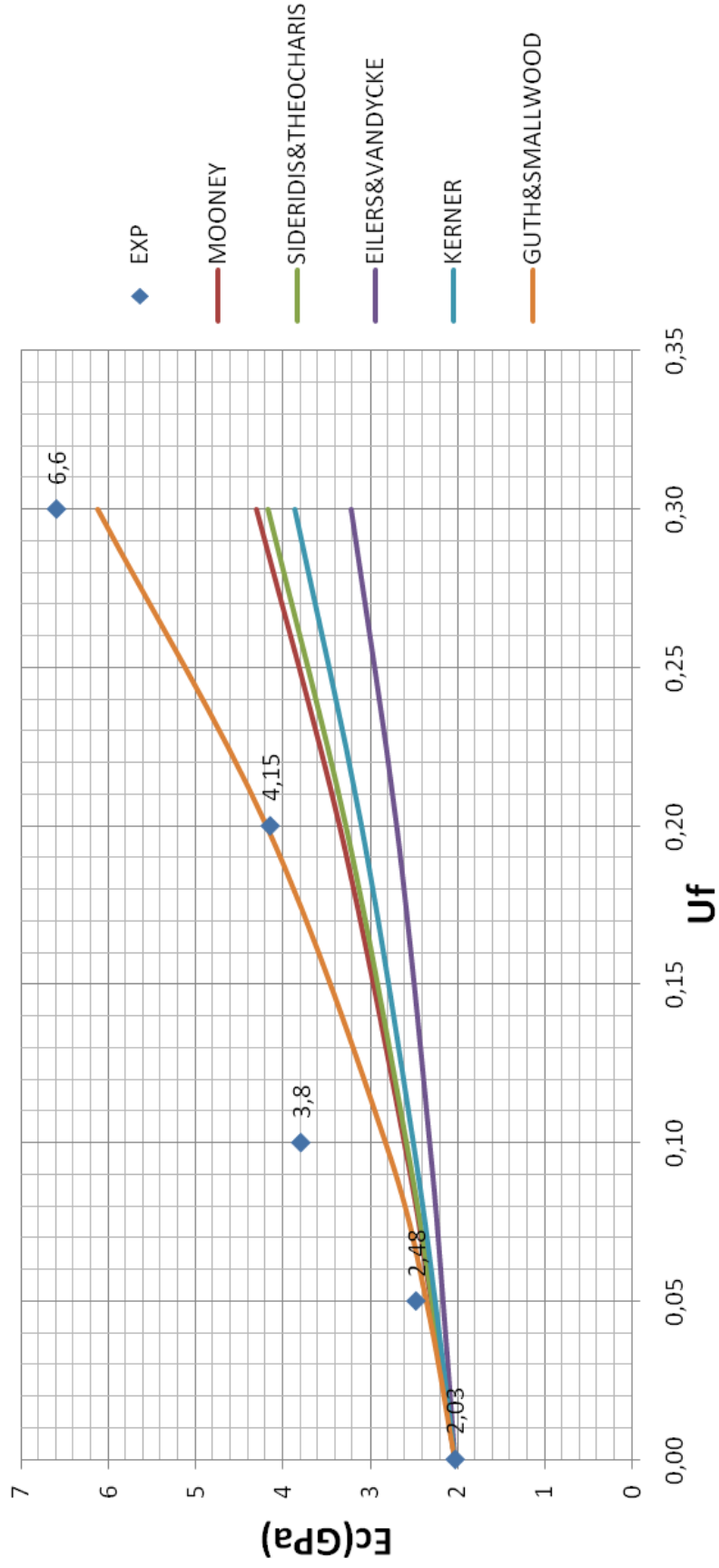
## Δ12. Μέτρο ελαστικότητας Εσομ-ποσοστό κόκκων(17 ρ.h.ρ πλαστικοποιητή)



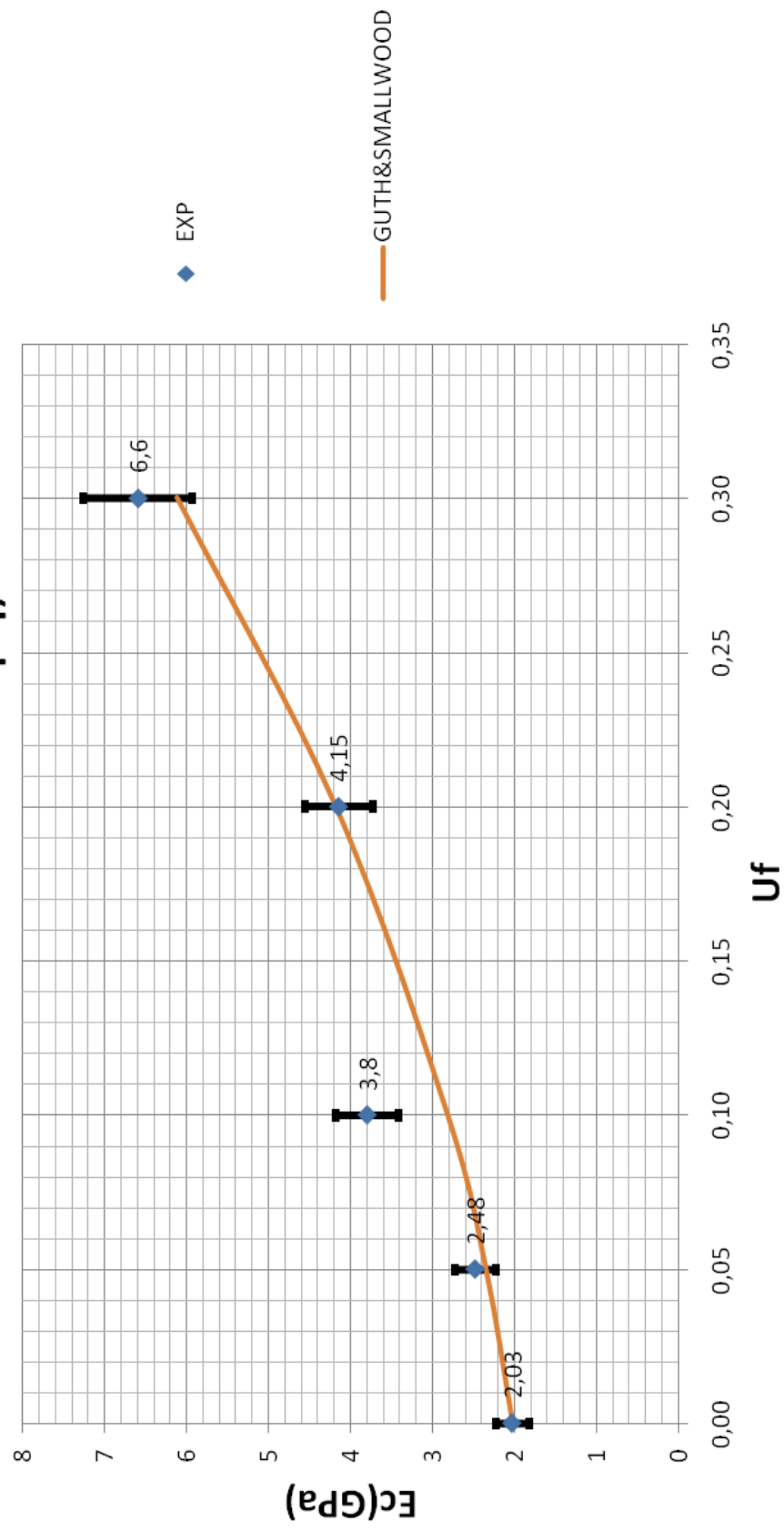
### Δ13. Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(35 p.h.r πλαστικοποιητή)



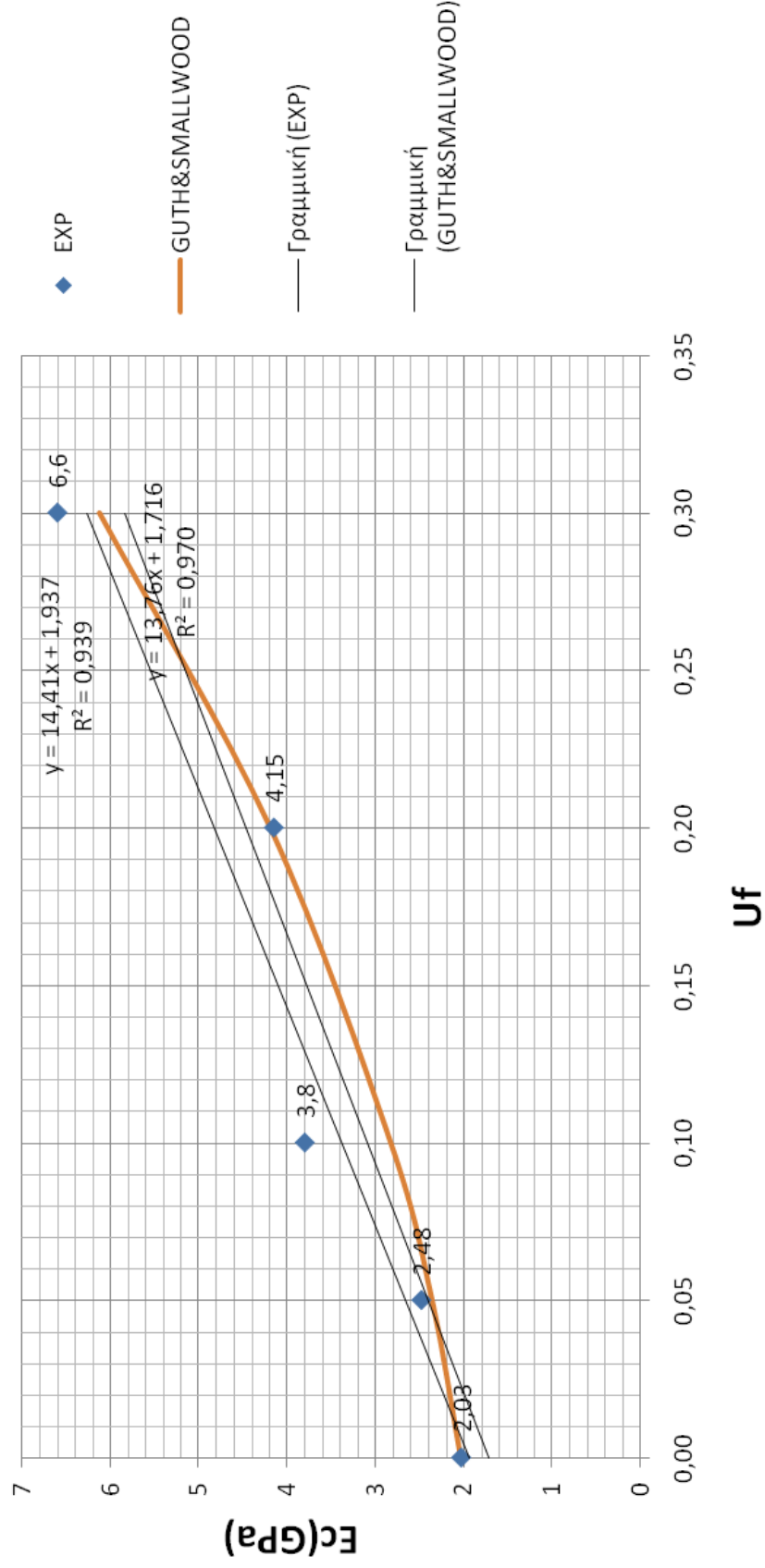
### Δ14. Μέτρο ελαστικότητας $E_{com}$ -ποσοστό κόκκων(35 p.h.r πλαστικοποιητή)



### Δ15. Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(35 p.h.r πλαστικοποιητή)

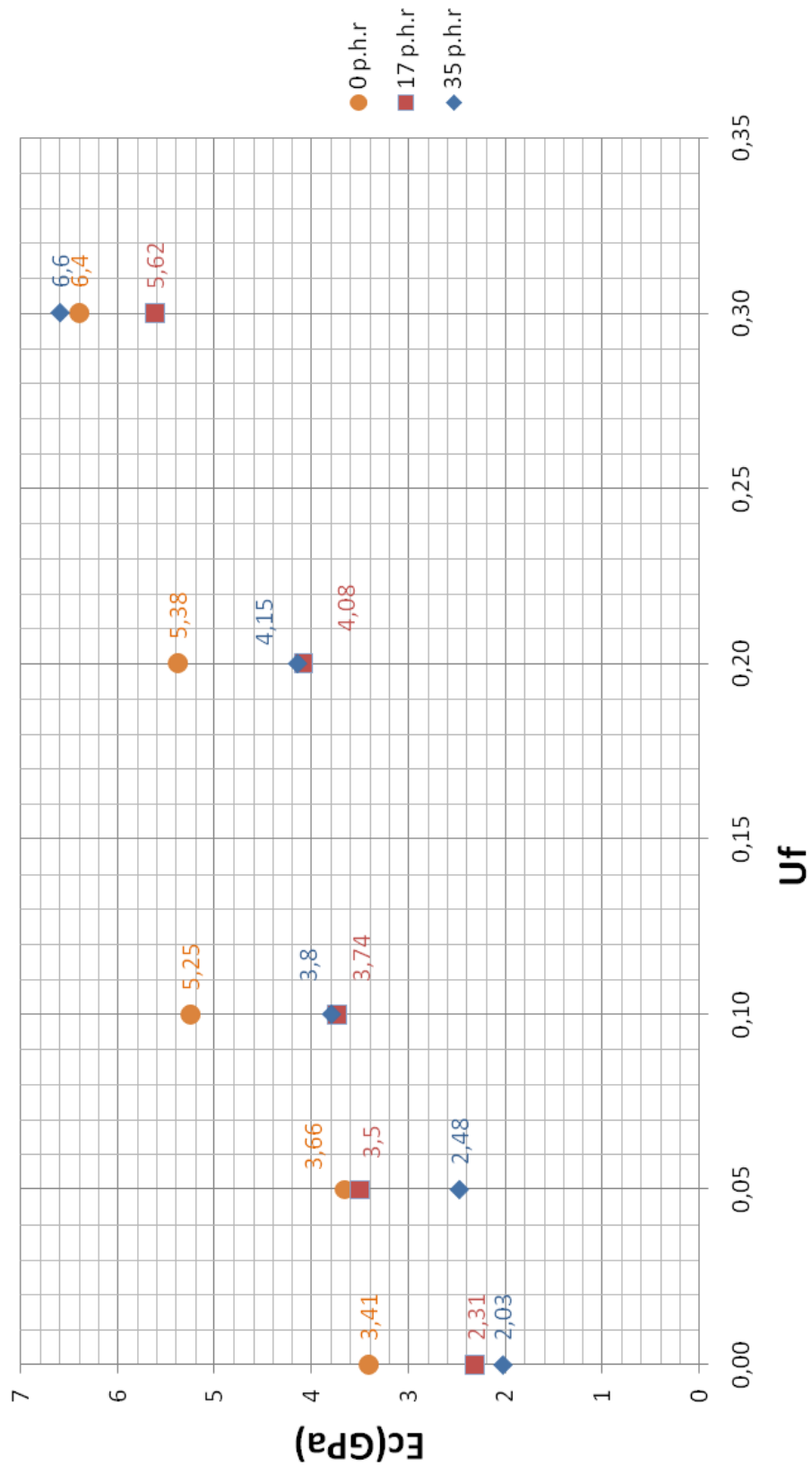


## Δ16. Μέτρο ελαστικότητας Εσom-ποσοστό κόκκων(35 p.h.r πλαστικοποιητή)

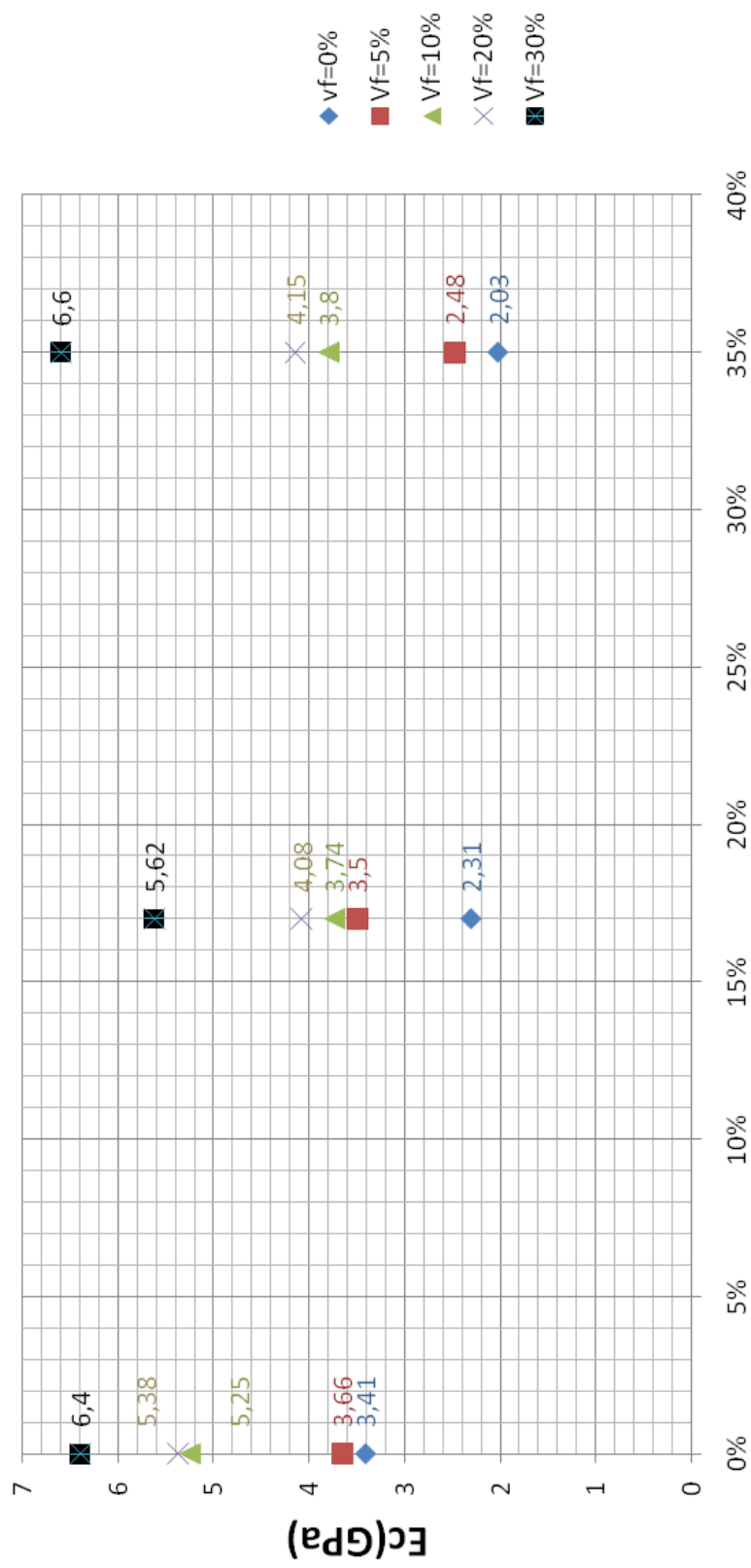




### Δ17. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-ποσοστό κόκκων

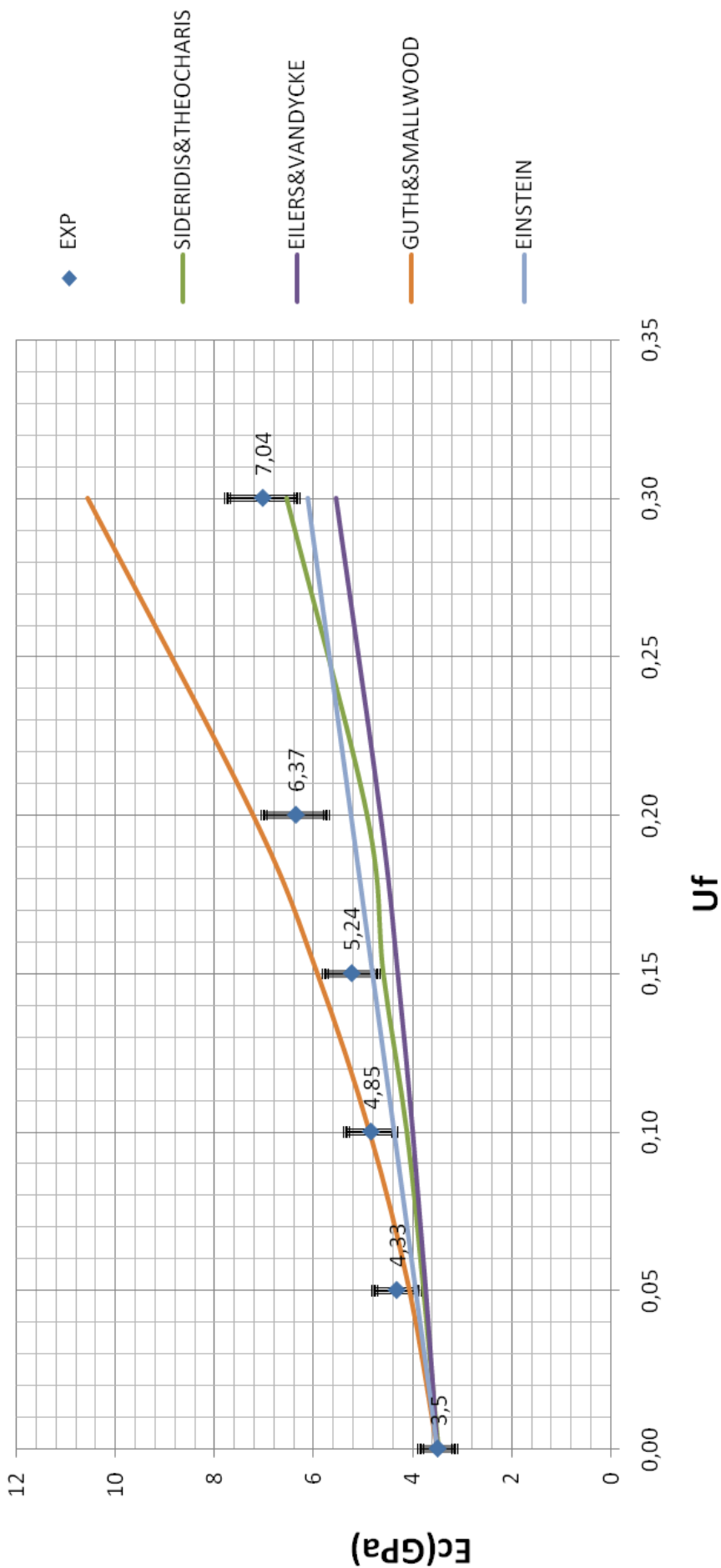


### Δ18. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-p.h.r πλαστικοποιητή

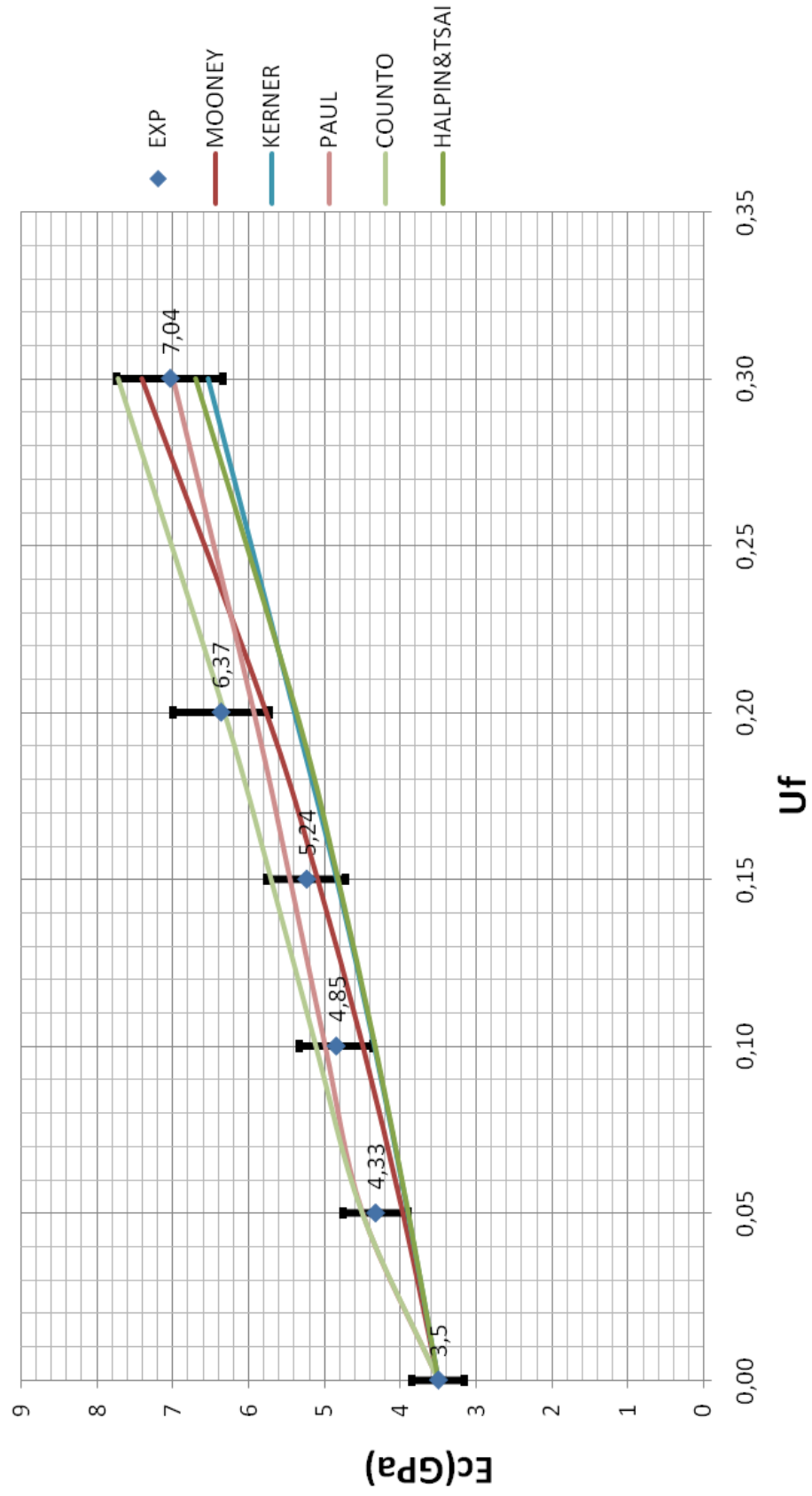


p.h.r Πλαστικοποιητή

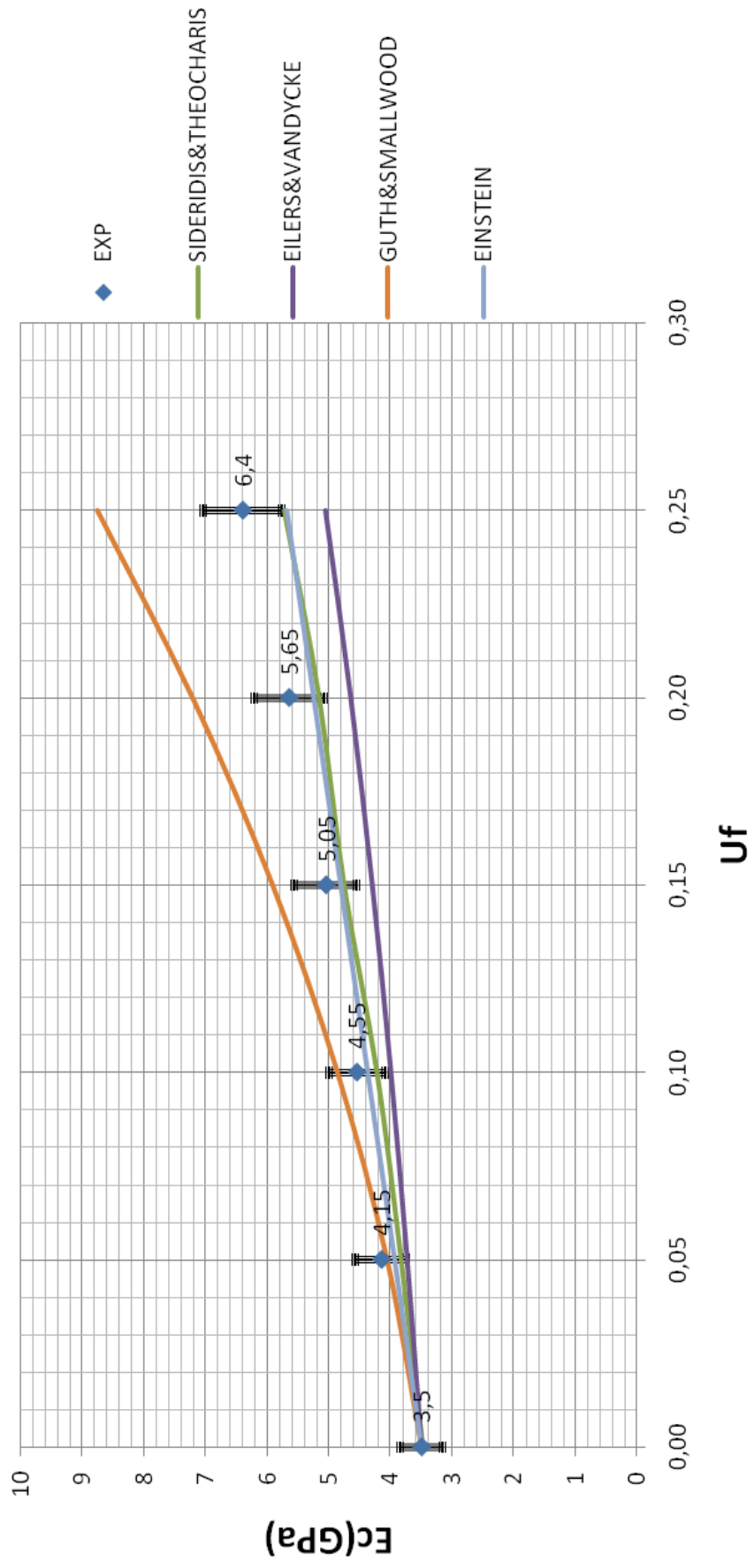
### Σ1 .Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(FE)



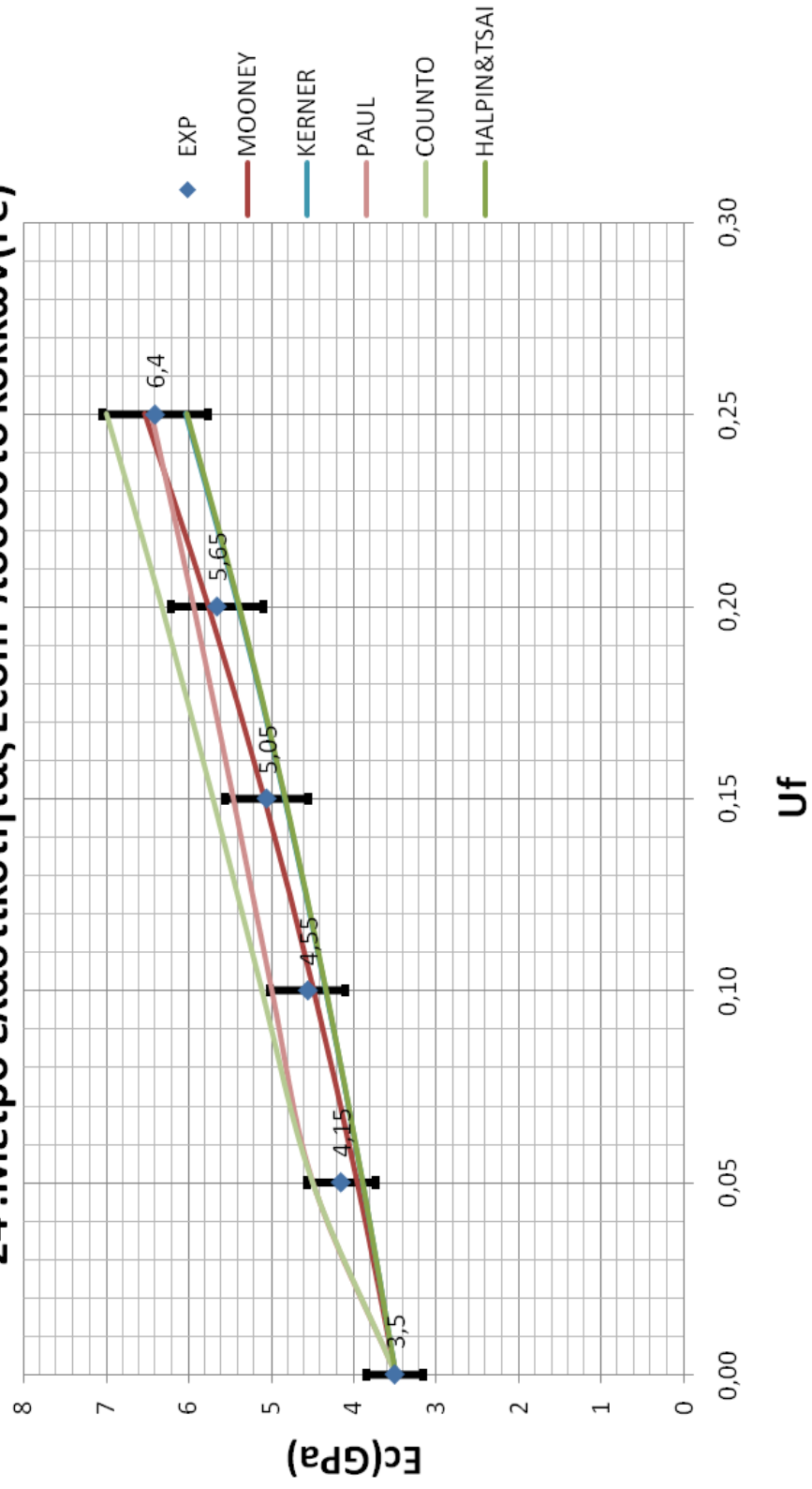
## Σ2 .Μέτρο ελαστικότητας Εσομ-ποσοστό κόκκων(FE)



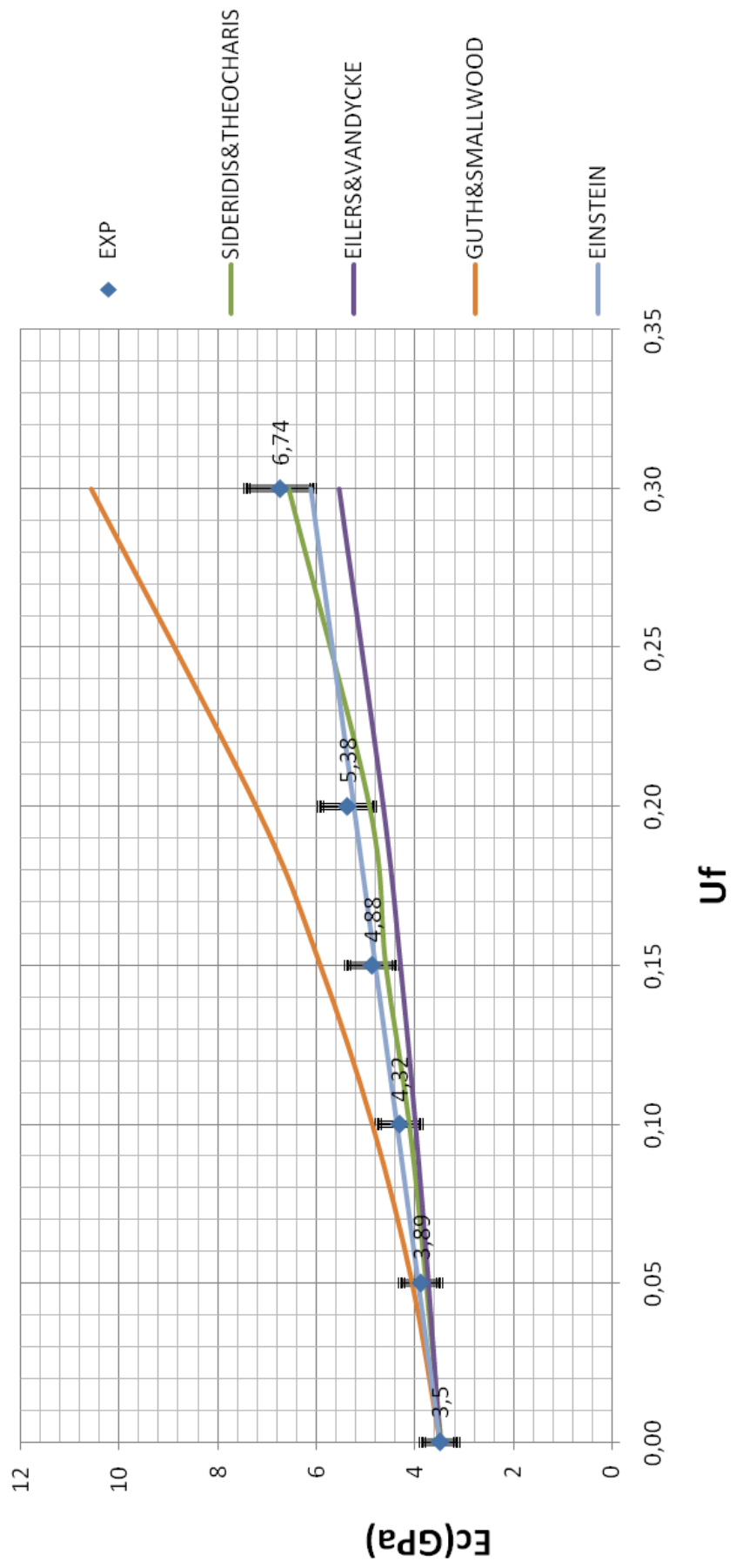
### Σ3 .Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(Fe)



### Σ4 .Μέτρο ελαστικότητας Εσομ-ποσοστό κόκκων(Fe)



## A1 .Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(AI)

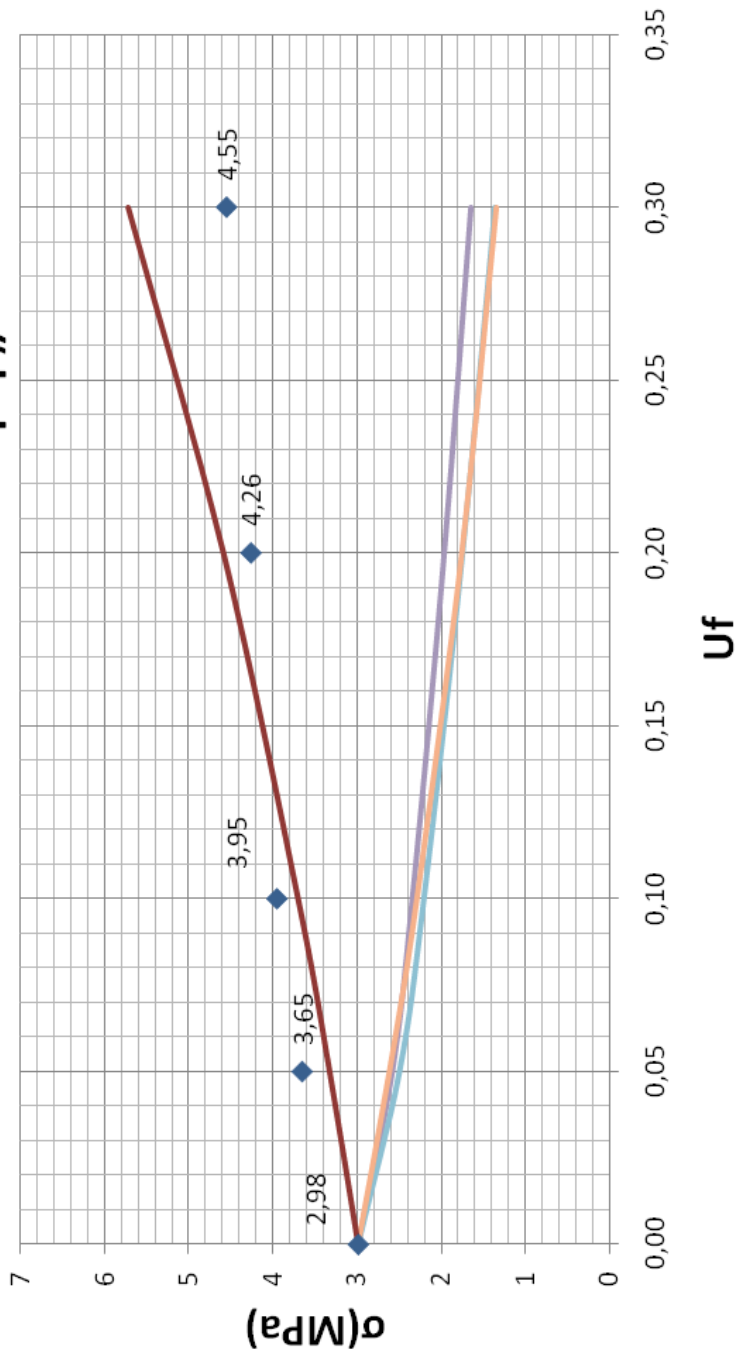


## A2 .Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(AI)

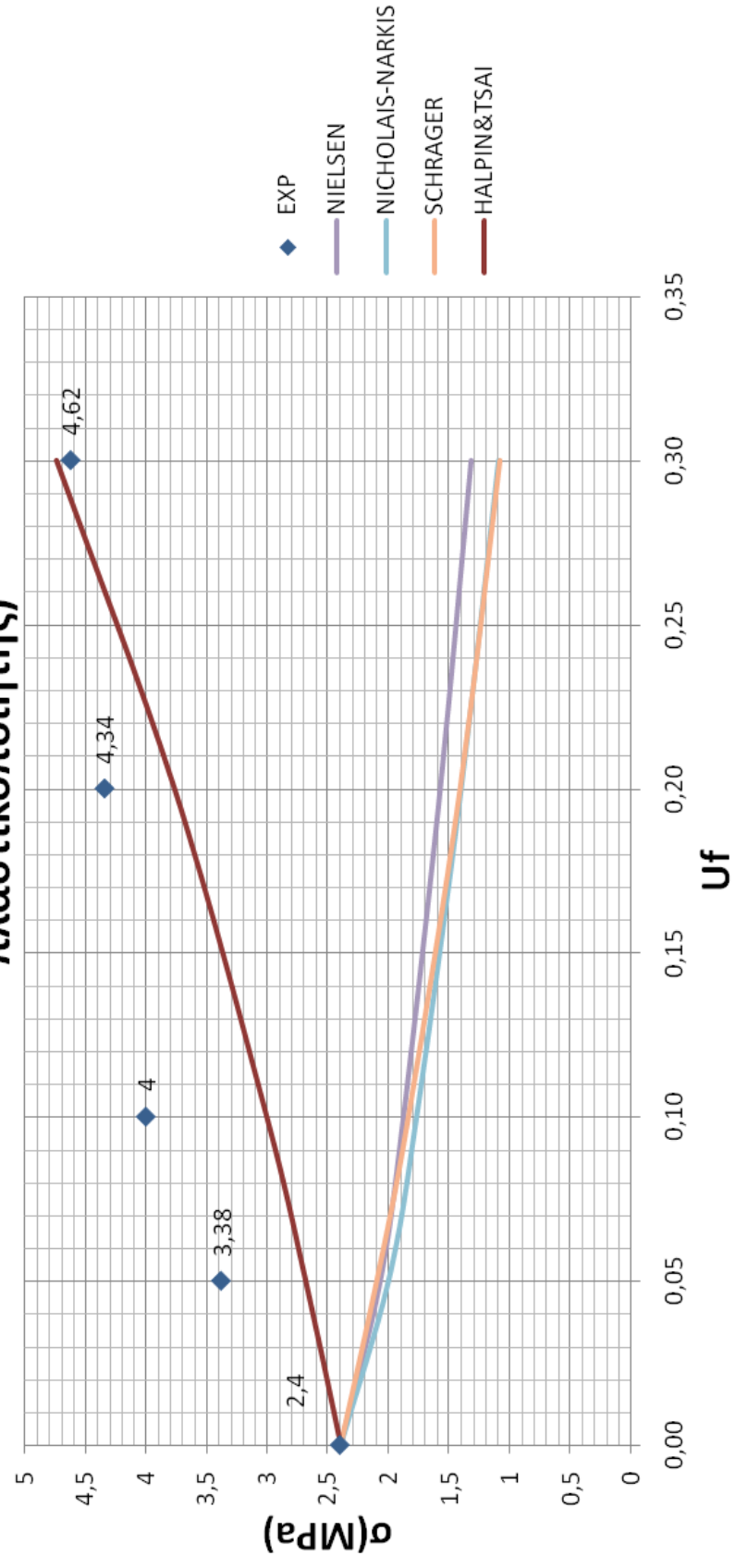




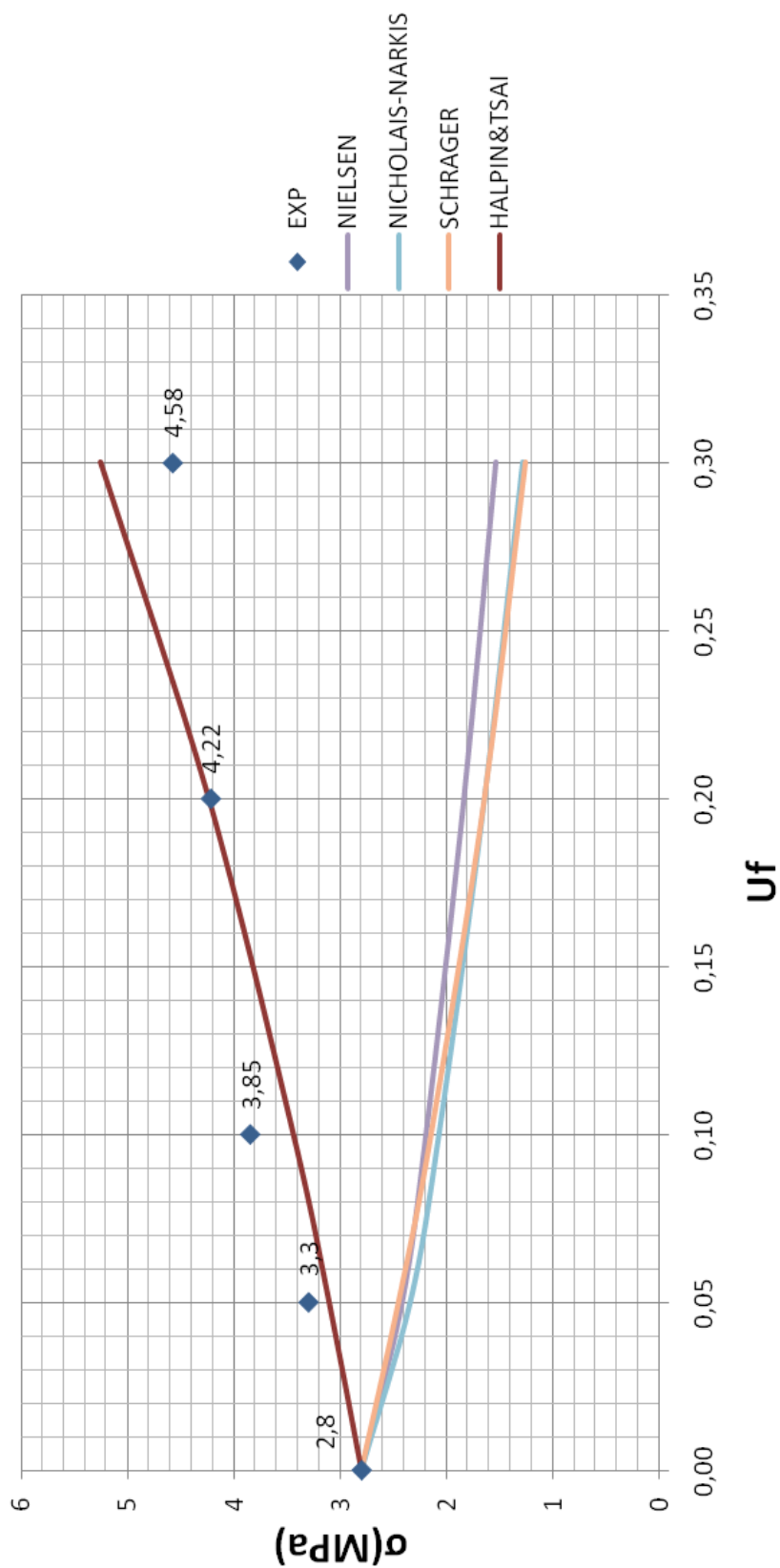
# Τ1. Τάση θραύσης σ-ποσοστό κόκκων(0 p.h.r πλαστικοποιητής)



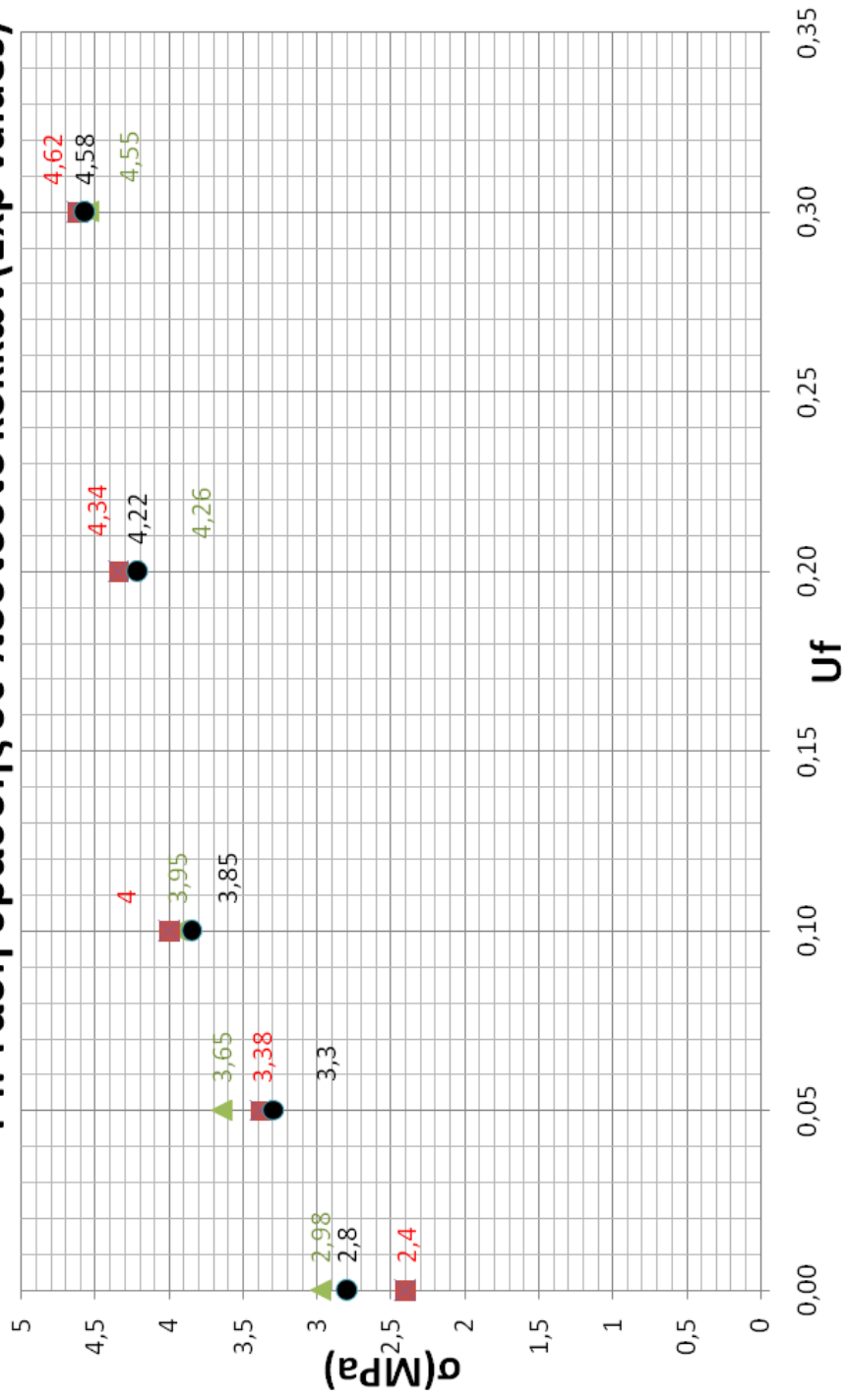
**T2. Τάση θραύσης σε-ποσοστό κόκκων(17 p.h.r πλαστικοποιητής)**



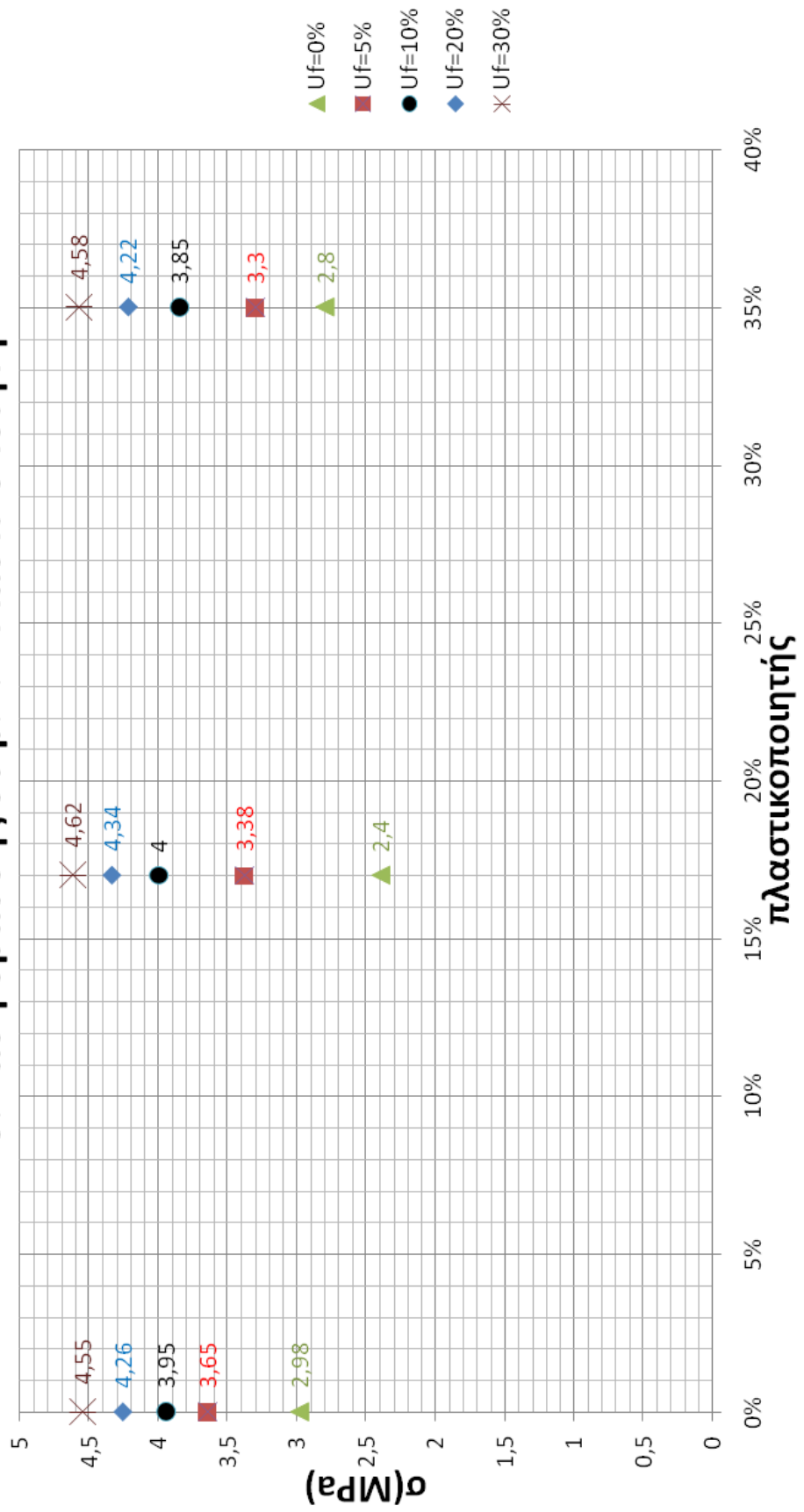
### Τ3. Τάση θραύσης σε-ποσοστό κόκκων(35 p.h.r πλαστικοποιητής)

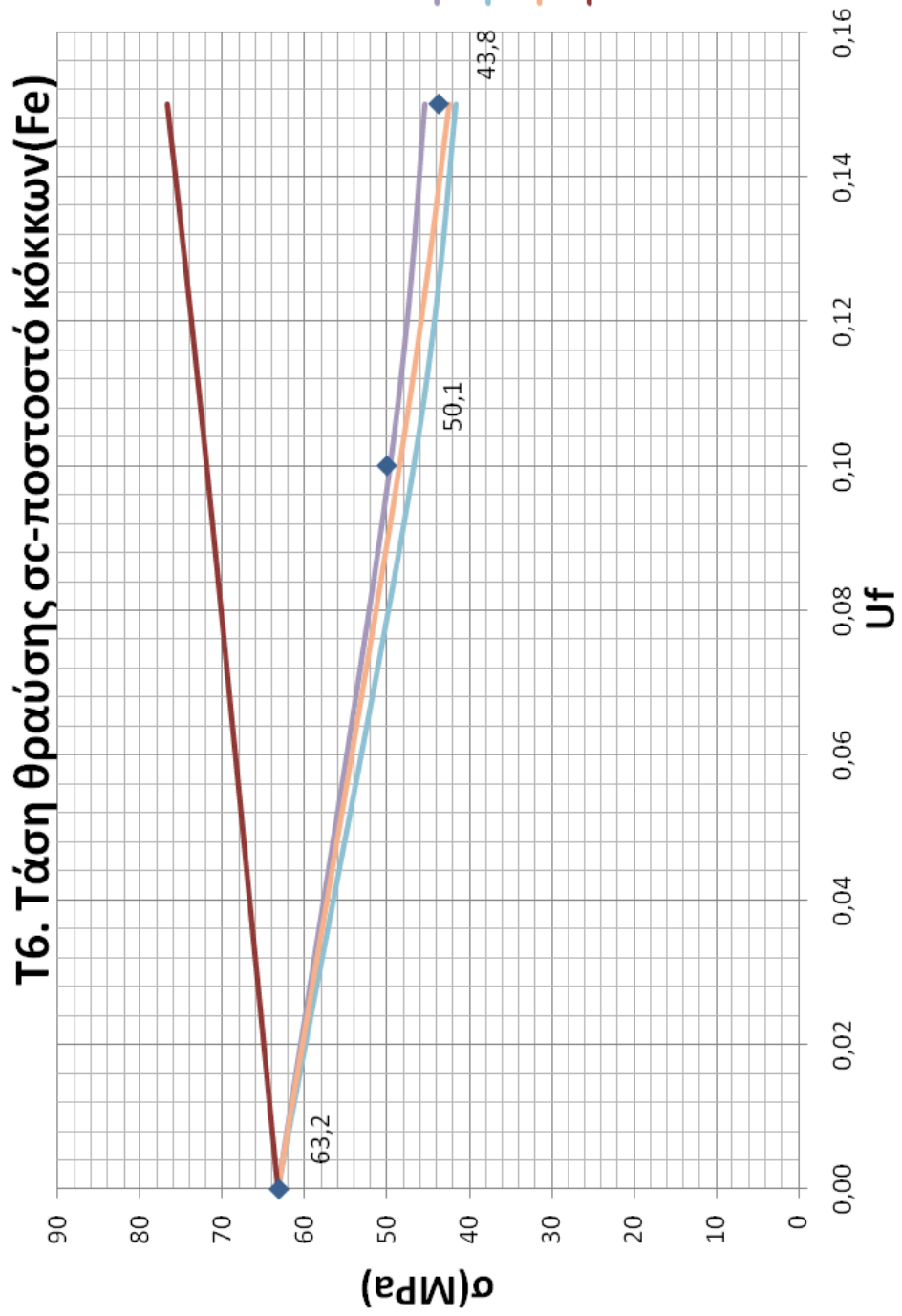


Τ4. Τάση θραύσης σσ-ποτιστό κόκκων(Exp values)



### Τ5. Τάση θραύσης σc-p.h.r πλαστικοποιητή





## 4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

#### 4.1. ΥΔΡΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ

##### 4.1.1. Μοντέλο διάχυσης τύπου Fick

Το φαινόμενο της υγραπορρόφησης στηρίζεται στον μηχανισμό διάχυσης κατά την οποία μάζα ύλης (ή θερμότητα) μεταφέρεται από σημείο σε σημείο ως αποτέλεσμα τυχαίων μοριακών κινήσεων.

Ο μηχανισμός της μονοδιάστατης διάχυσης που μας ενδιαφέρει περιγράφεται αναλυτικά μέσω του δεύτερου νόμου του Fick μιας λεπτής (άπειρης) πλάκας ως:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial^2 (D_x \partial c)}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

όπου,  $c$ : συγκέντρωση της διαχεόμενης ύλης

$x$ : συντεταγμένη διάχυσης, κάθετη στην επιφάνεια διείσδυσης

$D_x$ : συντελεστές διάχυσης (Diffusivity)

Στην περίπτωση που όπου το  $D_x$  είναι μια σταθερά ανεξάρτητη του  $x$  η παραπάνω διαφορική εξίσωση έχει αναλυτική λύση η οποία για ορισμένες αρχικές συνθήκες έχει την μορφή προσεγγιστικής ανοικτής λύσης [46,17].

$$G \equiv \frac{m_t - m_i}{m_\infty - m_i} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\exp[-(2j+1)^2 \pi^2 (D_x t / h^2)]}{(2j+1)^2} \quad (4.2)$$

όπου,

$h$ : είναι το πάχος του δοκιμίου (πλάκας) κατά το οποίο γίνεται η διάχυση ( $0 \leq x \leq h$ )

$m_t$ : είναι η τρέχουσα τιμή του βάρους της απορροφηθείσας υγρασίας επί της εκατό του αρχικού βάρους.

$m_i$ : η αρχική αντίστοιχη τιμή.

$m_\infty$ : η αντίστοιχη τιμή για συνθήκες κορεσμού.

Έτσι παρατηρούμε από την λύση της (4.2) ότι η τιμή της απορροφηθείσας υγρασίας εξαρτάται από δυο παράγοντες: 1<sup>ον</sup> την τιμή κορεσμού, και 2<sup>ον</sup> από τον όρο μέσα στις αγκύλες της εκθετικής συνάρτησης ο οποίος καθορίζει και τον ρυθμό της υγροαπορρόφησης ή της αφύγρανσης. Με την σειρά της τώρα η τιμή κορεσμού είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως του ποσοστού της ρητίνης, των μικροκενών-μικρορωγμών, των εγκλεισμάτων αλλά και της πίεσης των υδρατμών. Με άλλα λόγια η τιμή κορεσμού του σύνθετου υλικού μπορούμε να την δεχθούμε ως ένα σύστημα από τρεις κορεσμένες φάσεις, την ρητίνη, τους κόκκους και τα μικροκενά. Επίσης με την σειρά της η τιμή του ρυθμού διάχυσης είναι συνάρτηση του χρόνου εκθέσεως στο υγρό περιβάλλον, του πάχους του δοκιμίου "h" και της σταθεράς διαχύσεως "Dx" η οποία με την σειρά της μπορεί να είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, του βαθμού εμποδίου των κόκκων, της τοπικής συγκέντρωσης υγρασίας και του βαθμού τοπικής διόγκωσης της μήτρας από εμποτισμό αυτής. Ως προς τον παράγοντα της θερμοκρασίας, μπορούμε να πούμε ότι αν και είναι γνωστό ότι το Dx ακολουθεί μια Arrhenius-τύπου σχέση, ωστόσο δεν θα μας απασχολήσει άλλο διότι τα πειράματα της υγροαπορρόφησης διεκπεραιώθηκαν κάτω από σταθερή θερμοκρασία (περίπου 50°C). Ως προς τον παράγοντα του εμποτισμού με διόγκωση μήτρας υπάρχουν πολλά πειράματα που δείχνουν ότι λόγω αυτής αναπτύσσονται ανάλογες εσωτερικές τάσεις οι οποίες περιπλέκουν την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς. Έτσι για παράδειγμα στο παρακάτω διάγραμμα δίνονται ορισμένα πειραματικά δεδομένα [47] από τα οποία υπολογίζεται προσεγγιστικά ότι:

$$e_m \approx 0.5m_t \quad (4.3)$$

όπου

- $e_m$ : είναι η εκατοστιαία εσωτερική διόγκωση της μήτρας
- $m_t$ : η τρέχουσα τιμή υγροαπορρόφησης επί της εκατό του αρχικού βάρους

Μέσω μαθηματικών προσεγγίσεων αποδείχθηκε [46] ότι η προσεγγιστική αναλυτική λύση της (4.2) μπορεί να εκφραστεί μέσω της "ακριβούς αναλυτικής" κλειστής σχέσης:

$$\frac{m_t}{m_\infty} = G = 1 - \exp\left(-7.3 \frac{D_x t^{3/4}}{h^2}\right) \quad (4.4)$$



Βάζοντας τώρα εμείς την παραπάνω σχέση υπό μια γραμμικής μορφής συνάρτηση (κάνοντας δηλαδή λογαριθμοποίηση στην (4.4) παίρνουμε:

$$Z = \ln(1-G) = -7.3 \left( \frac{D_x}{h^2} \right) t^{3/4} = AY \quad (4.4)$$

- $Y = t^{3/4}$  (4.5)
- $A = -7.3 D_x / h^2$

Μπορούμε τώρα να περάσουμε από παράσταση διαγραμμάτων του πραγματικού χρόνου, σε χρόνο  $t^{3/4}$  για να ελέγξουμε την γραμμικότητα υγραπορρόφησης, όπως αυτό φαίνεται στα διαγράμματα (κενό). Παρατηρούμε ότι δεν έχουμε γραμμική σχέση για όλο το χρονικό διάστημα και συνεπώς η κλίση A στην σχέση (4.5) δεν είναι σταθερή ως προς όλο το χρόνο, αν και από πολλά πειράματα αποδείχθηκε πως για τέτοια υλικά το  $D_x$  είναι σταθερό, δηλαδή είναι ανεξάρτητο της τοπικής συγκέντρωσης υγρασίας. Αυτό σημαίνει ότι η αρχική σχέση (4.4) δεν μπορεί να ισχύει γενικά για τα πειράματά μας. Η αιτία θα πρέπει να βρίσκεται στην "γεωμετρία" διάχυσης των δοκιμίων, που σημαίνει ότι αυτή στα πειράματά μας δεν μπορεί να είναι μονοδιάστατη (δηλαδή σαν μεγάλη πλάκα με πολύ μικρό πάχος), αλλά πρέπει να είναι "πολυδιάστατη" (δηλαδή να θεωρήσουμε εισχώρηση του υγρού από πολλές επιφάνειες ή διατομές). Όντως τα δοκίμια μας είχαν γεωμετρία παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις (κενό). Από την μαθηματική προσέγγιση της λύσης (4.2) της εξίσωσης διάχυσης (4.1) προκύπτει ότι για μικρούς χρόνους "t", η λύση είναι γραμμική ως προς  $Y = t^{1/2}$ . Έτσι η τελική σχέση τέτοιου είδους είναι [46]

$$Z = \frac{m_t}{m_\infty} = \frac{4}{\pi^{1/2} h} (D_x) t^{1/2} = AY \quad (4.6)$$

Στα πρώτα στάδια της διάχυσης ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των μετώπων (επιφανειών) διείσδυσης του υγρού είναι αμελητέος και συνεπώς η παραπάνω σχέση μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε επιφάνεια, δηλαδή για κάθε άξονα x,y,z ξεχωριστά και ανεξάρτητα με το αντίστοιχο  $D_x, D_y, D_z$ . Έτσι ο μηχανισμός διάχυσης γίνεται τριαξονικός και σε αυτή την περίπτωση η παραπάνω σχέση (4.6) γίνεται:

$$Z = \frac{4}{\pi^{1/2} h} D^{1/2} t^{1/2} \quad (4.7)$$

- όπου D είναι ο ισοδύναμος (τριδιάστατος) συντελεστής διάχυσης
- $D = D_x \left[ 1 + \frac{h}{l} \left( \frac{D_y}{D_x} \right)^{1/2} + \frac{h}{n} \left( \frac{D_z}{D_x} \right)^{1/2} \right]^2$  (4.8)

Όπου τα παραπάνω ισχύουν για μη ομοιογενή υλικά όπως τα ινώδη και τα φυλλώδη ενώ για τα ομοιογενή όπως τα κοκκώδη δικά μας όπου  $D = D_x = D_y = D_z$ , έχουμε για την (4.7):

$$D = D_x (1 + h/l + h/n)^2 \quad (4.9)$$

Τα l, h, n είναι τα μήκη των ακμών μιας παραλληλεπίπεδης πλάκας, δηλαδή η διάχυση γίνεται μέσω των 6 επιφανειών αυτής. Στην περίπτωση μας ο λόγος ακμών ήταν  $h/l = h/n \approx 2$  με  $h \approx 2,4 \text{ cm}$  και  $n = 1 \approx 1,2 \text{ cm}$ . Από τις γραφικές παραστάσεις με πέρασμα από πραγματικό χρόνο t σε χρόνο  $t^{1/2}$  όλων των πειραμάτων υγραπορρόφησης πού έγιναν από εμάς και φαίνονται στα διαγράμματα (κενό) προκύπτει για μικρούς χρόνους όντως μια τέτοια γραμμική συμπεριφορά. Φαίνεται έτσι ότι η σχέση (4.7) είναι πιο γενικής φύσεως από την (4.4) σε ότι αφορά γεωμετρία διάχυσης, τουλάχιστον για τα πρώτα χρονικά στάδια αυτής. Συνεπώς μέσω αυτής της διαδικασίας αποδείξαμε τον σημαντικό ρόλο της γεωμετρίας των δοκιμίων στην συμπεριφορά αυτών κατά την υγραπορρόφηση. Μια άλλη βασική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό του φαινομένου υγραπορρόφησης είναι ο ρυθμός αυτής, ο οποίος εκφράζεται όπως ήδη ειπώθηκε από τον συντελεστή διάχυσης D και υπολογίζεται από την σχέση:

$$D = \pi \left( \frac{h}{4m_\infty} \right)^2 \left( \frac{m_2 - m_1}{t_2^{1/2} - t_1^{1/2}} \right)^2 = d \left( \frac{\tan \alpha}{m_\infty} \right)^2 \quad (4.10)$$

όπου:

- 'α' είναι η κλίση της ευθείας στα αντίστοιχα διαγράμματα
- $d = \pi(h/4)^2$  σταθερά γεωμετρίας

## **4.2. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ASTM D 570**

Πριν από την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό της υδροαπορροφητικότητας παρατίθεται η προδιαγραφή ASTM D 570 που αναφέρεται στην υδροαπορροφητικότητα των πλαστικών.

### **4.2.1. Προδιαγραφή ASTM D 570**

#### **4.2.2. Σκοπός**

Η μέθοδος αυτή καλύπτει τον προσδιορισμό του ποσοστού απορρόφησης ύδατος των πλαστικών, όταν εμβαπτίζονται σε αυτό, και εφαρμόζεται στις δοκιμές θερμής και ψυχρής απόχυσης, ομογενών πλαστικών υπό μορφή πολυστρωμάτων [laminates] τα οποία μπορούν να είναι ράβδοι [rod] ή ράβδοι με κοιλότητα [tube] καθώς επίσης και φύλλα [sheet] πάχους 0.13mm και άνω.

#### **4.2.3. Σημασία**

Η δοκιμή υδροαπορροφητικότητας έχει δύο βασικές χρήσεις. Πρώτον, σαν οδηγός του ποσοστού απορροφούμενου ύδατος από ένα υλικό και συνεπώς, στις περιπτώσεις όπου οι σχέσεις μεταξύ υγρασίας και μηχανικών ή ηλεκτρικών ιδιοτήτων, διαστάσεων ή εμφάνισης έχουν προσδιορισθεί, σαν οδηγός για την επίδραση της έκθεσης σε ύδωρ ή σε συνθήκες υγρασίας επί αυτών των ιδιοτήτων. Και δεύτερον σαν μια δοκιμή ελέγχου της ομοιομορφίας ενός υλικού. Η τελευταία είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμη σε φύλλα, ράβδους (γεμάτες ή με κοιλότητα) όταν η δοκιμή γίνεται επί του τελικού προϊόντος.

Το ποσοστό υδροαπορροφητικότητας ενός πλαστικού είναι στενά συνδεδεμένο με ιδιότητες όπως αντίσταση ηλεκτρικής μόνωσης [electrical insulation resistance], διηλεκτρικές απώλειες [dielectric losses], μηχανική αντοχή, εμφάνιση και διαστάσεις. Η επίδραση της μεταβολής της περιεκτικότητας υγρασίας λόγω απορρόφησης ύδατος, επί αυτών των ιδιοτήτων, εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο έκθεσης (εμβάπτιση σε ύδωρ ή έκθεση σε υψηλή υγρασία), από το σχήμα του σώματος και από τις ιδιότητες του πλαστικού. Σε μη ομοιογενή υλικά όπως τα πολυστρώματα (laminates), το ποσοστό απορρόφησης του ύδατος μπορεί να είναι διαφορετικό σε κάθε κομμένο άκρο και επιφάνεια της πλάκας. Ακόμα και σε ομοιογενή υλικά μπορεί να είναι

ελαφρώς μεγαλύτερο σε επιφάνειες οι οποίες προέκυψαν από αποκοπή παρά σε εκείνες που προέκυψαν από απόχυση σε τύπους (καλούπια). Συνεπώς προσπάθειες συσχετισμού της υδροαπορροφητικότητας με το εμβαδόν επιφανειών πρέπει να είναι γενικά περιορισμένες σε υλικά τα οποία συγγενεύουν και σε υλικά που διαμορφώθηκαν με τον ίδιο τρόπο. Για υλικά μεταβαλλόμενης πυκνότητας η σχέση των τιμών υδροαπορροφητικότητας ανά όγκο ή ανά βάρος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

#### 4.2.4. Συσκευές (Εξαρτήματα)

- Ζυγός: Ένας ζυγός με ακρίβεια 0.0001g.
- Κλίβανος: Με δυνατότητα διατήρησης ομοιόμορφων θερμοκρασιών 50°C, με απόκλιση 3°C, 105 έως 110°C.

#### 4.2.5. Δοκίμια

Η προδιαγραφή δίνει διαστάσεις ανάλογα με τη μορφή του υλικού. Για πλαστικά απόχυσης σε τύπους τα δοκίμια έχουν σχήμα δίσκου. Για ελάσματα ή φύλλα τα δοκίμια έχουν σχήμα δοκού με διατομή ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Για ράβδους, τα δοκίμια ελέγχου αποτελούν τμήμα αυτών, ενώ για σωλήνες ή ράβδους με κοιλότητα τα δοκίμια αποκόπτονται από το συμπαγές τμήμα κατά την αξονική ή περιφερειακή διεύθυνση ανάλογα με την εσωτερική διάμετρο. Στην περίπτωση μας, επειδή τα δοκίμια για τον έλεγχο της υδροαπορροφητικότητας χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την εύρεση της αντοχής σε κάμψη, οι διαστάσεις είναι αυτές που συνιστώνται από την αντίστοιχη προδιαγραφή ASTM D-790.

Τα δοκίμια ελέγχου για φύλλα, ράβδους και σωλήνες θα αποκόπτονται και θα κατεργάζονται από το υλικό ώστε να έχουν λείες ακραίες επιφάνειες χωρίς ρωγμές. Οι επιφάνειες αποκοπής θα λειαινούνται με σμυριδόχαρτο. Η κοπή, η κατεργασία και λείανση θα έχουν αργό ρυθμό, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική θέρμανση του υλικού.

Σημείωση: Εάν υπάρχει λάδι στην επιφάνεια του δοκιμίου μετά από την κατεργασία, τότε αυτό πρέπει να πλένεται με ένα ύφασμα εμβαπτισμένο σε πετρέλαιο και μετά να στεγνώνεται με άλλο. Έπειτα να αφήνεται στον αέρα, ώστε να εξατμίζεται το πετρέλαιο. Εάν το πετρέλαιο επιδρά στο πλαστικό τότε πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλο διαλυτικό ή απορρυπαντικό το οποίο θα εξατμίζεται εντός δύο ωρών.

#### **4.2.6. Προετοιμασία δοκιμίων**

Τα δοκίμια θα προετοιμάζονται ως εξής:

- Δοκίμια από υλικά των οποίων η τιμή υδροαπορροφητικότητας μπορεί να επηρεασθεί σημαντικά από θερμοκρασίες γύρω στους 110°C, θα αποξηρανθούν μέσα σε κλίβανο επί 24 ώρες και σε θερμοκρασία 50°C, με απόκλιση 3°C, θα ψυχθούν μέσα σε αποστεγνωτήρα και αμέσως μετά θα ζυγισθούν με ακρίβεια 0.001g.
- Δοκίμια από υλικά των οποίων η τιμή υδροαπορροφητικότητας δεν επηρεάζεται σημαντικά από θερμοκρασίες στους 110°C, θα αποξηρανθούν μέσα σε κλίβανο επί μια ώρα και σε θερμοκρασία 105°C έως 110°C.
- Όταν επιθυμείται να γίνει σύγκριση τιμών υδροαπορροφητικότητας με άλλα πλαστικά τότε τα δοκίμια θα προετοιμασθούν σύμφωνα με την πρώτη παράγραφο.

#### **4.2.7. Διαδικασία εμβάπτισης**

- *Εμβάπτιση 24 ωρών*

Τα δοκίμια τα οποία έχουν προετοιμασθεί σύμφωνα με την παράγραφο (3.2) θα τοποθετηθούν εντός θερμομπανιέρας με αποσταγμένο ύδωρ θερμοκρασίας από 22°C έως 24°C και θα μείνουν εμβαπτιζόμενα ολικά. Μετά το πέρας των 24 ωρών τα δοκίμια θα λαμβάνονται ανά ένα κάθε φορά και αφού θα σκουπίζονται με ένα ύφασμα θα ζυγίζονται αμέσως με ακρίβεια 0.001g.

- *Εμβάπτιση 2 ωρών*

Για όλα τα πάχη δοκιμίων από τα υλικά τα οποία έχουν υψηλό ποσοστό απορροφητικότητας και για λεπτά ( μικρού πάχους ) δοκίμια από άλλα υλικά τα οποία μπορούν να έχουν σημαντική αύξηση βάρους εντός δύο ωρών, τα δοκίμια θα ελέγχονται όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο εκτός του ότι ο χρόνος εμβάπτισης στο ύδωρ θα μειωθεί σε 120min με απόκλιση 4min.

- *Επαναλαμβανόμενη εμβάπτιση*

Ένα δοκίμιο μπορεί να ζυγισθεί με ακρίβεια 0.001gr μετά από εμβάπτιση δύο ωρών εντός ύδατος, να τοποθετηθεί εκ νέου στο ύδωρ και να ζυγισθεί και πάλι μετά από παραμονή 24 ωρών.

*Σημείωση:* Με την χρήση αυτής της μεθόδου το ποσοστό του απορροφούμενου ύδατος εντός 24 ωρών μπορεί να είναι λιγότερο από εκείνο που θα είχε απορροφηθεί, εάν η εμφάνιση δεν είχε διακοπεί.

- *Εμβάπτιση μακράς διάρκειας*

Για τον προσδιορισμό του απορροφούμενου ύδατος μετά από κορεσμό, τα προετοιμασμένα δοκίμια θα δοκιμασθούν όπως περιγράφεται στην παράγραφο που αναφέρεται στην εμφάνιση των 24 ωρών και μετά θα τοποθετηθούν και πάλι μέσα στο νερό. Οι ζυγίσεις θα επαναληφθούν στο τέλος της πρώτης εβδομάδας και μετά κάθε δύο εβδομάδες έως ότου η αύξηση του βάρους εντός περιόδου δύο εβδομάδων, να είναι λιγότερη από 1% της συνολικής αύξησης ή ίση με 5mg. Τότε θα θεωρηθεί ότι το δοκίμιο κορέσθηκε. Η διαφορά μεταξύ του βάρους μετά τον κορεσμό και του βάρους μετά την αρχική αποξήρανση, κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας θα θεωρηθεί ως το απορροφηθέν ύδωρ μετά από κορεσμό.

- *Εμβάπτιση δύο ωρών εντός ύδατος σε βράση*

Τα προετοιμασμένα δοκίμια θα τοποθετηθούν ολικά εντός δοχείου με αποσταγμένο ύδωρ σε βράση. Στο τέλος των 120min ( με απόκλιση  $\pm 4$ min ) τα δοκίμια θα βγουν από το ύδωρ και θα ψυχθούν με τοποθέτηση εντός αποσταγμένου ύδατος θερμοκρασίας δωματίου. Μετά από 15min (με απόκλιση  $\pm 1$ min) τα δοκίμια θα βγουν από το ύδωρ, ανά ένα κάθε φορά και αφού θα σκουπίζονται με ένα ύφασμα θα ζυγίζονται αμέσως με ακρίβεια 0,001g.

- *Εμβάπτιση μισής ώρας εντός ύδατος σε βράση*

Για όλα τα πάχη δοκίμων τα οποία έχουν υψηλό ποσοστό απορροφητικότητας, και για λεπτά ( μικρού πάχους ) δοκίμια από άλλα υλικά τα οποία μπορούν να έχουν σημαντική αύξηση βάρους εντός 1/2 ώρας, τα δοκίμια θα ελέγχονται όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο εκτός του ότι ο χρόνος εμφάνισης στο ύδωρ θα μειωθεί στα 30 min (με απόκλιση  $\pm 1$ min).

- *Εμβάπτιση σε 50°C*

Τα προετοιμασμένα δοκίμια θα δοκιμασθούν όπως περιγράφεται στην παράγραφο που αναφέρεται στην εμφάνιση 2 ωρών εντός ύδατος σε βράση εκτός του ότι ο χρόνος και η θερμοκρασία εμφάνισης θα είναι 48 ώρες ( με απόκλιση 2 ωρών ) και 50°C ( με απόκλιση 1°C ) αντίστοιχα. Επίσης θα παραληφθεί η ψύξη εντός απεσταγμένου ύδατος πριν από την ζύγιση.

Όταν επιθυμείται να γίνει σύγκριση τιμών υδροαπορροφητικότητας με άλλα πλαστικά, τότε θα χρησιμοποιηθεί η διαδικασία εμφάνισης 24 ωρών και η τιμή ισορροπίας η οποία προσδιορίζεται στην παράγραφο που αναφέρεται στην εμφάνιση μακράς διάρκειας.

#### **4.2.8. Επαναληπτική προετοιμασία των δοκιμίων**

Όταν είναι γνωστό ή όταν υπάρχει υποψία ότι υλικά περιέχουν σημαντική ποσότητα ουσιών οι οποίες διαλύονται στο ύδωρ, τότε τα δοκίμια μετά την εμβάπτιση τους θα προετοιμάζονται και πάλι για τον ίδιο χρόνο και την ίδια θερμοκρασία όπως χρησιμοποιήθηκε κατά την αρχική περίοδο ξήρανσης. Μετά θα ψυχθούν μέσα σε ένα αποστεγνωτήρα και αμέσως θα ξαναζυγισθούν. Εάν το βάρος σε αυτή την περίπτωση είναι λιγότερο από το βάρος κατά την προετοιμασία, η διαφορά θα θεωρηθεί σαν ύλη η οποία διαλύεται μέσα στο ύδωρ κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης. Για τέτοια υλικά, η τιμή απορρόφησης ύδατος θα ληφθεί σαν το άθροισμα της αύξησης του βάρους κατά την εμβάπτιση και του βάρους της ύλης η οποία διαλύθηκε στο ύδωρ.

#### **4.2.9. Υπολογισμοί και έκθεση**

Η έκθεση θα περιέχει τις τιμές για κάθε δοκίμιο και μέσο όρο τιμών τριών δοκιμίων. Επίσης:

- Διαστάσεις δοκιμίων μετρηθείσες πριν από τη δοκιμή με ακρίβεια 0,025mm.
- Χρόνος και θερμοκρασία της προετοιμασίας.
- Χρόνος εμβάπτισης.
- Ποσοστιαία αύξηση βάρους κατά την εμβάπτιση υπολογισθείσα με ακρίβεια 0,01% ως εξής:

$$\text{Αύξηση βάρους}\% = \frac{\text{βάρους μετά την εμβάπτιση} - \text{βάρους κατά την προετοιμασία}}{\text{βάρους κατά την προετοιμασία}} \times 100$$

- Η ποσοστιαία ελάττωση ουσίας η οποία διαλύεται στο ύδωρ κατά την εμβάπτιση ( εάν προσδιορισθεί ) υπολογίζεται με ακρίβεια ως εξής:

*Απώλεια*

$$\text{ουσίας}\% = \frac{\text{βάρους κατά την προετοιμασία} - \text{βάρους μετά την επαναληπτική προετοιμασία}}{\text{βάρους κατά την προετοιμασία}} \times 100$$

- Το ποσοστό του απορροφημένου ύδατος.
- Οποιοσδήποτε παρατηρήσεις οι οποίες αφορούν στρέβλωση, δημιουργία ρωγμών ή μεταβολή στην εξωτερική εμφάνιση των δοκιμίων.

*Σημείωση:* Δεν μπορεί να γίνει καμία εύλογη αναφορά επί της ακρίβειας αυτής της μεθόδου διότι η πραγματική τιμή της υδροαπορροφητικότητας δεν μπορεί να προσδιορισθεί από μια γενικώς αποδεκτή μέθοδο.

#### **4.2.10. Περιγραφή εμβάπτισης δοκιμίων, μετρήσεις και αποτελέσματα**

Τα δοκίμια τα οποία προετοιμάσθηκαν όπως περιγράψαμε στην παράγραφο αυτή εμβάπτισθηκαν σε θερμομπανιέρα με αποσταγμένο νερό θερμοκρασίας 50°C ( με απόκλιση 1°C ). Αυτό έγινε για να επιταχυνθεί η απορρόφηση ύδατος από τα δοκίμια. Πράγματι, σύμφωνα με προπείραμα το οποίο πραγματοποιήθηκε εξήλθε το συμπέρασμα ότι στην θερμοκρασία των 50°C έχουμε τη μέγιστη απορρόφηση ύδατος ( κορεσμό ) σε χρονικό διάστημα 14 ημερών. Πλέον του χρονικού διαστήματος αυτού πχ. στις 16 ή στις 20 ημέρες παραμονής των δοκιμίων στην θερμομπανιέρα δεν παρατηρήσαμε αύξηση του βάρους των δοκιμίων λόγω απορρόφησης ύδατος. Έτσι τοποθετήσαμε τα δοκίμια του πειράματος ( σύνθετο υλικό με ποσοστά κόκκων 0%, 10%, 20%, 30%, και 40% ) εντός της θερμομπανιέρας. Πραγματοποιήθηκαν ζυγίσεις 2,4,6,8,13 και 14 ημέρες μετά την είσοδο τους στην θερμομπανιέρα. Την πρώτη εβδομάδα είχαμε συχνότερες ζυγίσεις γιατί η απορρόφηση ύδατος γινόταν με μεγαλύτερο ρυθμό ( πράγμα το οποίο φαίνεται και από το προκύπτον διάγραμμα ) από ότι στη συνέχεια. Οι ζυγίσεις πραγματοποιήθηκαν με ζυγό ακριβείας 0,001 σύμφωνα με την σχέση:

$$M_t = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100\%$$

- $W_d$  η αρχική τιμή του βάρους του δοκιμίου σε συνθήκες περιβάλλοντος.
- $W_m$  η τιμή του βάρους του δοκιμίου μετά από t ημέρες.
- $M_t$  το ποσοστό της υγρασίας που έχει απορροφηθεί από το δοκίμιο μετά από t ημέρες.



t (days)	M(t)%				
	0% κόκκοι	10% κόκκοι	20% κόκκοι	30% κόκκοι	40% κόκκοι
0	0	0	0	0	0
2	0,700	0,670	0,520	0,310	0,230
3	0,965	0,765	0,557	0,337	0,249
4	1,127	0,885	0,605	0,375	0,275
6	1,385	1,095	0,800	0,520	0,370
7	1,431	1,147	0,841	0,550	0,389
8	1,470	1,200	0,875	0,593	0,415
13	1,705	1,365	0,955	0,715	0,505
14	1,710	1,370	0,959	0,717	0,506

#### Π.4.1

Δημιουργήθηκε έπειτα ο παρακάτω πίνακας ο οποίος μας δίνει τις τιμές υδροαπορροφητικότητας ανάλογα με το χρονικό διάστημα που έγιναν οι μετρήσεις για τα δοκίμια με τα διαφορετικά ποσοστά σε περιεκτικότητα κόκκων.

Για τον υπολογισμό των ελαστικών σταθερών επικολλήθηκαν στο μέσο των δοκιμίων δύο ηλεκτρομηκυνσιόμετρα τύπου KYOWA KFG - 5 - 120 - D16 -11. Τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα αυτά τοποθετήθηκαν κάθετα μεταξύ τους και στην συνέχεια συνδέθηκαν με μια ηλεκτρική γέφυρα έτσι ώστε να δώσει τις παραμορφώσεις του φορτίου στη μηχανή Instron. Οι ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων ελήφθησαν μέσω ενός αυτόματου ψηφιακού μετατροπέα, για να προκύψουν έτσι οι εγκάρσιες και οι διαμήκεις παραμορφώσεις. Οι μετρήσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα για κάθε μέρα παραμονής και για κάθε ποσοστό εγκλείσματος.

t (days)	Μέτρο ελαστικότητας(GPa)		Τάση(MPa)		Διαμήκης παραμόρφωση	
0	0%	2,8	0%	71,9	0%	27,16
	10%	3,75	10%	61,44	10%	17,49
	20%	4,33	20%	63,88	20%	15
	30%	4,82	30%	62,51	30%	14,82
	40%	6,28	40%	54,99	40%	9,98
3	0%	2,2			0%	27,49
	10%	2,32			10%	22,5
	20%	2,98			20%	14,48
	30%	6,96			30%	7,1
	40%	7,22			40%	7,55
7	0%	1,8			0%	27,53
	10%	2,66			10%	19,05
	20%	3,08			20%	12,54
	30%	4,25			30%	9,85
	40%	5,1			40%	7,45
14	0%	2,4	0%	50,98	0%	20
	10%	2,38	10%	49,99	10%	22,48
	20%	2,8	20%	42,21	20%	14,48
	30%	4,35	30%	37,28	30%	9,98
	40%	5,02	40%	30,13	40%	5,17

#### Π.4.2

### **4.3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

#### **4.3.1. Υδροαπορροφητικότητα**

Αρχικά παρατηρούμε στο διάγραμμα A1 ότι η απορρόφηση νερού γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό κατά τις πρώτες ημέρες της εμφάνισης και στη συνέχεια αυτός ο ρυθμός ελαττώνεται μέχρι που φθάνουμε στο χρονικό διάστημα των 14 ημερών οπότε και οι καμπύλες τείνουν να έχουν ασυμπτωτική συμπεριφορά. Επιπλέον, παρατηρούμε και με την βοήθεια του A2 ότι όσο μικρότερο είναι το ποσοστό των κόκκων που περιέχει ένα δοκίμιο τόσο περισσότερη υγρασία αυτό απορροφά. Απ' αυτό συμπεραίνουμε, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η απορρόφηση του νερού πραγματοποιείται από το υλικό της μήτρας οπότε αυτή διαστέλλεται και όχι από το υλικό του εγκλείσματος (κόκκοι SiC). Αυτή η διαστολή της μήτρας είναι που διαφοροποιεί τις ιδιότητες του όλου υλικού τις μεταβολές των οποίων, ανάλογα με το ποσοστό απορρόφησης ύδατος θα μελετήσουμε παρακάτω. Στο διάγραμμα A1.3 έχουμε κάνει την αναγωγή των απολύτων τιμών στην αρχική τιμή της καθαρής μήτρας (0% κόκκους) από τις τιμές του διαγράμματος A1. Έτσι φαίνεται καλύτερα ο αυξημένος βαθμός της σχετικής βελτίωσης του υλικού ως προς τη στιβαρότητα (δυσκαμψία) του λόγω της υγρασίας. Αυτό γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό από τις γραμμές τάσης που φέραμε για τα δοκίμια με υγρασία και χωρίς, μιας και ο ρυθμός αύξησης του μέτρου ελαστικότητας για τα δοκίμια με υγρασία είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν για τα δοκίμια σε ξηρό περιβάλλον. Η εξήγηση για αυτή τη συμπεριφορά στηρίζεται στο ίδιο φαινόμενο-μηχανισμό που δώσαμε πριν, δηλαδή στην δημιουργία εσωτερικών τάσεων λόγω διόγκωσης της μήτρας με αποτέλεσμα την αύξηση της συνοχής μεταξύ μήτρας και κόκκων κατόπιν «συρρίκνωσης» της μεσοφάσης.

### **4.3.2. Μέτρο ελαστικότητας**

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας προκύπτουν από τα διαγράμματα τάσεων-διαμηκών παραμορφώσεων και παρουσιάζονται στα διαγράμματα A3 και A7. Συγκεκριμένα, στο A3, όπου έχουμε τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της περιεκτικότητας σε κόκκους SiC για 0,3,7 και 14 ημέρες παραμονής σε περιβάλλον υγρασίας, παρατηρούμε την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε έγκλεισμα εφόσον το έγκλεισμα είναι καθαρά ελαστικό υλικό, ενώ η μήτρα είναι βισκοελαστικό υλικό και συνεπώς το πρώτο έχει πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Έτσι με την προσθήκη εγκλείσματος στην μήτρα αποδυναμώνεται η βισκοελαστική συμπεριφορά της και αυξάνεται η ελαστικότητα των κόκκων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα με την προσθήκη του εγκλείσματος το υλικό να συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ψαθυρό και λιγότερο όλκιμο. Αυτή η τάση αύξησης του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του ποσοστού σε κόκκους παρατηρείται τόσο όταν το υλικό βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες, όσο και όταν αυτό έχει παραμείνει για 14 ημέρες εντός της θερμομπανιέρας. Σχετικά με την μεγάλη άνοδο που παρουσιάζει η καμπύλη των τριών ημερών παραμονής των δοκιμίων στο νερό για περιεκτικότητες 30% και 40% σε κόκκους θα πρέπει να γίνουν περισσότερα πειράματα για την εξήγηση του φαινομένου.

Στο διάγραμμα A7 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει των ημερών παραμονής του δοκιμίου εντός του ύδατος για δοκίμια με περιεκτικότητας 0%,10%,20%,30% και 40% σε κόκκους. Γενικά παρατηρούμε ότι όσο το υλικό απορροφά υγρασία το μέτρο ελαστικότητας πέφτει. Η πτώση του μέτρου ελαστικότητας φαίνεται να πραγματοποιείται με μεγαλύτερο ρυθμό στο σύνθετο υλικό με μικρά ποσοστά σε κόκκους (10% και 20%) ενώ με μικρότερο ρυθμό όταν έχουμε υλικό με μεγαλύτερο ποσοστό εγκλείσματος (30% και 40%). Η πτώση του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της απορρόφησης υγρασίας οφείλεται στο φαινόμενο εμποτισμού της μήτρας, όπου κατά την απορρόφηση νερού από το υλικό τα μόρια του νερού διεισδύουν μεταξύ των μακρομορίων της μήτρας, με αποτέλεσμα οι χημικοί δεσμοί που συνδέουν αυτά τα μακρομόρια να χαλαρώνουν και έτσι το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου να πέφτει.

Παρατηρούμε επίσης στο διάγραμμα A7 ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά των τιμών του μέτρου ελαστικότητας. Αυτό οφείλεται σε δυο παράγοντες. Πρώτον, με την εμφάνιση των δοκιμίων στο νερό 50°C πέρα από την απορρόφηση της υγρασίας από

το υλικό πραγματοποιείται μια διαδικασία μετασκλήρυνσης λόγω της θερμοκρασίας της θερμοπανιέρας. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ότι στην επιφάνεια του ύδατος της θερμοπανιέρας παρατηρήθηκαν σταγόνες πλαστικοποιητή. Όπως παρατηρήσαμε και στην προηγούμενη παράγραφο η παρουσία πλαστικοποιητή μειώνει το μέτρο ελαστικότητας, άρα η εκροή πλαστικοποιητή συνέβαλλε στην αύξηση του μέτρου ελαστικότητας σε κάποιο βαθμό.

Στα διαγράμματα E1,E2,E3 και E4 συγκρίνουμε τις πειραματικές τιμές με τα αποτελέσματα των θεωρητικών μοντέλων της Παρ.2 για 0,3,7 και 14 ημέρες παραμονής αντίστοιχα. Παρατηρούμε στο διάγραμμα M1 το μοντέλο Counto (το οποίο γνωρίζουμε ότι επαληθεύει κυρίως δεδομένα από υλικά όπως το σκυρόδεμα) να προβλέπει σχεδόν παράλληλη μετατόπιση των μετρήσεων με την αύξηση του χρόνου παραμονής στο νερό. Στα υπόλοιπα μοντέλα (διαγράμματα M3,M5,M7,M9,M11,M13,M15,M17) παρατηρούμε παράλληλη μετατόπιση των καμπυλών προς χαμηλότερες τιμές ελαστικότητας καθώς αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στο νερό. Ενώ αυτή η πτώση είναι αναμενόμενη παρατηρούμε ότι σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα η καμπύλη για παραμονή σε υγρασία για 14 ημέρες(κορεσμός) είναι πιο πάνω από αυτές των 3 και 7 ημερών πράγμα που σημαίνει ότι η ελαστικότητα για όλα τα ποσοστά εγκλείσματος SiC είναι μεγαλύτερη. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί στους δυο παράγοντες που αναλύσαμε προηγουμένως (μετασκλήρυνση και εκροή πλαστικοποιητή).

Επιπλέον έγινε σύγκριση με βάση τα ίδια μοντέλα σε συνάρτηση με τον χρόνο παραμονής κρατώντας σταθερή την περιεκτικότητα σε έγκλεισμα SiC στα E5,E6,E7,E8 και E9. Εδώ και πάλι παρατηρούμε το μοντέλο Counto να αποκλίνει περισσότερο ενώ τα υπόλοιπα φαίνονται να ακολουθούν τα πειραματικά δεδομένα.

Όπως είδαμε στην Παρ.2 όλα τα μοντέλα που μελετήθηκαν είχαν δυο σημαντικούς παράγοντες, το μέτρο ελαστικότητας της καθαρής μήτρας ( $E_m$ ) και το ποσοστό εγκλείσματος ( $U_f$ ). Στα διαγράμματα M1,M3,M5,M7,M9,M11,M13,M15,M17 φαίνεται η εξάρτηση του κάθε μοντέλου από την μεταβολή του ( $E_m$ ) για σταθερό ποσοστό εγκλείσματος. Παρατηρούμε σχεδόν παράλληλες καμπύλες, με αυτές για τα μεγαλύτερα ποσοστά εγκλείσματος να είναι πάντα σε υψηλότερες τιμές όπως ήταν αναμενόμενο. Εδώ γίνεται πιο έντονο το φαινόμενο που παρατηρήσαμε και πριν, δηλαδή η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας παρά την πάροδο του χρόνου παραμονής στο νερό. Άρα μπορούμε να υποθέσουμε ότι μετά τις 7 ημέρες

υπερισχύουν οι παράγοντες που περιγράψαμε πριν, δηλαδή του φαινομένου εμποτισμού της μήτρας και γι' αυτό παρατηρούμε αυτή την αύξηση του  $E_{com}$ .

### **4.3.3. Τάση θραύσης**

Στα διαγράμματα A4 και A8 έχουμε τις τιμές για την τάση θραύσης  $\sigma_c$  για κάθε περιεκτικότητα ανάλογα με το πόσες μέρες βρίσκεται το δοκίμιο εντός του νερού και την  $\sigma_c$  για κάθε μέρα παραμονής ανάλογα με την περιεκτικότητα αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε στο A4 την τάση θραύσης να ελαττώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό σε κόκκους SiC. Αυτό γίνεται διότι όσο περισσότεροι είναι οι κόκκοι τόσο περισσότερες ασυνέχειες ανά μονάδα όγκου υπάρχουν στη δομή του υλικού. Έτσι έχουμε αύξηση των σημείων συγκέντρωσης τάσης με την προσθήκη κόκκων, πράγμα που μειώνει την αντοχή του υλικού.

Στο διάγραμμα A8 παρατηρούμε πιο καθαρά την μείωση της τάσης θραύσης που προκαλεί η αύξηση του ποσοστού του εγκλείσματος με τις καμπύλες για μεγαλύτερο ποσοστό να είναι εμφανώς χαμηλότερες. Παρατηρούμε ακόμη και στις τρεις καμπύλες περιεκτικότητας ότι η τάση θραύσης πέφτει για τις πρώτες 6 ημέρες παραμονής στην θερμομπανιέρα, ενώ από την ημέρα 7 και έπειτα η τάση σταθεροποιείται ή και ανεβαίνει ελαφρώς. Αυτό γίνεται διότι με την απορρόφηση του ύδατος η μήτρα διογκώνεται και το πλέγμα του υλικού χαλαρώνει και έτσι γίνεται πιο όλκιμο. Όσον αφορά την σταθεροποίηση και την μικρή αύξηση, αυτές οφείλονται στην μετασκλήρυνση εντός της θερμομπανιέρας και στην διαρροή πλαστικοποιητή που φαίνονται να υπερσχύουν μετά τις 7 ημέρες και να κάνουν το υλικό πιο συνεκτικό.

Στα διαγράμματα B1,B2 συγκρίνουμε τα θεωρητικά μοντέλα με τις πειραματικές τιμές. Βλέπουμε στο B1 ότι ενώ τα μοντέλα προβλέπουν μείωση της τάσης θραύσης τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν αυξομειώσεις. Αυτή η μη καθαρή συμπεριφορά (καθαρή αύξηση ή μείωση) μπορεί να οφείλεται σε τυχόν συσσωματώματα των κόκκων εντός του υλικού, σε ανομοιομορφία του σχήματος των κόκκων και του μεγέθους ή σε συνδυασμό των παραγόντων αυτών. Τέλος στα T1,T2,T3 βλέπουμε πάλι την απόκλιση των θεωρητικών μοντέλων και μπορούμε να πούμε ότι παρατηρώντας τις σχεδόν σταθερές ευθείες η αύξηση της υγρασίας σε ένα δοκίμιο με εγκλείσμα δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τάση θραύσης.

Στα διαγράμματα P1,P3,P5 και P7 έχουμε την μεταβολή της  $\sigma_c$  ξεχωριστά για κάθε θεωρητικό μοντέλο συναρτήσει του ποσοστού εγκλείσματος για συγκεκριμένο χρόνο παραμονής στο νερό. Εδώ φαίνεται η πτώση της θραύσης αλλά και το παράδοξο που παρατηρήσαμε στις μετρήσεις ελαστικότητας, όπου κάποιες φορές η παραμονή για περισσότερες μέρες στο νερό αυξάνει την ελαστική σταθερά και εξηγείται με τους δυο παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στα P2,P4,P6 και P8 όπου κρατάμε σταθερά τα ποσοστά εγκλείσματος για τα ίδια μοντέλα φαίνεται σε όλα μια μικρή πτώση της  $\sigma_c$  η οποία έως και εξαλείφεται μετά τις 7 πρώτες ημέρες.

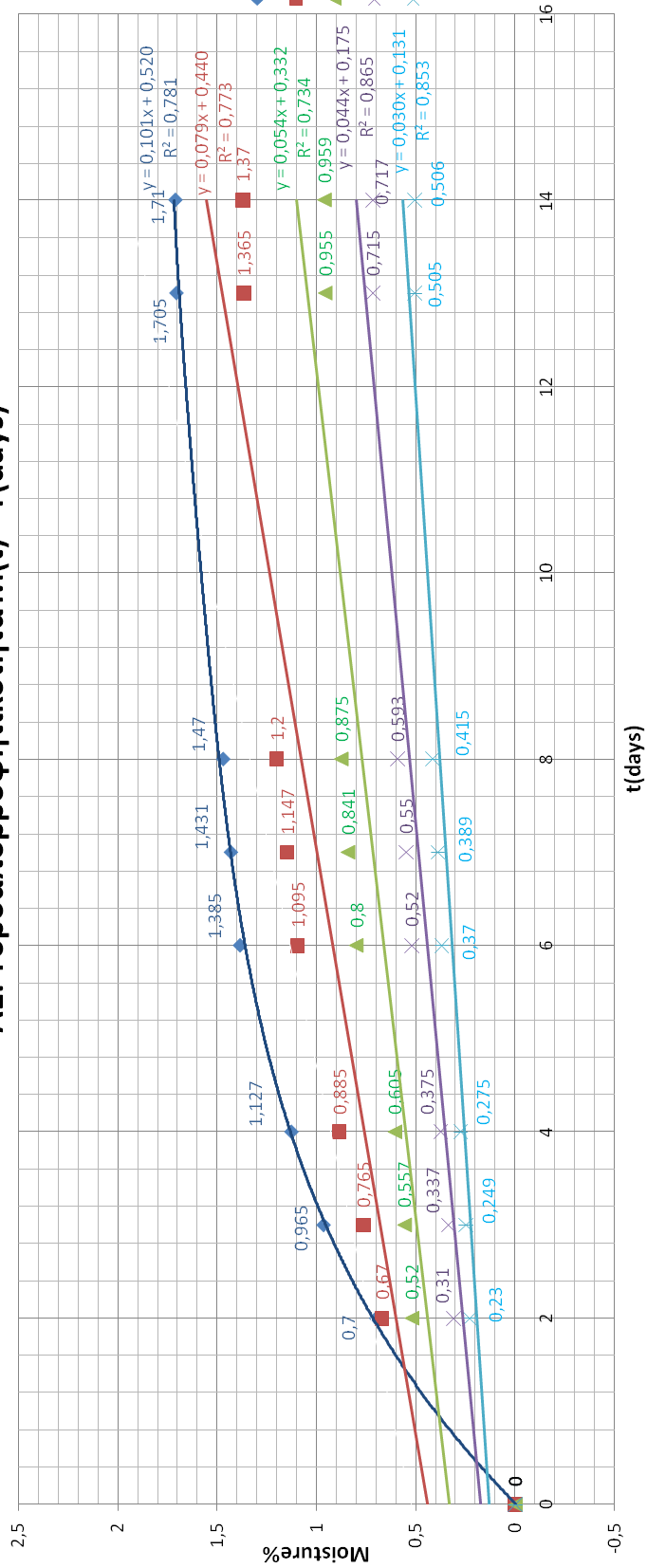
#### **4.3.4. Παραμόρφωση θραύσης**

Στα διαγράμματα A5,A9 και Δ1-Δ13 βλέπουμε την επίδραση της υγρασίας στην παραμόρφωση θραύσης (διαμήκης) των δοκιμίων και συγκρίνουμε τα θεωρητικά μοντέλα των Smith (2.28) και Nielsen (2.30).

Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε στο A5 την πτώση της παραμόρφωσης θραύσης καθώς το ποσοστό εγκλείσματος αυξάνεται για όλες τις ημέρες παραμονής στο νερό. Επιπλέον στο A9 βλέπουμε ξανά το φαινόμενο που παρατηρήσαμε στην ελαστικότητα και στην τάση θραύσης, δηλαδή τις τιμές να αυξάνονται μετά τις 7 ημέρες στην θερμοπανιέρα για μεγάλα ποσοστά περιεκτικότητας SiC.

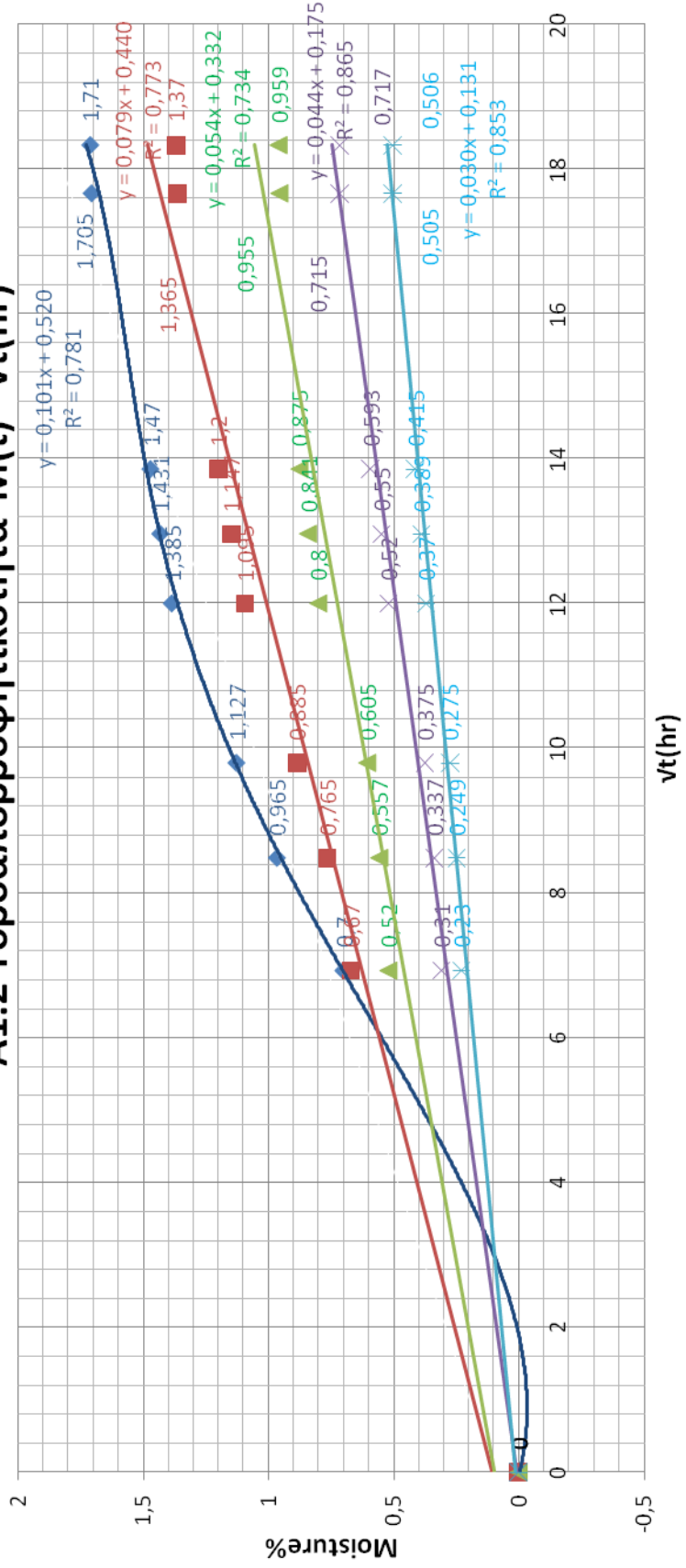
Στα Δ1-Δ4 παρατηρούμε αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών ιδιαίτερα όσο αυξάνονται οι ημέρες παραμονής σε περιβάλλον υγρασίας. Αυτό γίνεται προφανές στα Δ9-Δ13 όπου για σταθερό ποσοστό εγκλείσματος από 10% και άνω βλέπουμε τις πειραματικές τιμές να διαφέρουν σημαντικά από τα μοντέλα. Τέλος εξετάζοντας κάθε μοντέλο ξεχωριστά σε αναλογία με το ποσοστό εγκλείσματος και το  $\varepsilon_m$  ( παραμόρφωση μήτρας που αλλάζει σε σχέση με τον χρόνο παραμονής στο νερό) βλέπουμε ότι και οι δύο θεωρίες δείχνουν μικρή αύξηση για 14 ημέρες.

### Α1. Υδροαπορροφητικότητα M(t) - T(days)

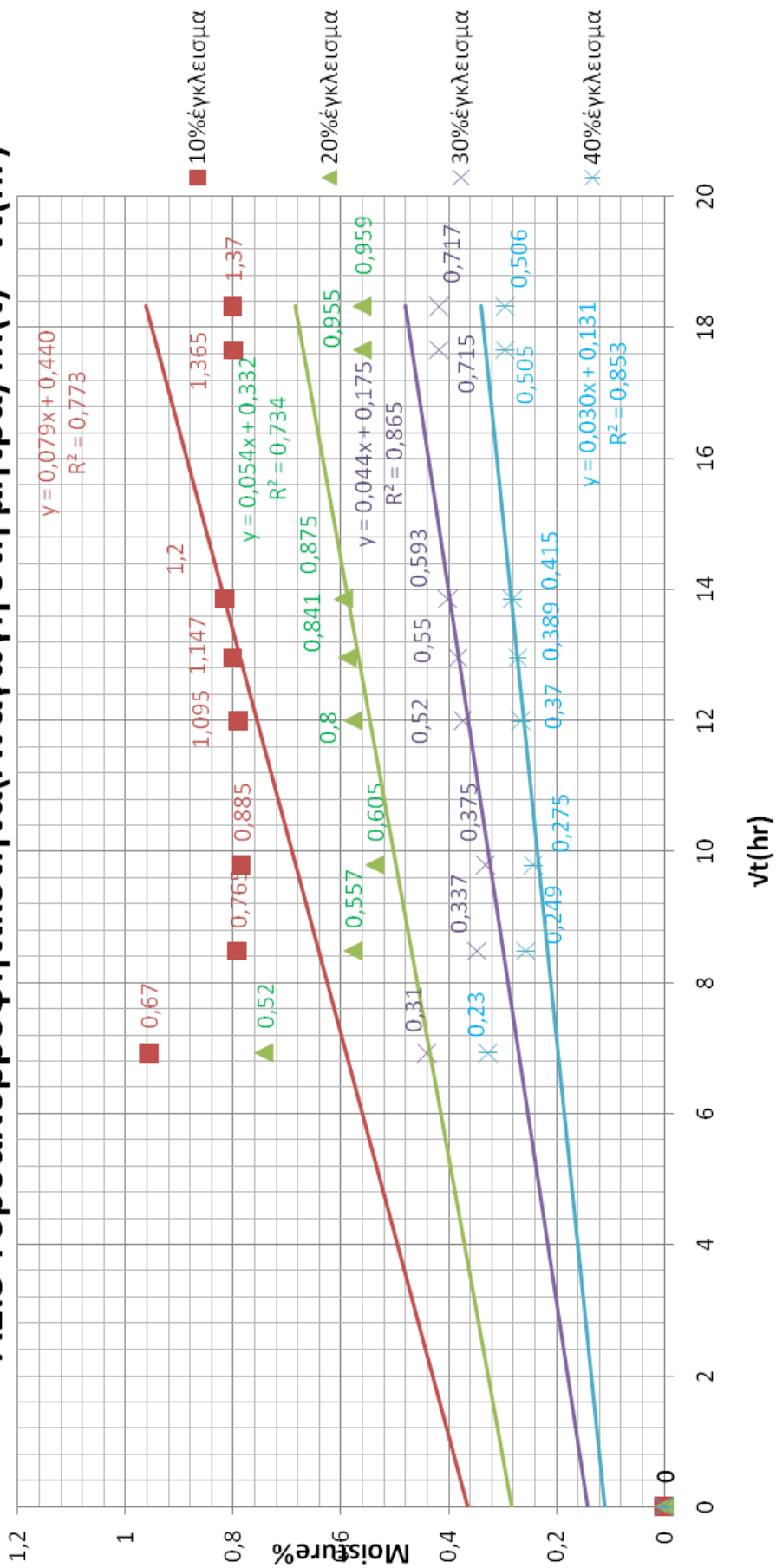




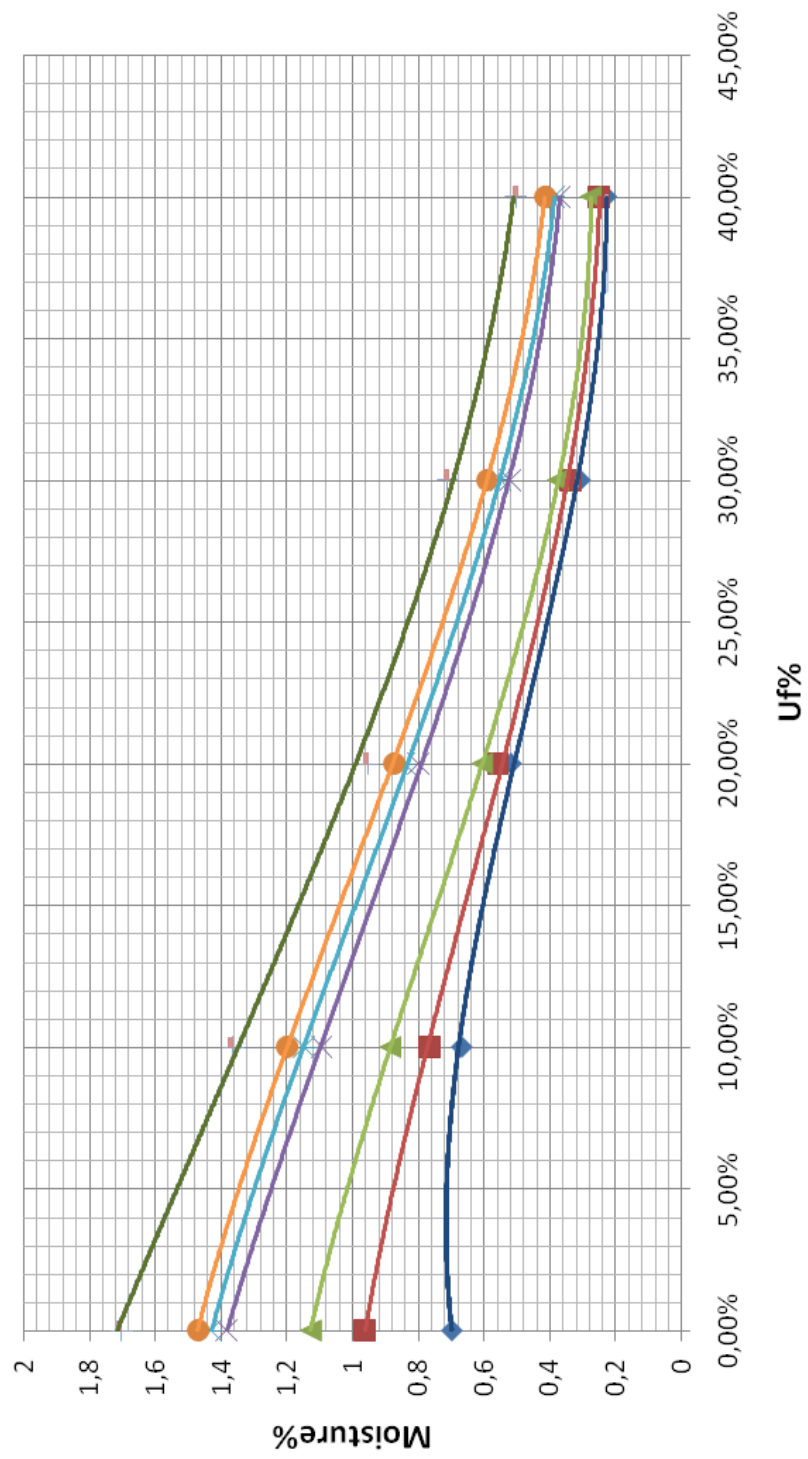
### A1.2 Υδροαπορροφητικότητα $M(t) - vt(hr)$



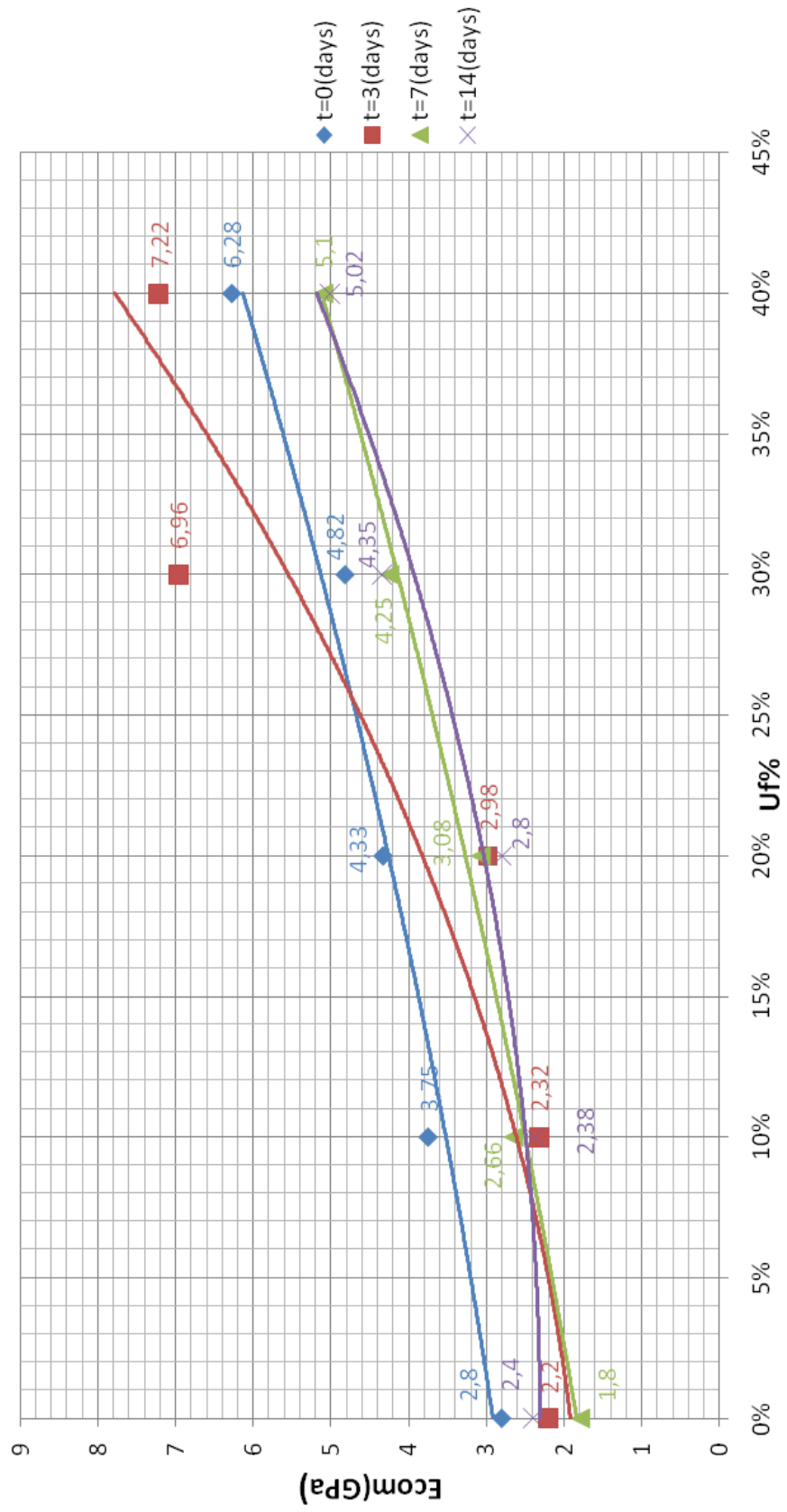
### A1.3 Υδροαπορροφητικότητα(Αναγωγή στη μήτρα) $M(t) - vt(hr)$



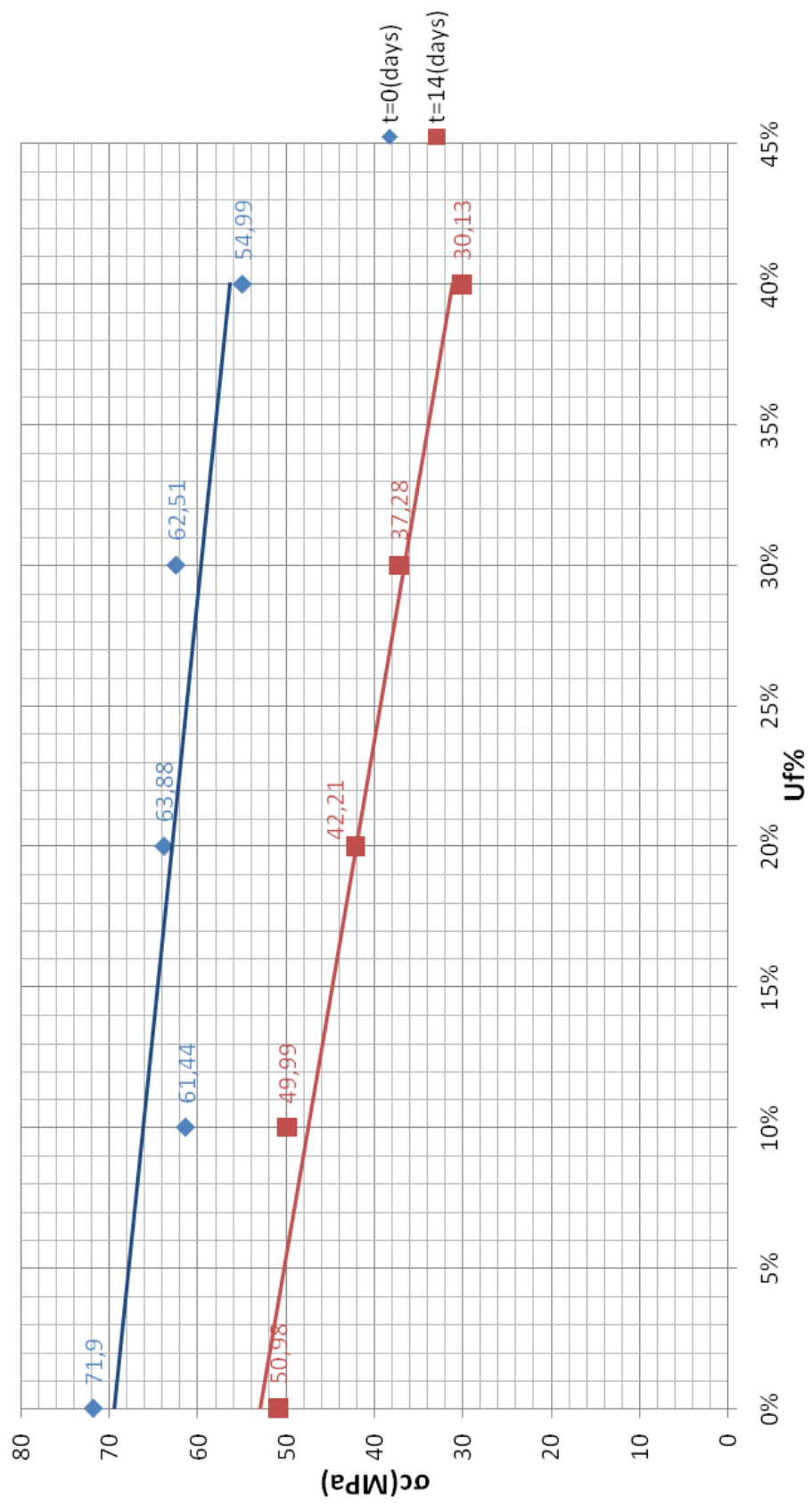
## A2. Υδροαπορροφητικότητα $M(t)$ - $Uf\%$



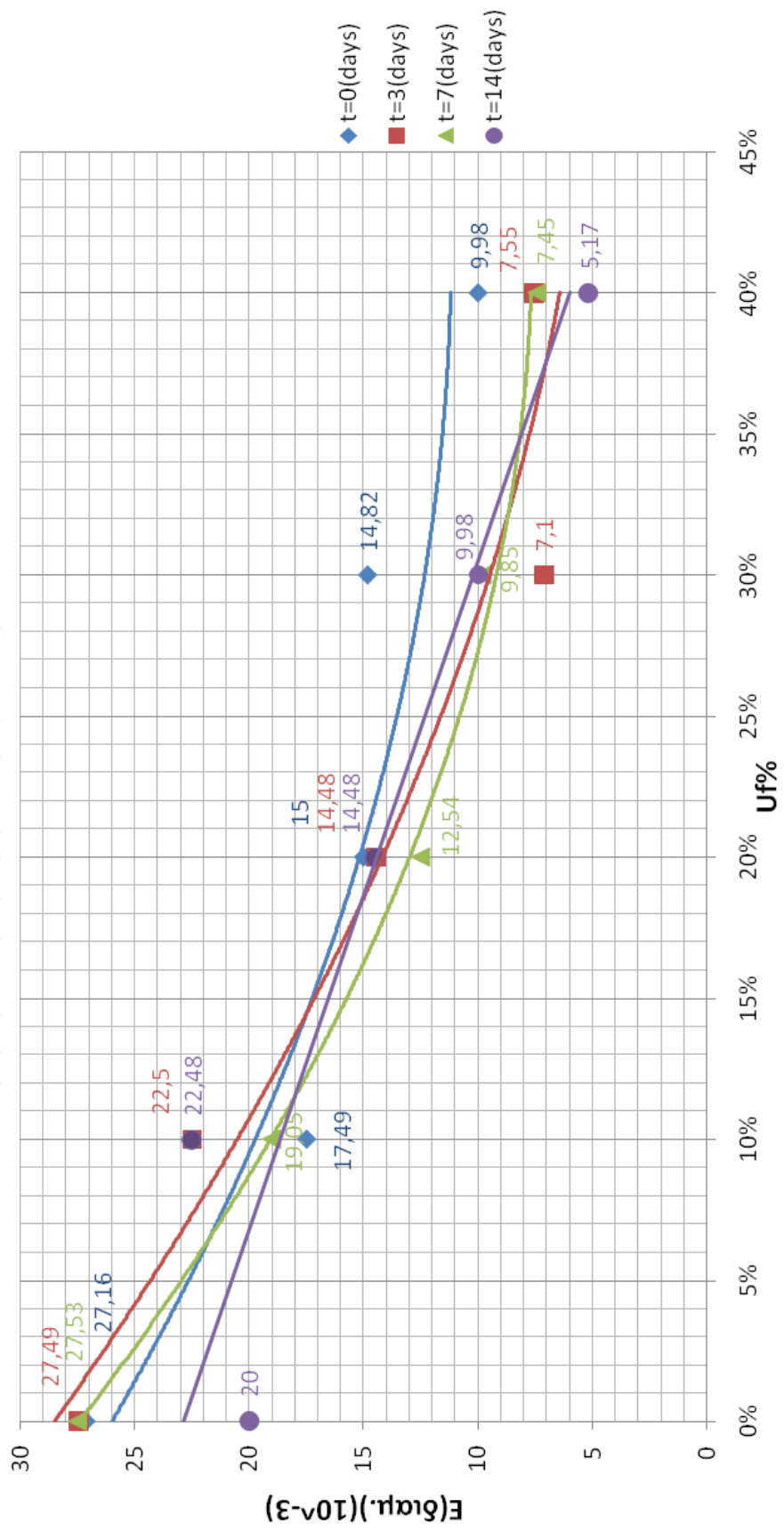
### A3. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-ποσοστό κόκκων



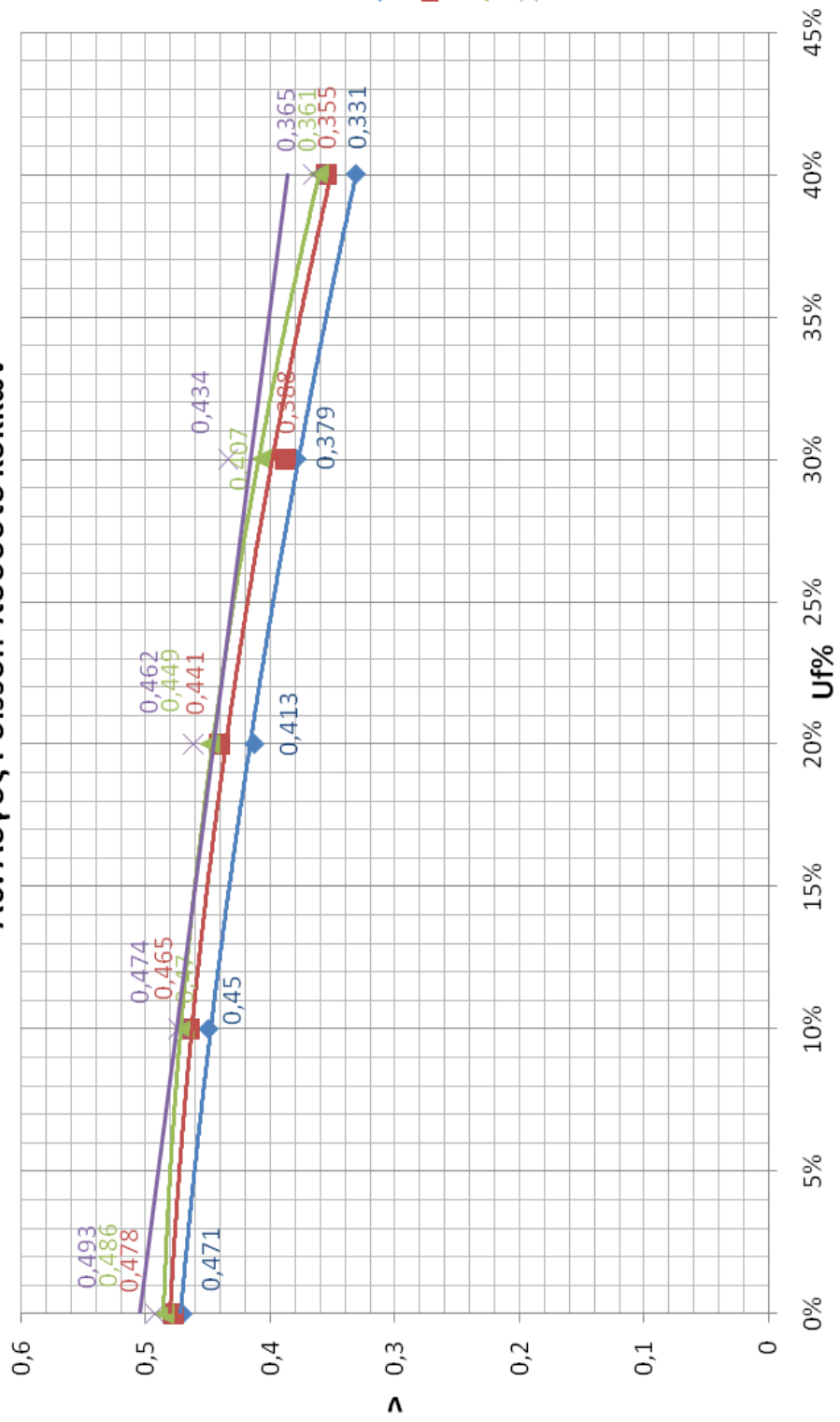
#### Α4. Τάση θραύσης σε-ποσοστό κόκκων



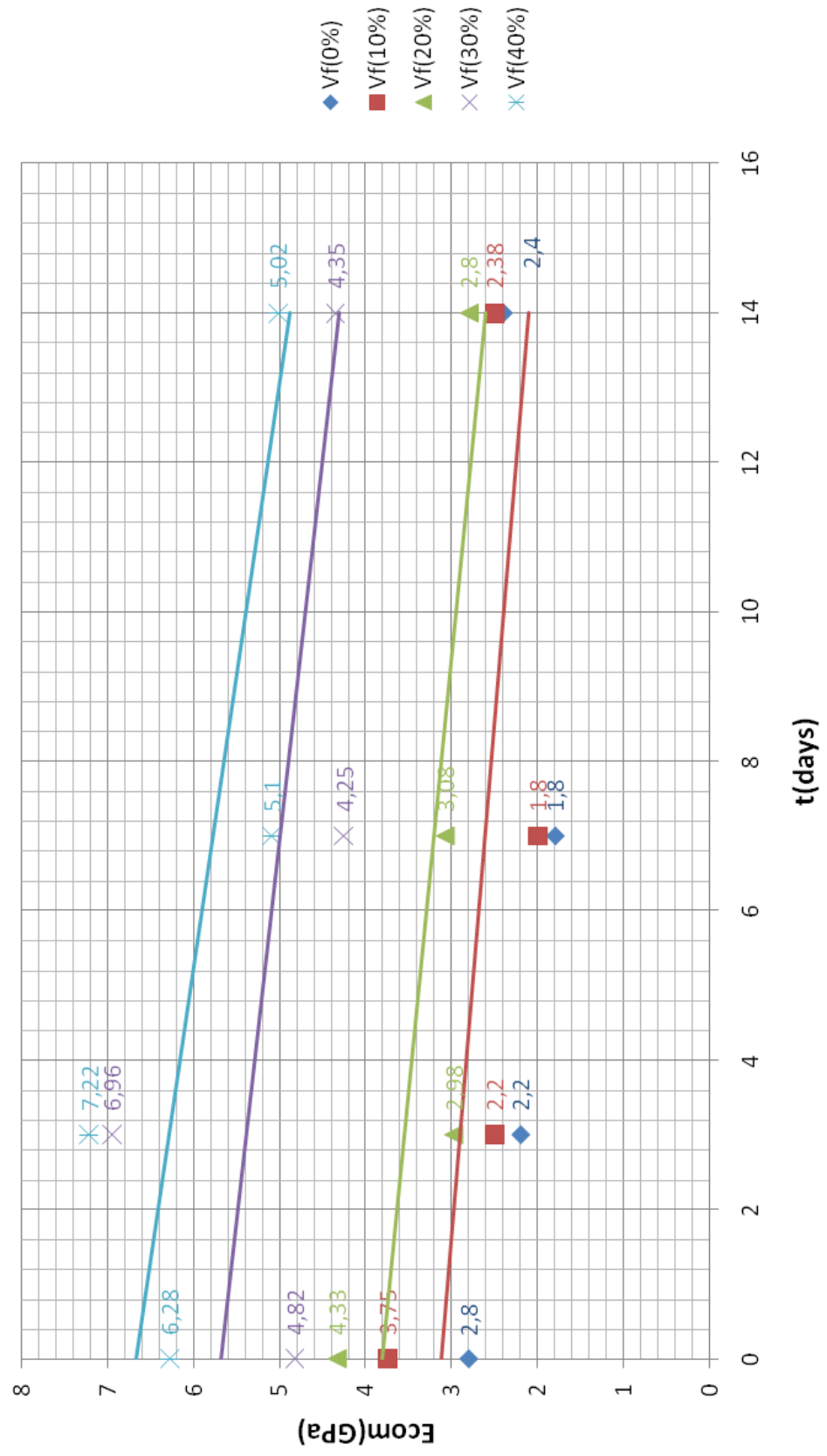
A5. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης-ποσοστό κόκκων



Α6. Λόγος Poisson-ποσοστό κόκκων

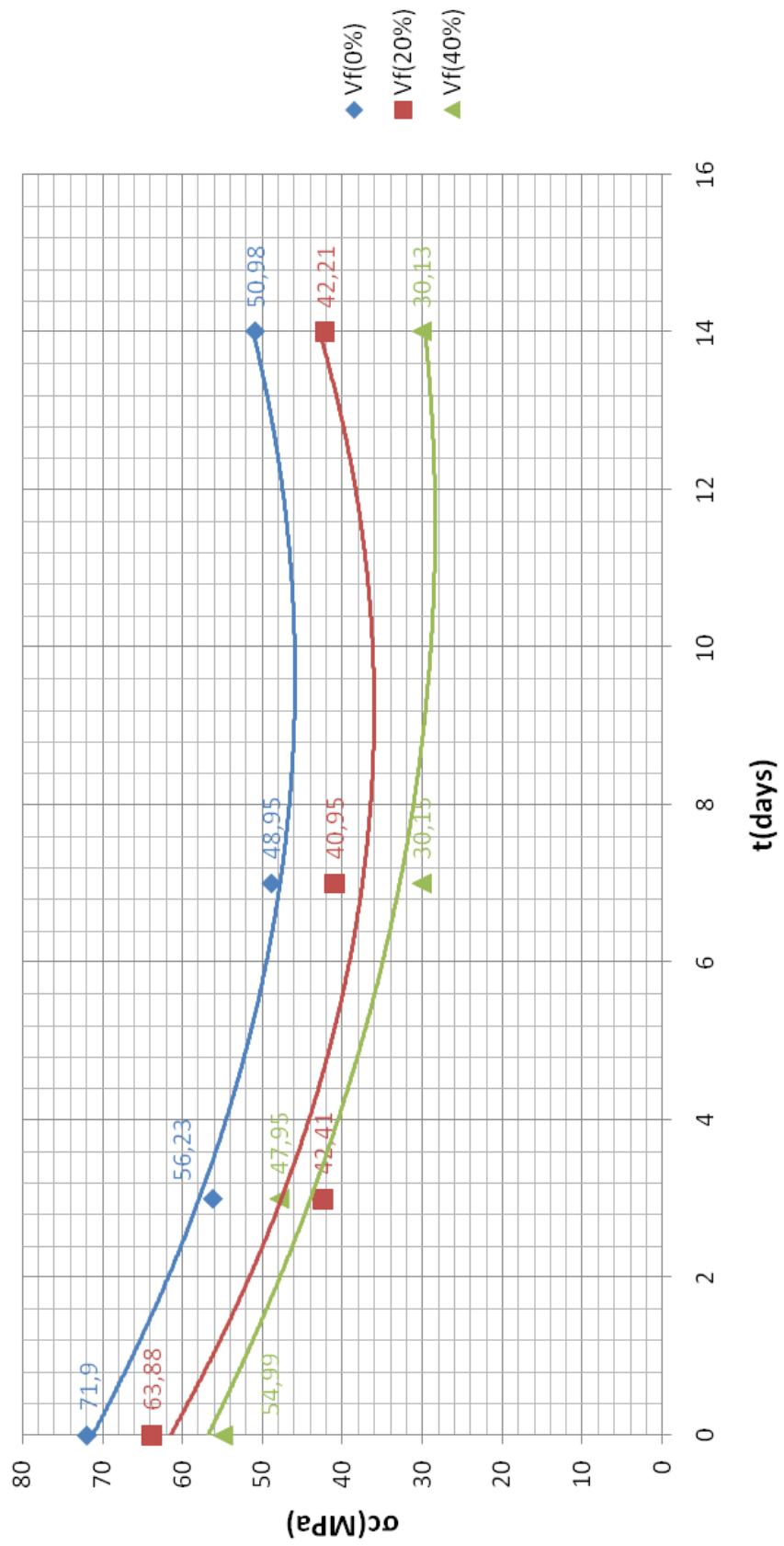


### A7. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-t(days)

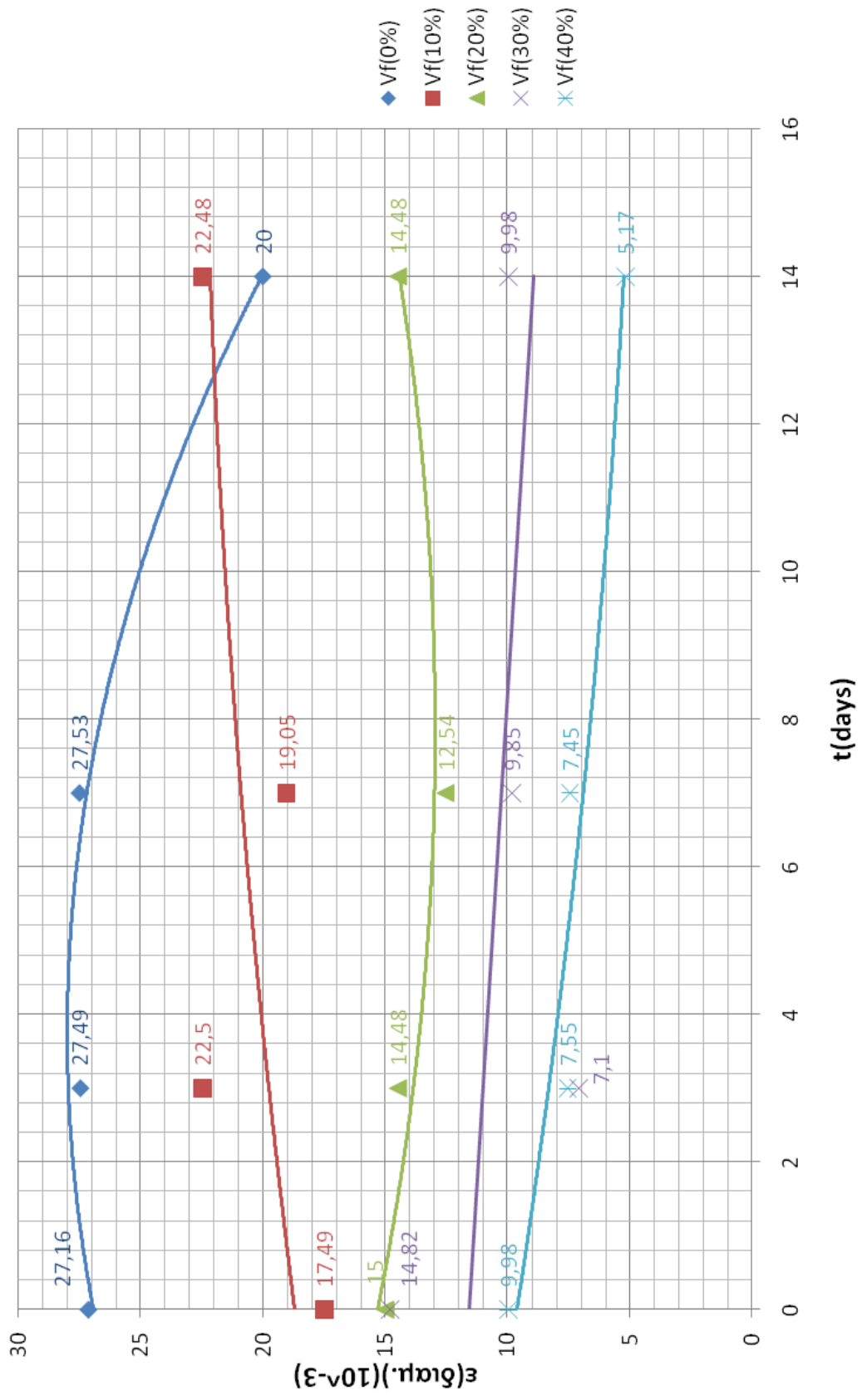




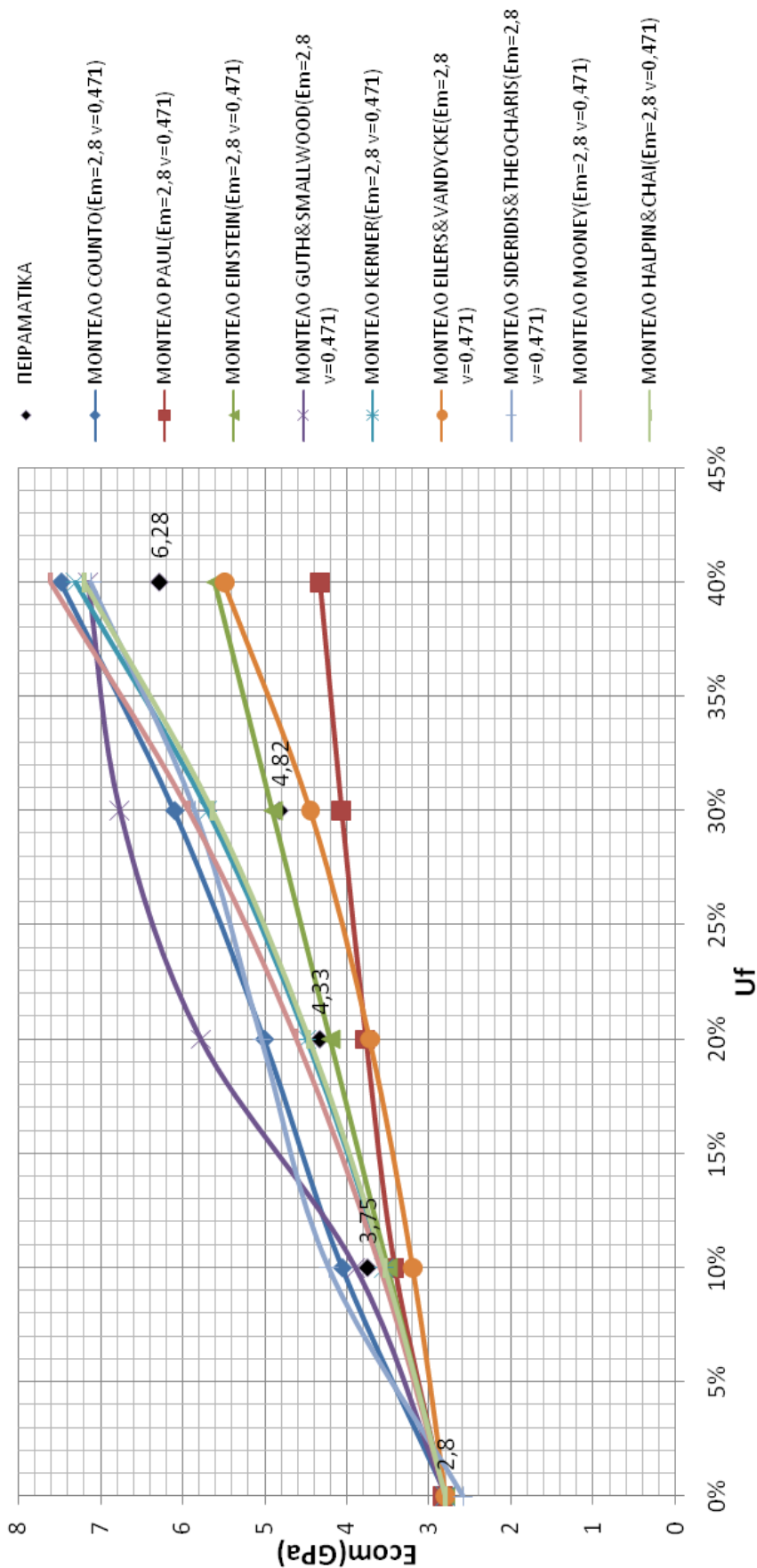
A8. Τάση θραύσης σc- t(days)



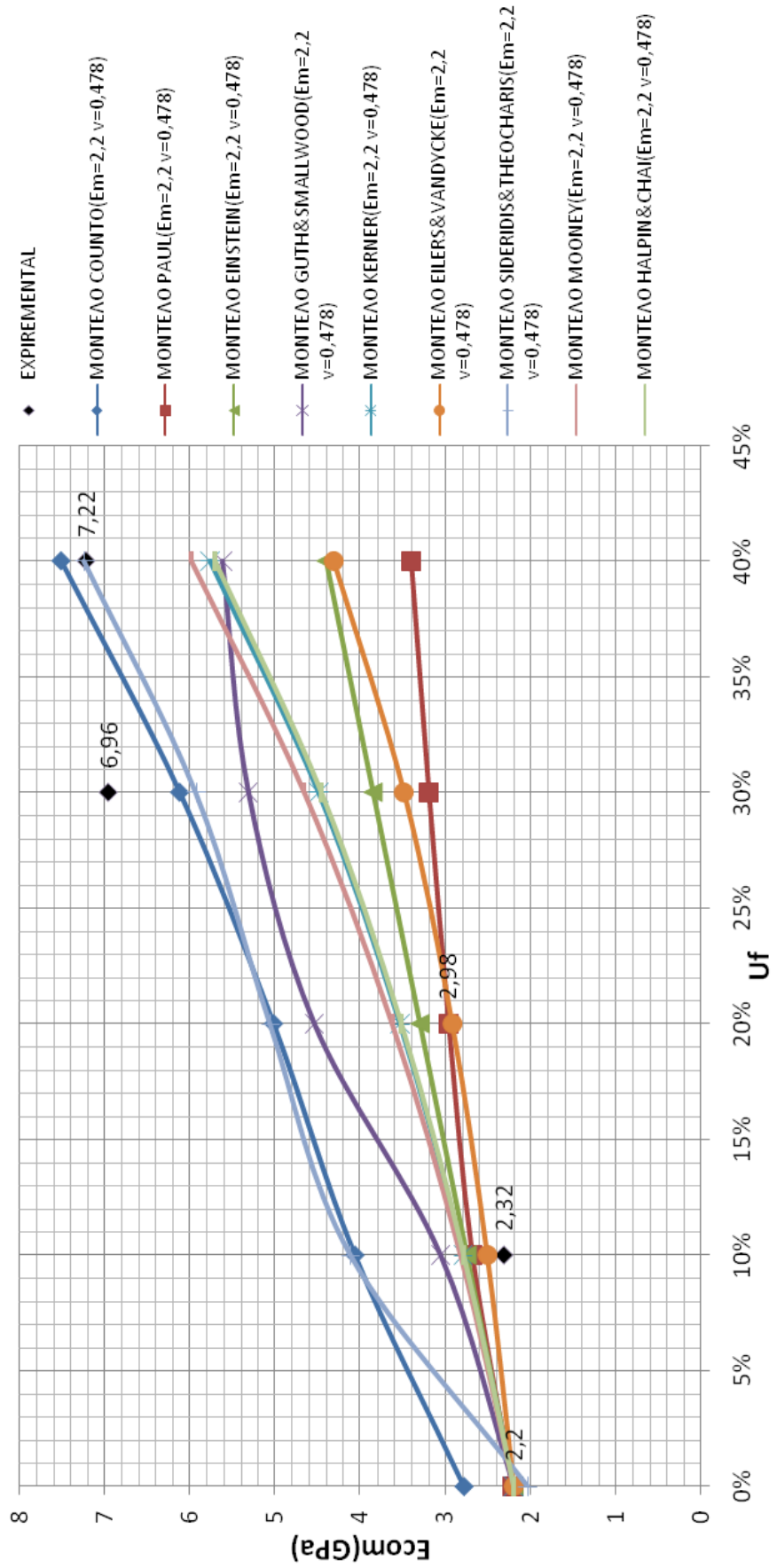
A9. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης-t(days)



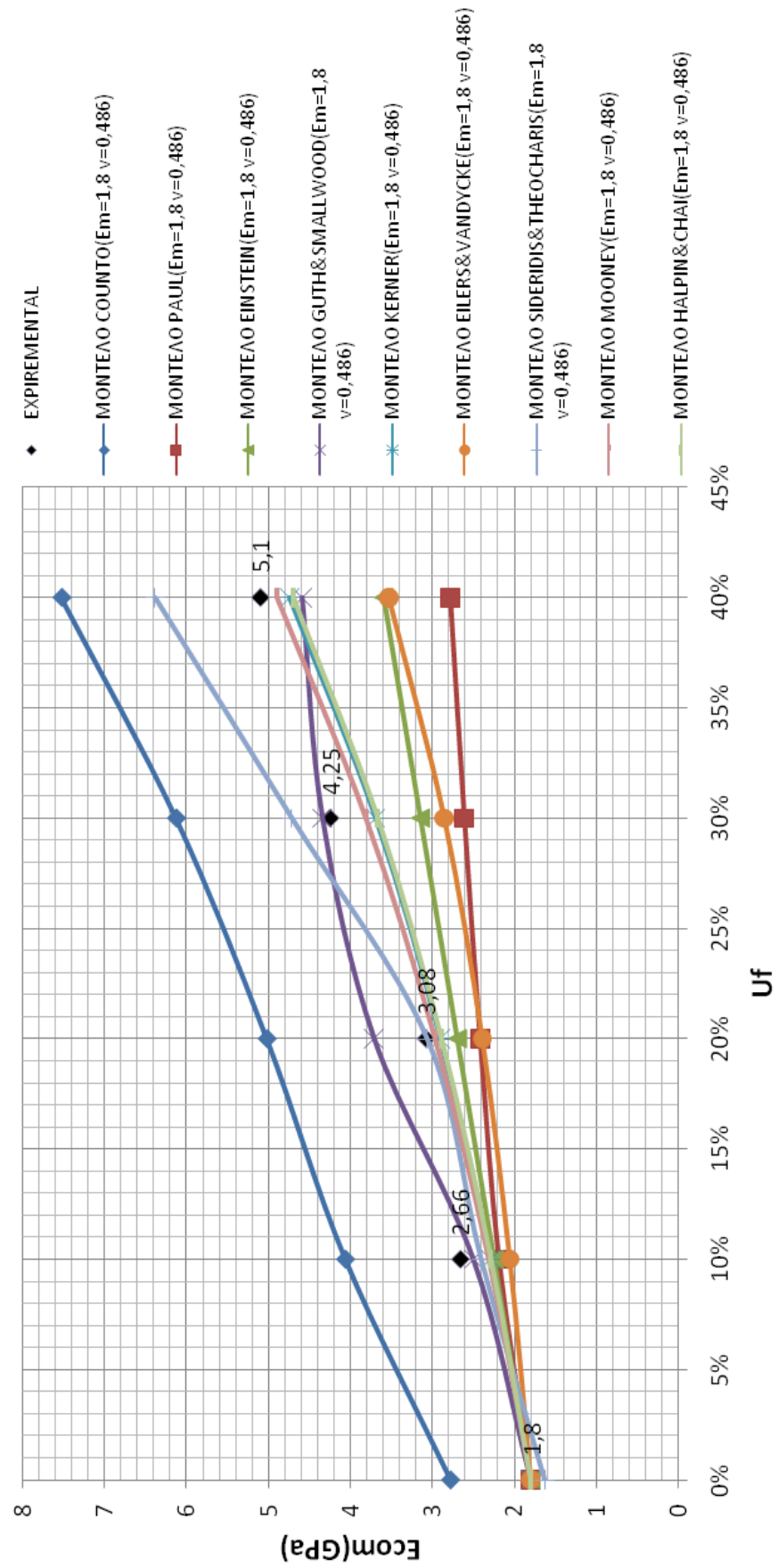
Ε1. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com}$ -ποσοστό κόκκων( $t=0(\text{days})$ )



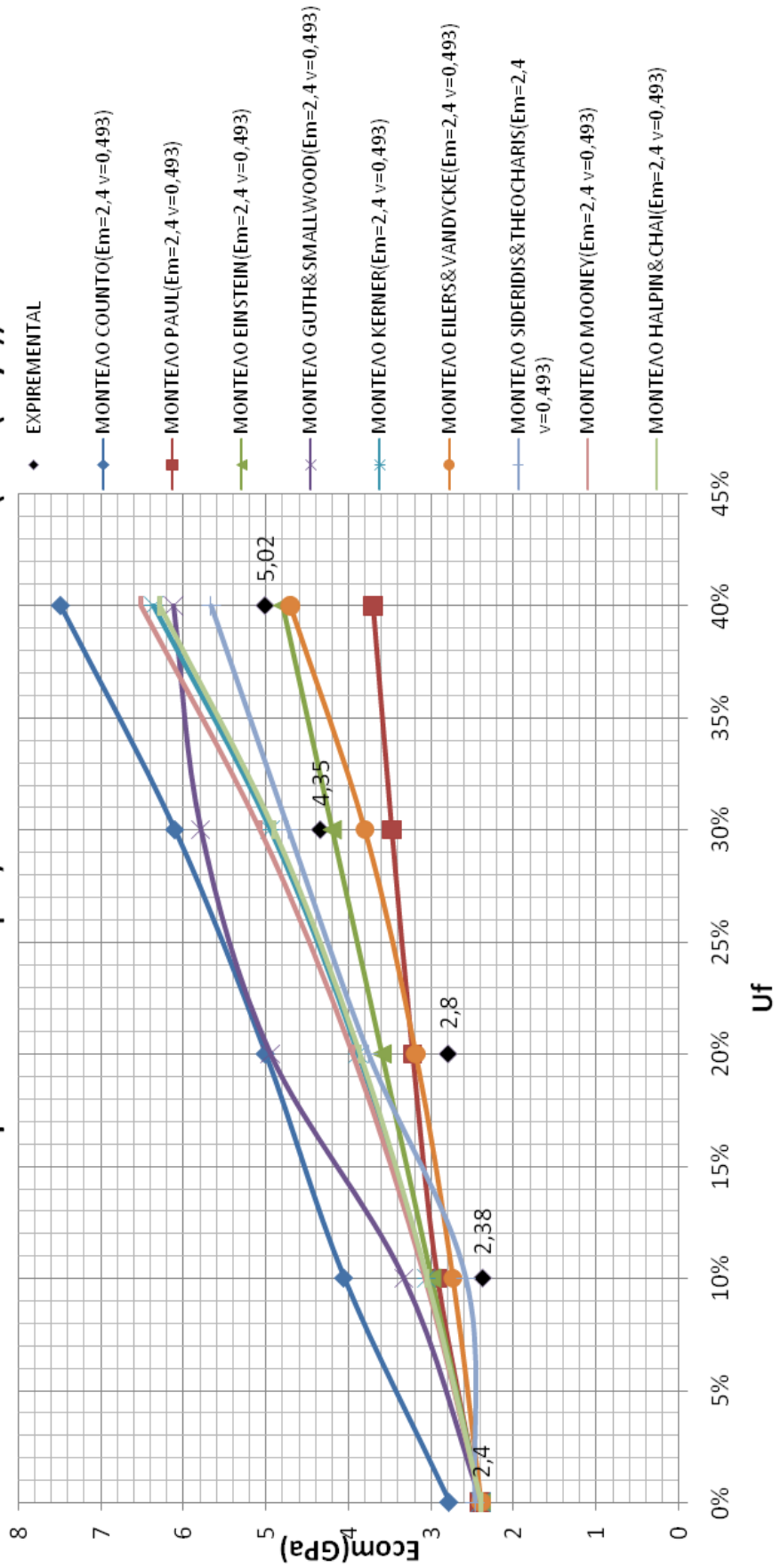
## E2. Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(t=3(days))



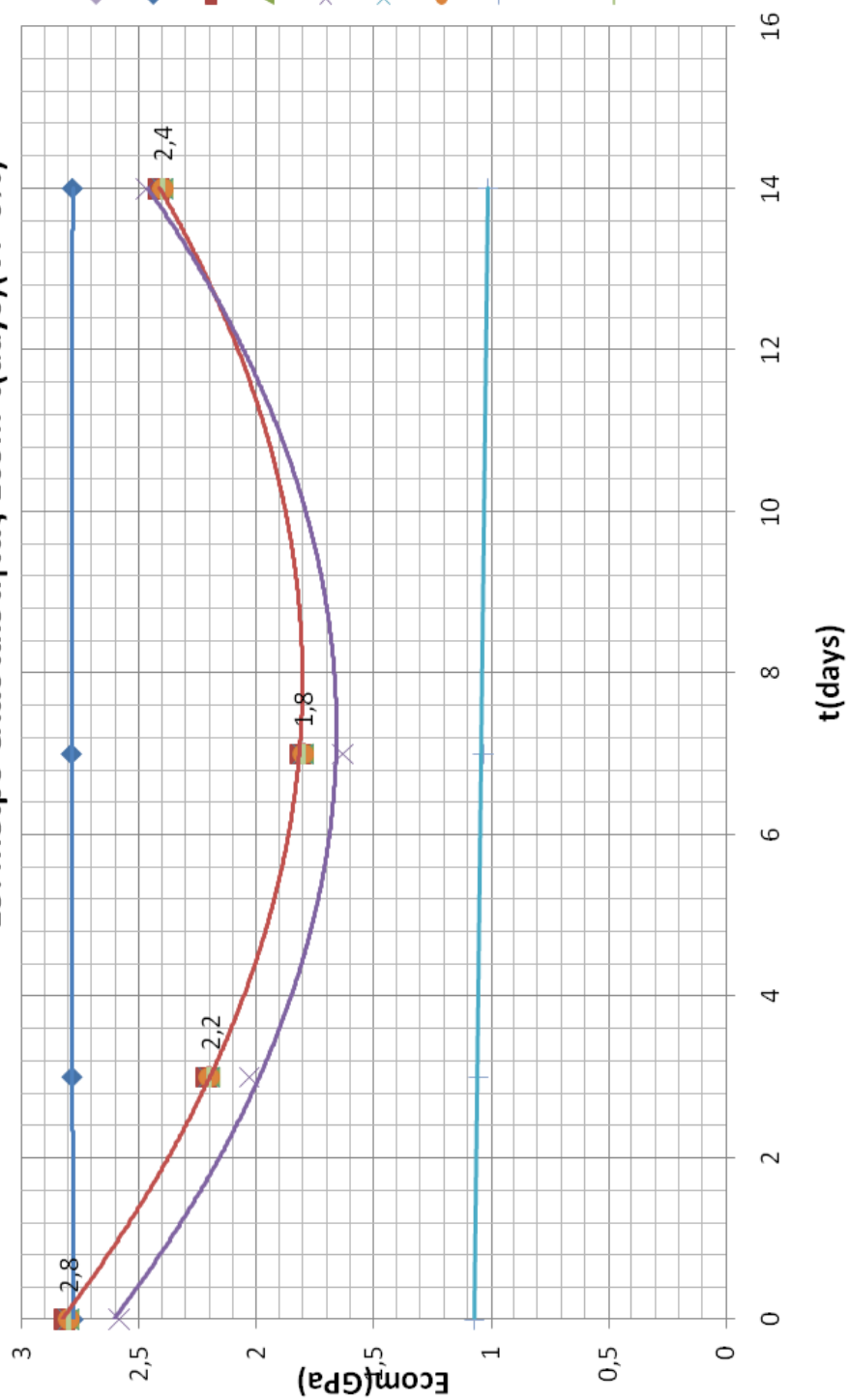
Ε3. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com}$ -ποσοστό κόκκων ( $t=7$ (days))



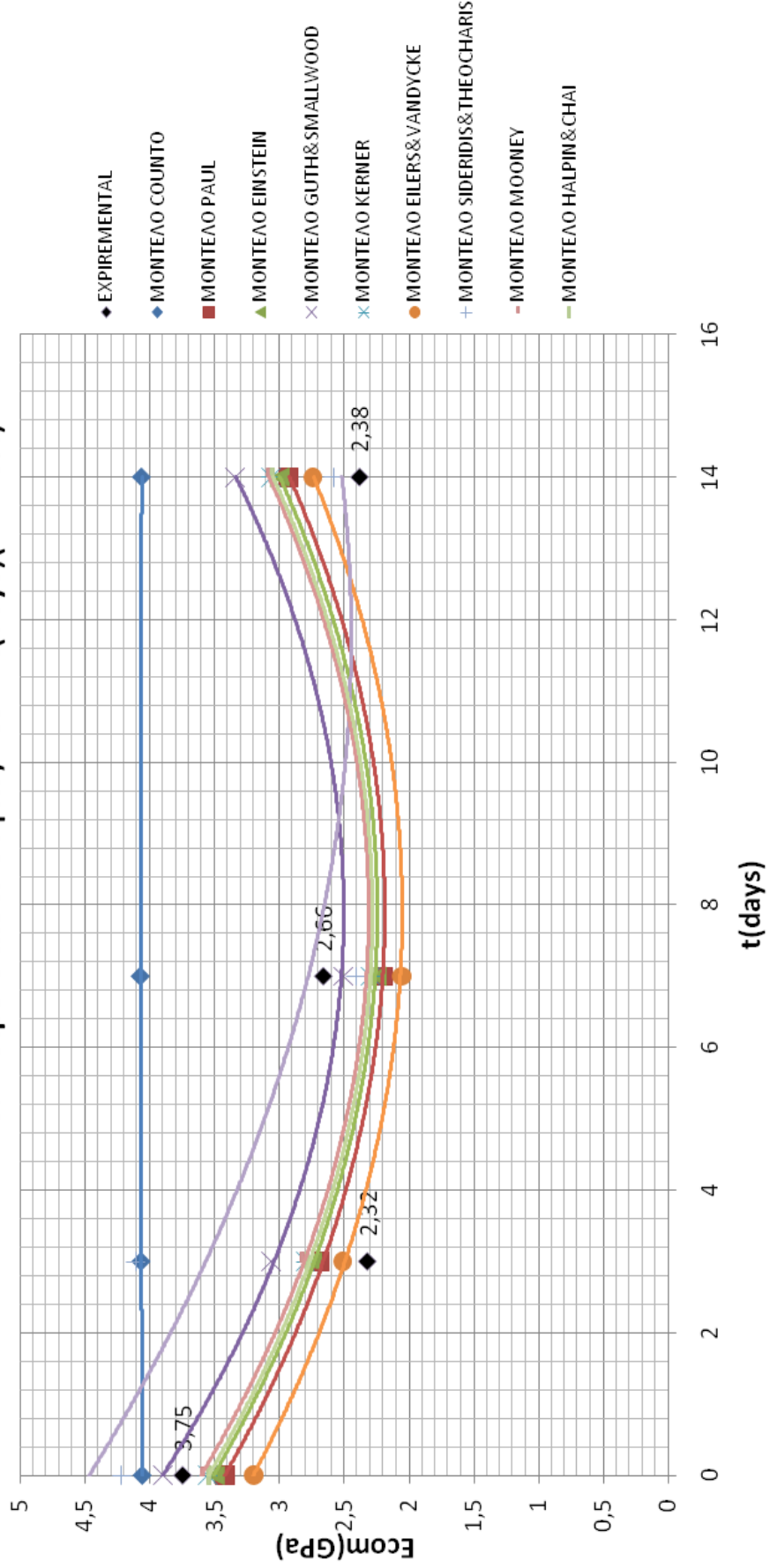
### Ε4. Μέτρο ελαστικότητας $E_{com}$ -ποσοστό κόκκων( $t=14$ (days))



### Ε5. Μέτρο ελαστικότητας $E_{com-t(days)}$ ( $V_f=0\%$ )

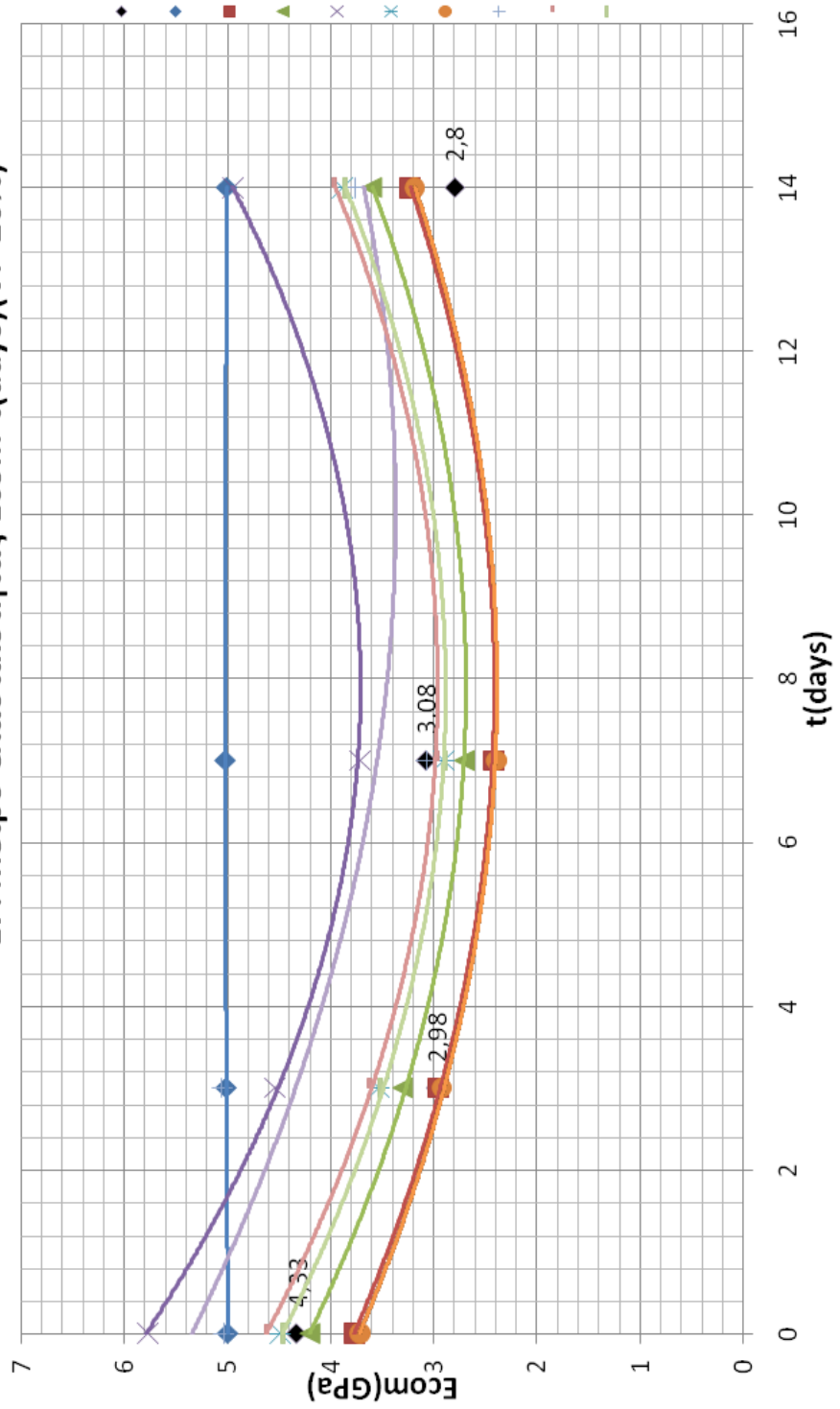


Ε6. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com-t(days)}$  ( $V_f=10\%$ )

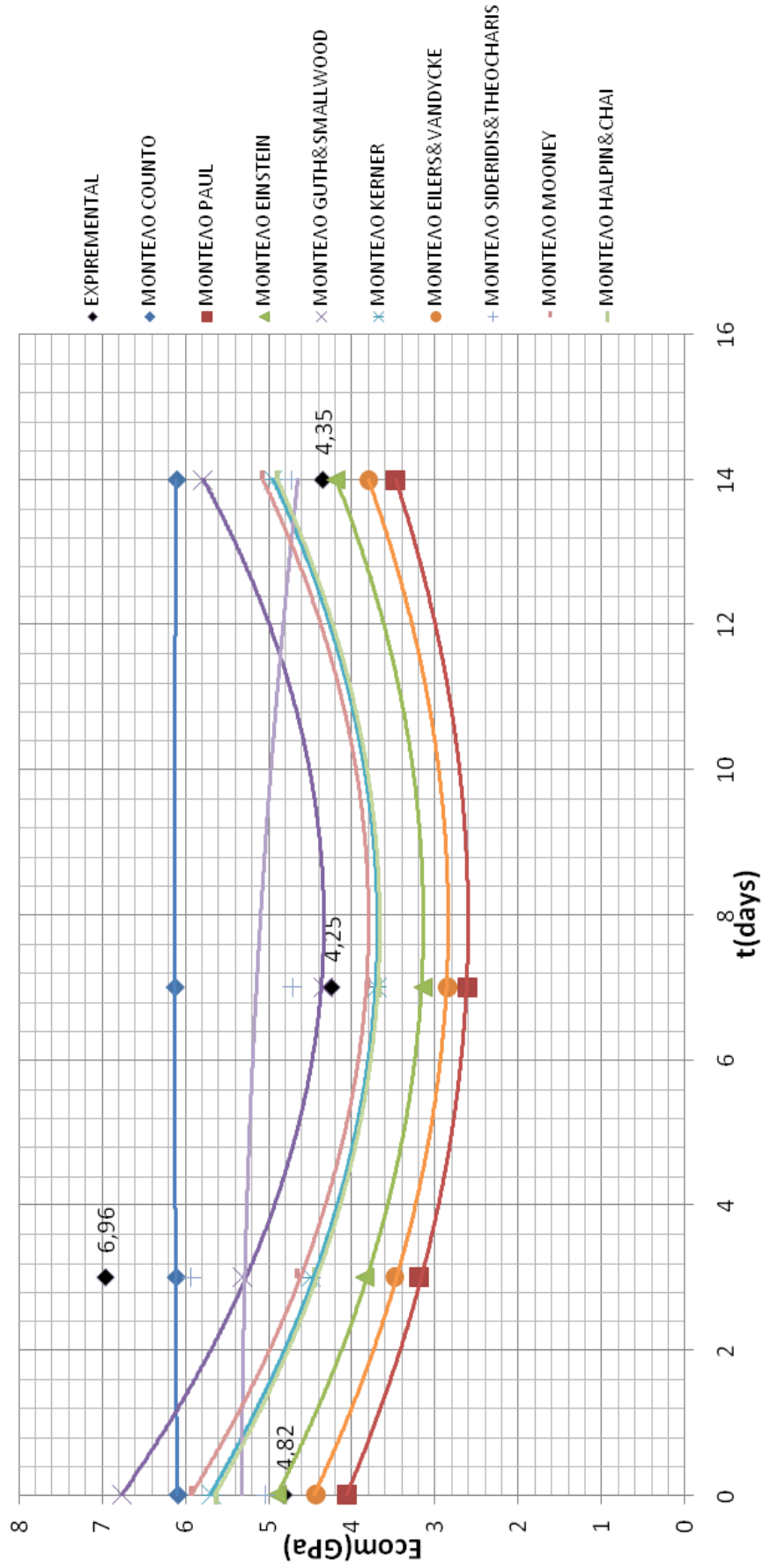




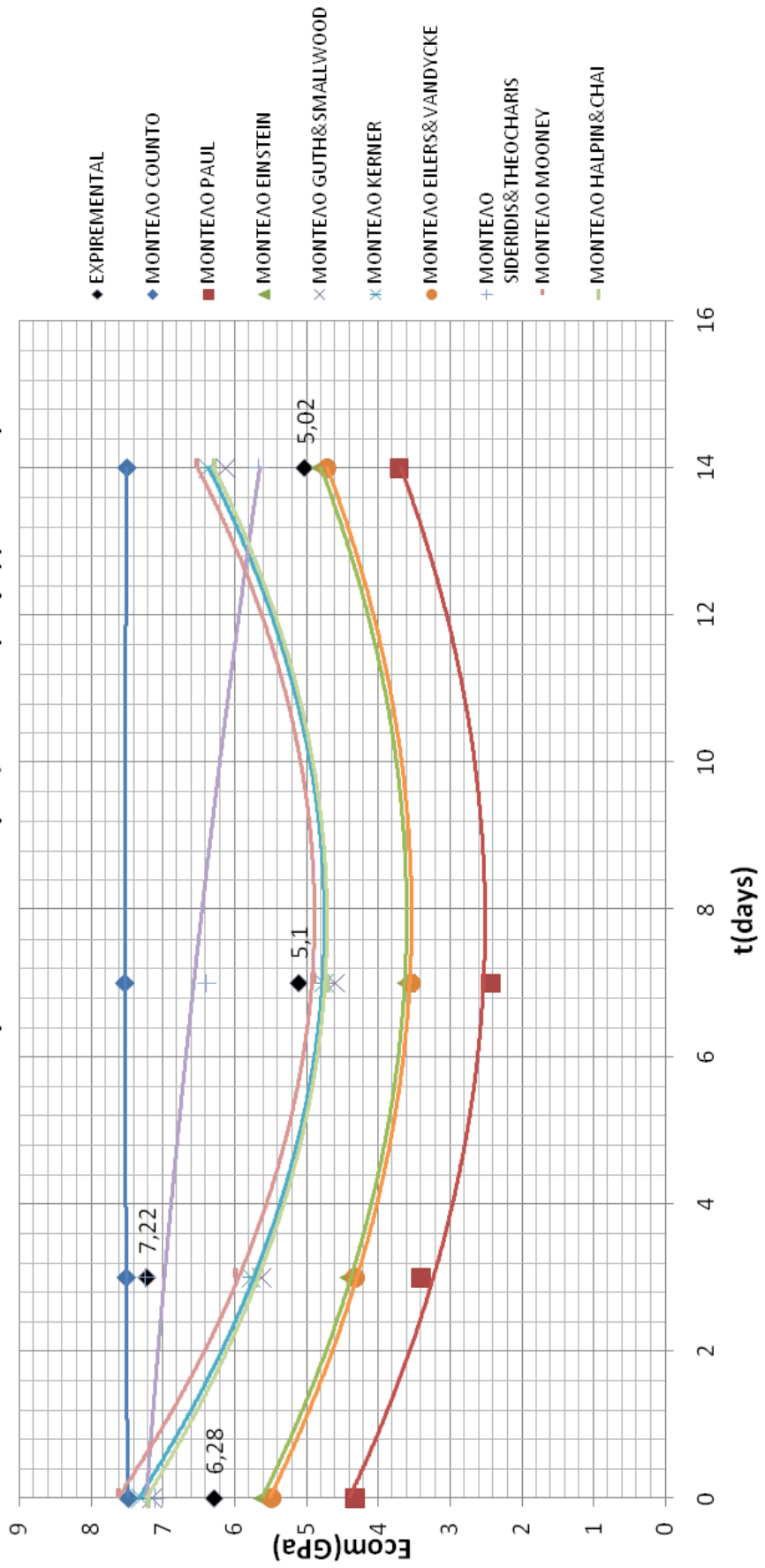
E7. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com-t(days)}$  ( $V_f=20\%$ )



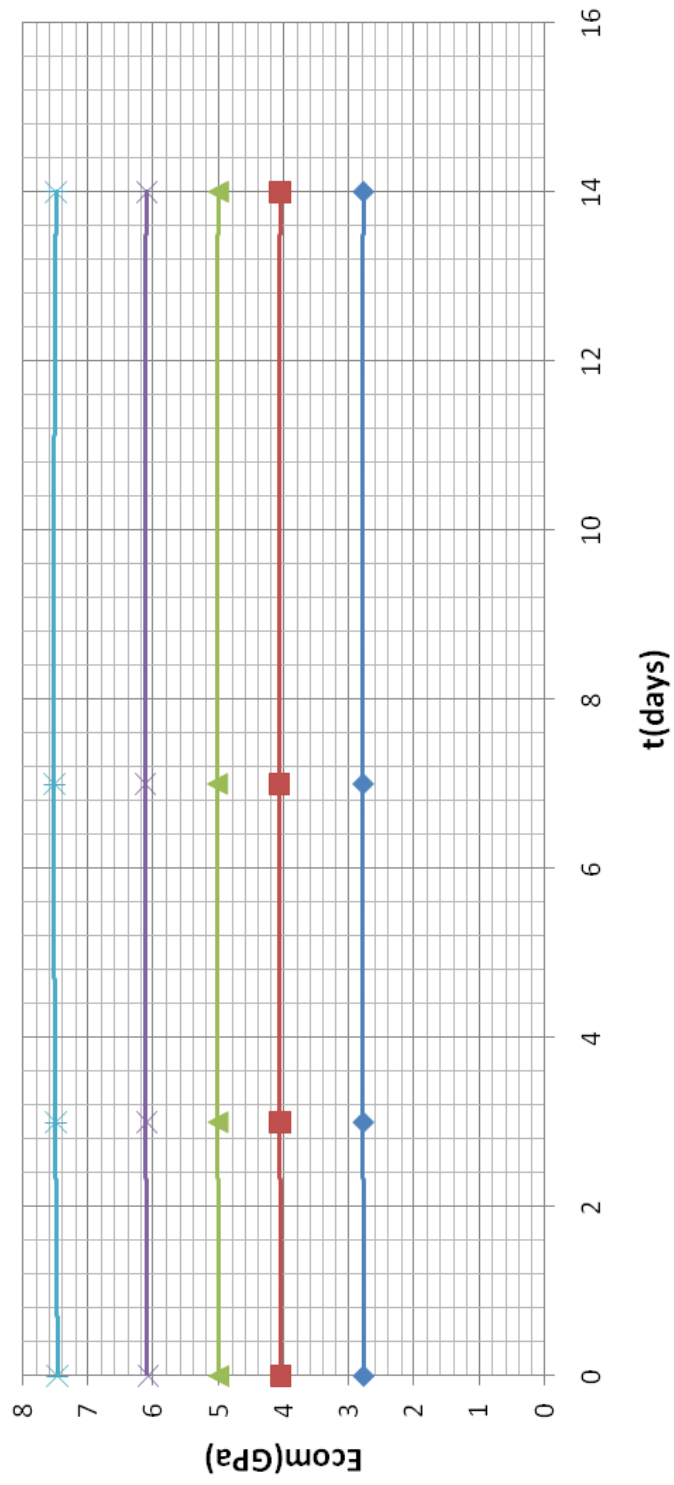
Ε8. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com-t(days)} (V_f=30\%)$



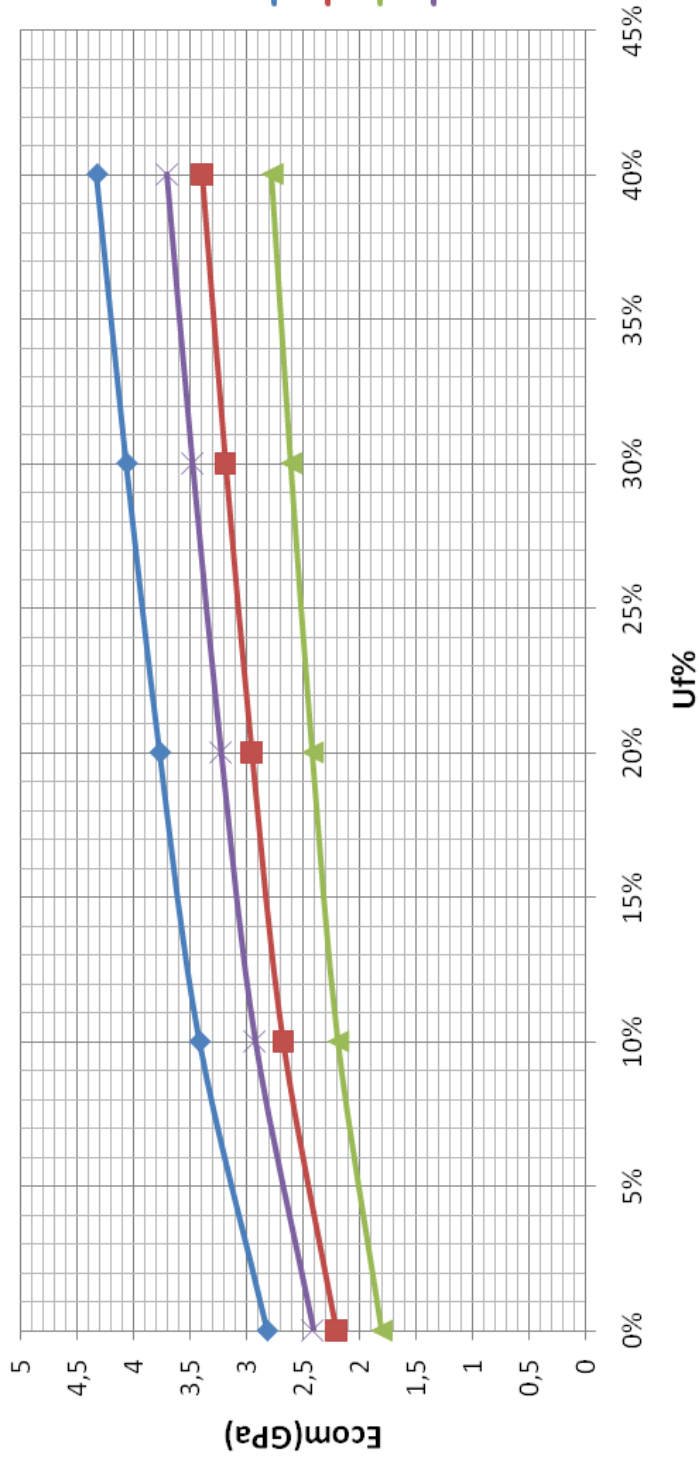
Ε9. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com}-t(\text{days})(V_f=40\%)$



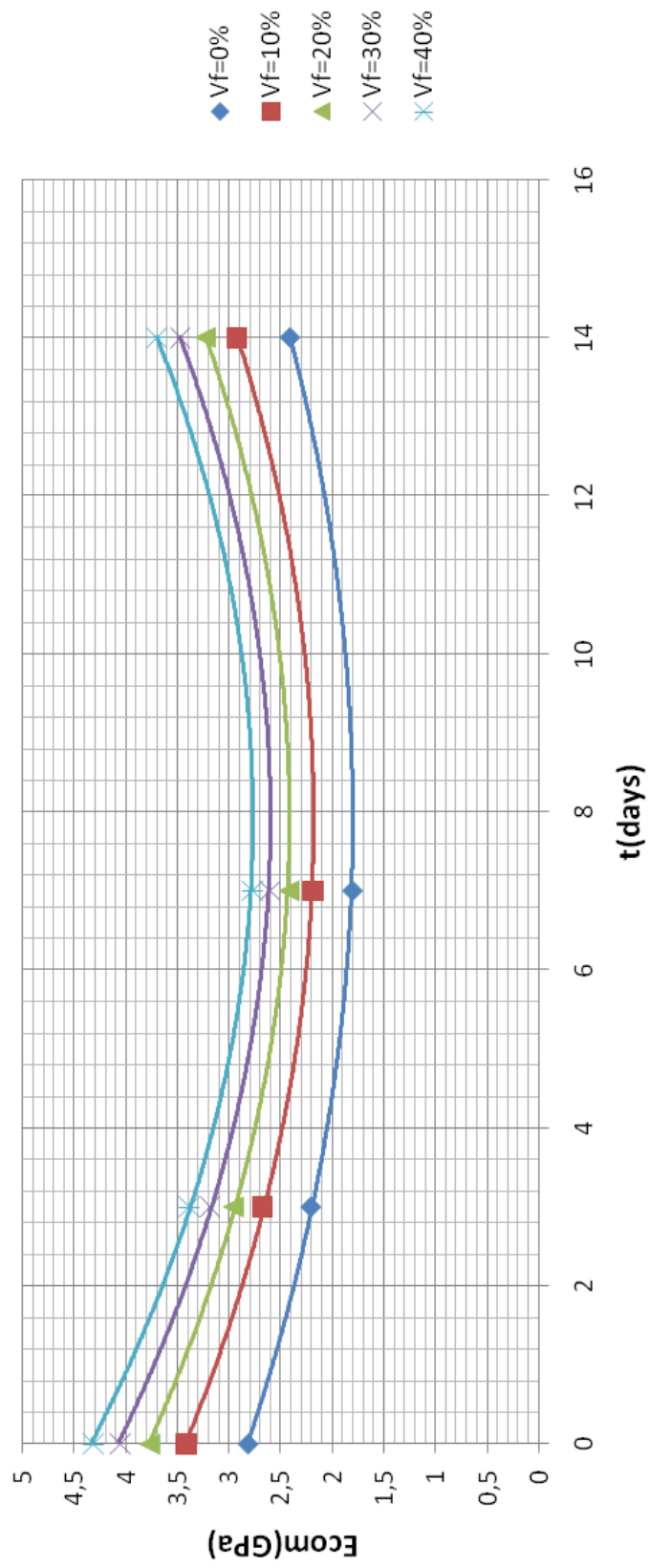
Μ1. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com-t}(\text{days})$  (Μοντέλο Counto )



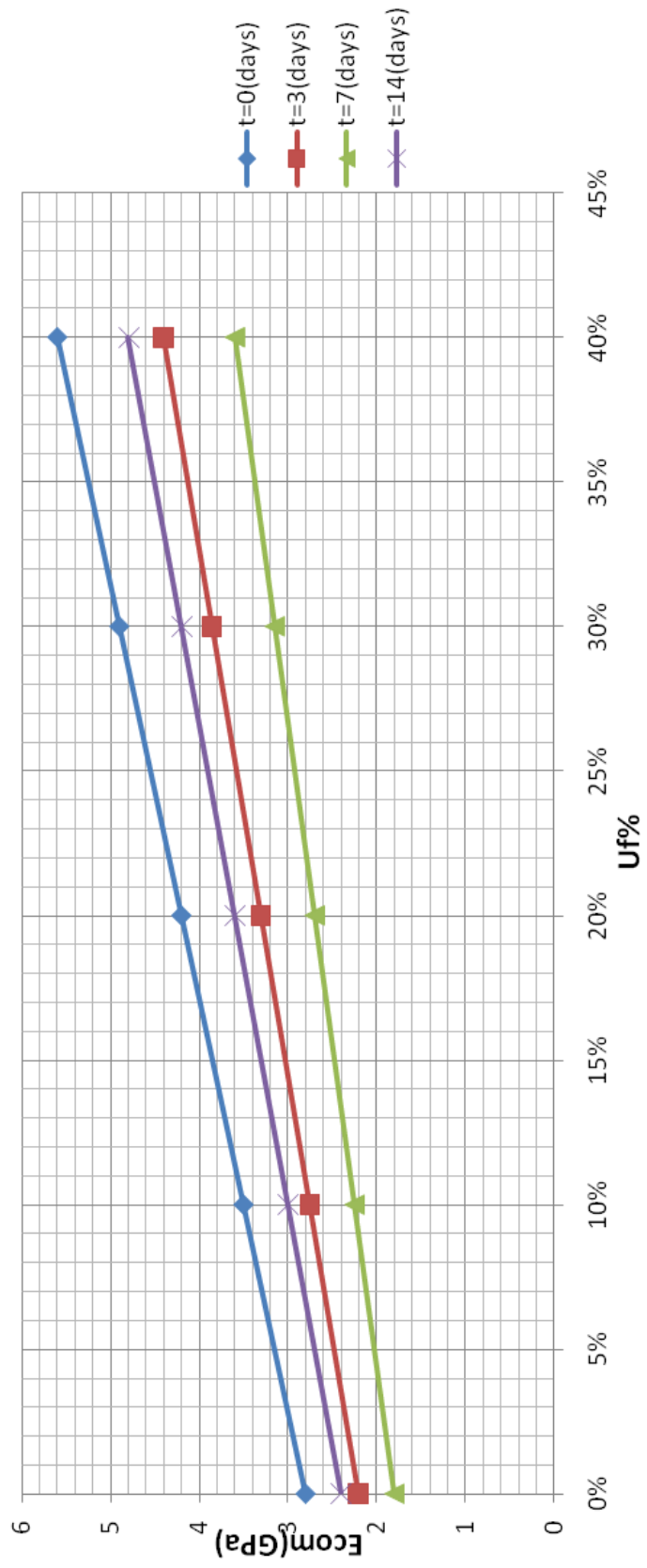
Μ2. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Ραυλ)



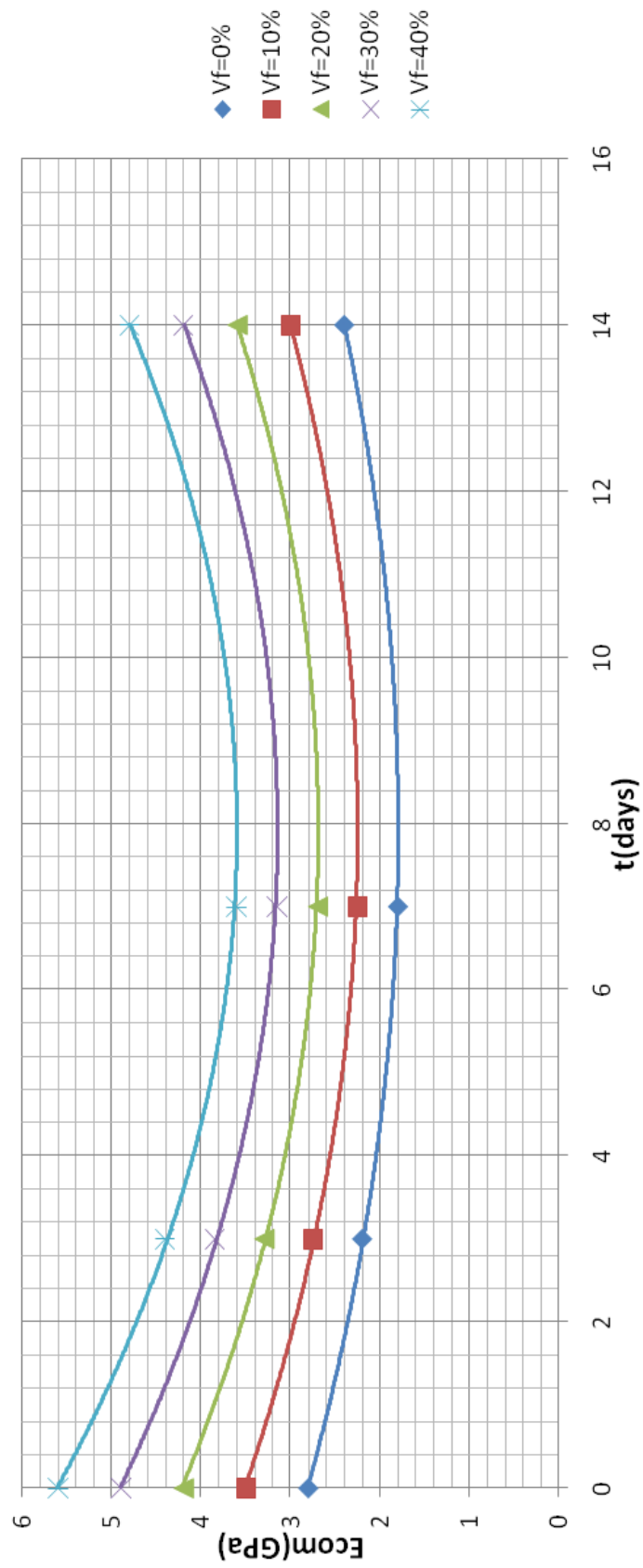
Μ3. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-t(days)(Μοντέλο Paul )



Μ4. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Einstein)

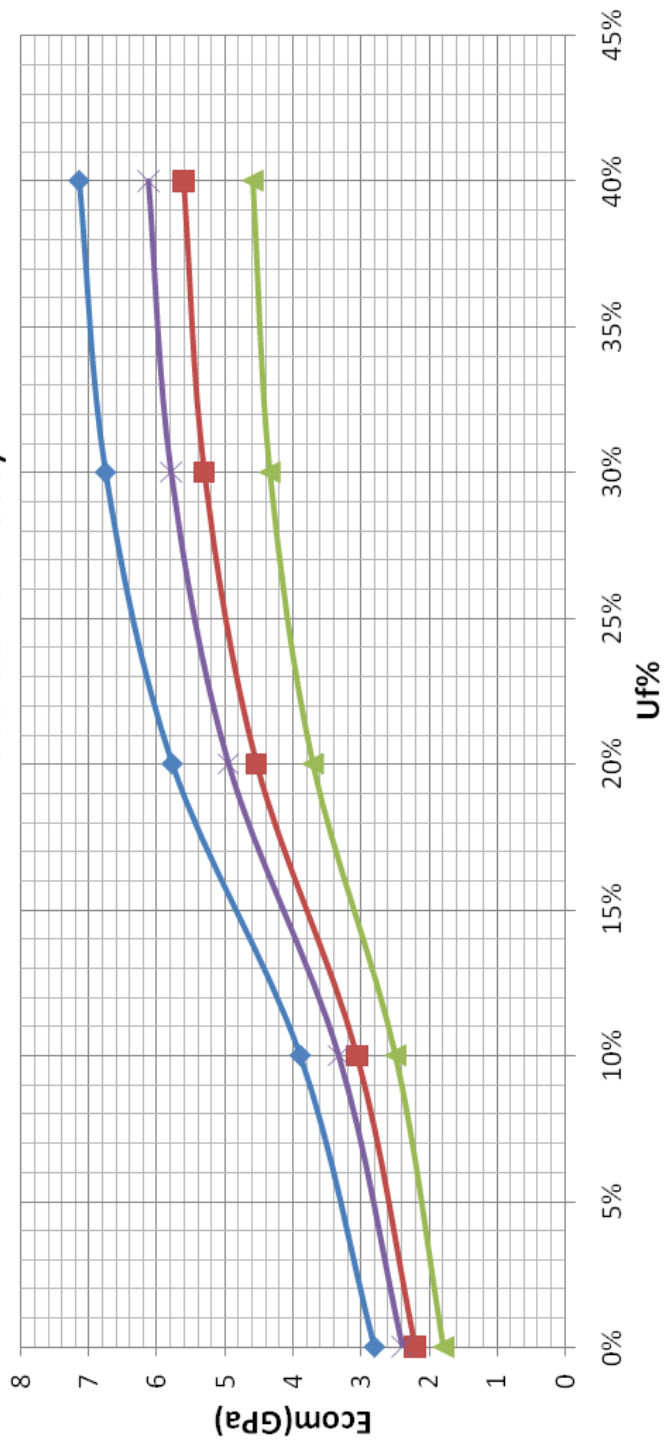


Μ5. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com-t}(\text{days})$  (Μοντέλο Einstein)

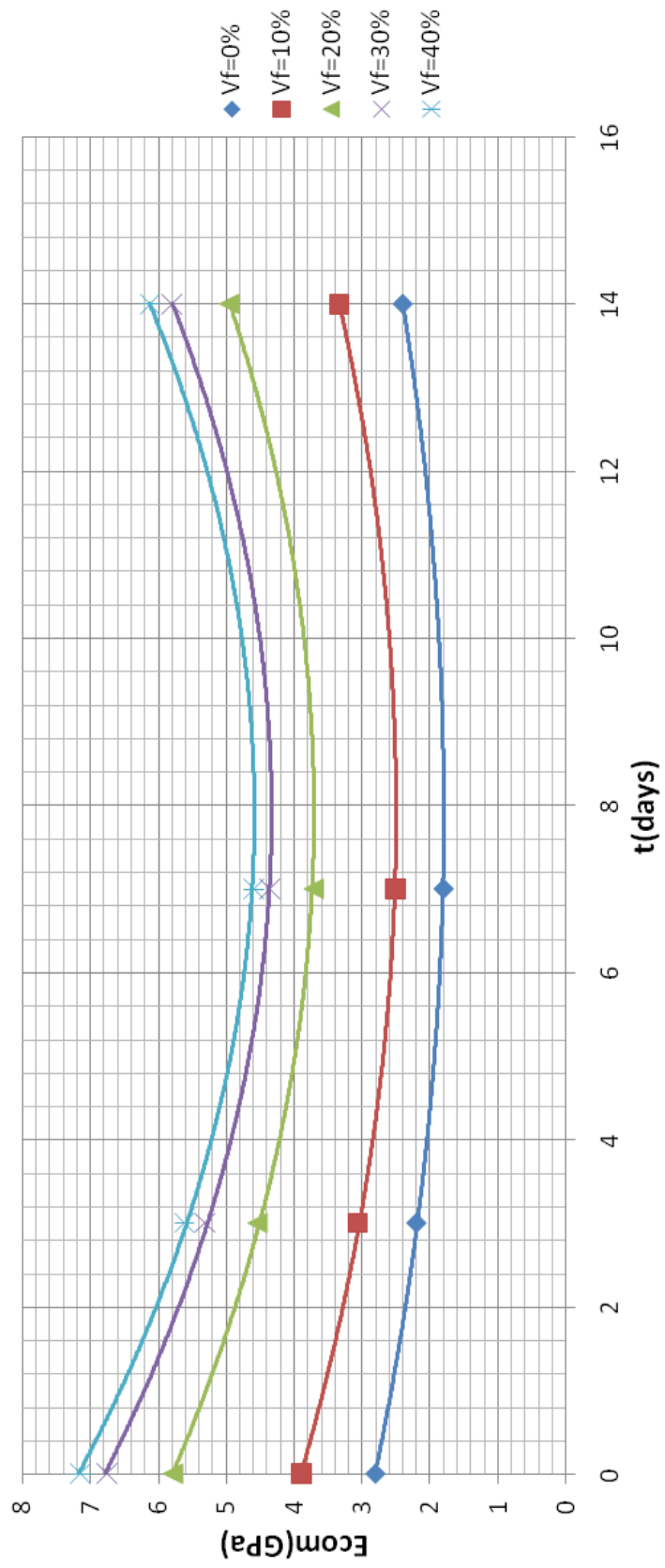




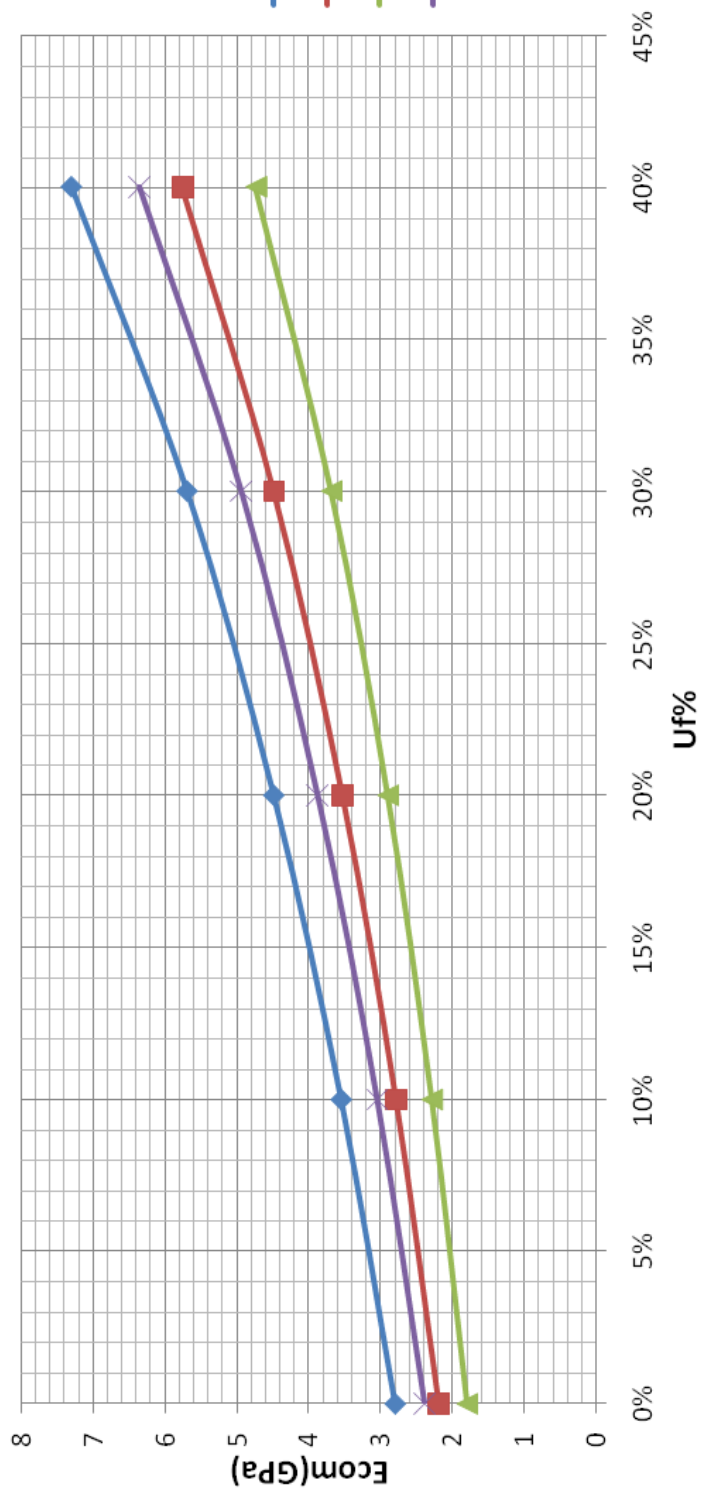
Μ6. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-ποσοστό κόκκων (Μοντέλο Guth&Smallwood)



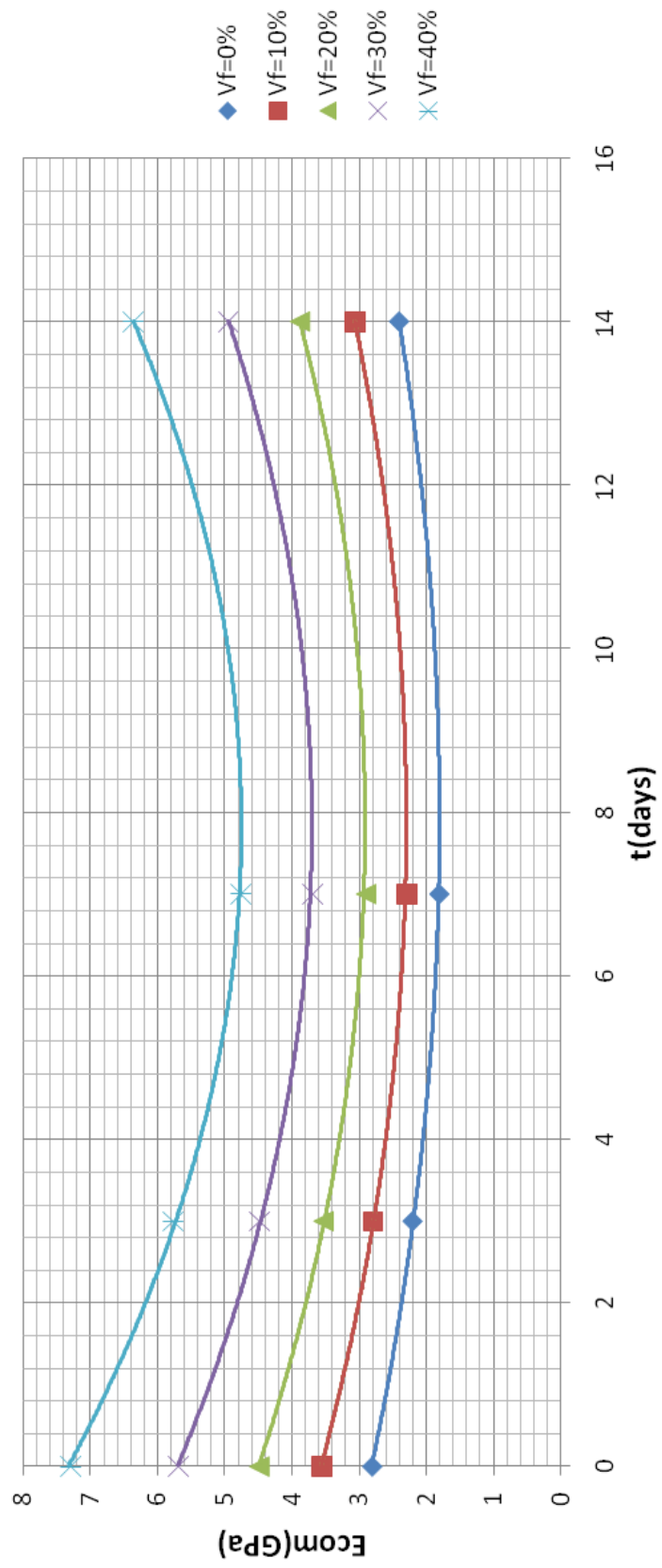
M7. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-t(days)(Μοντέλο Guth&Smallwood)



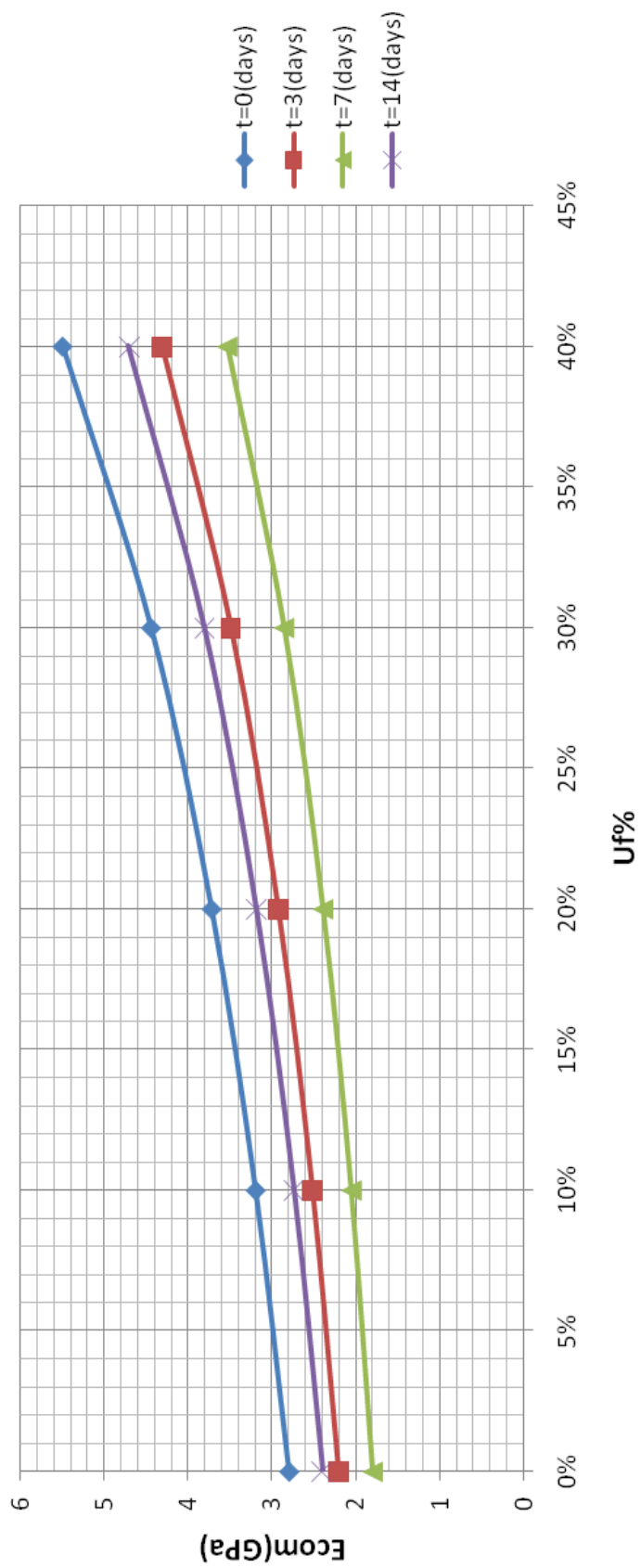
Μ8. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Kerper)



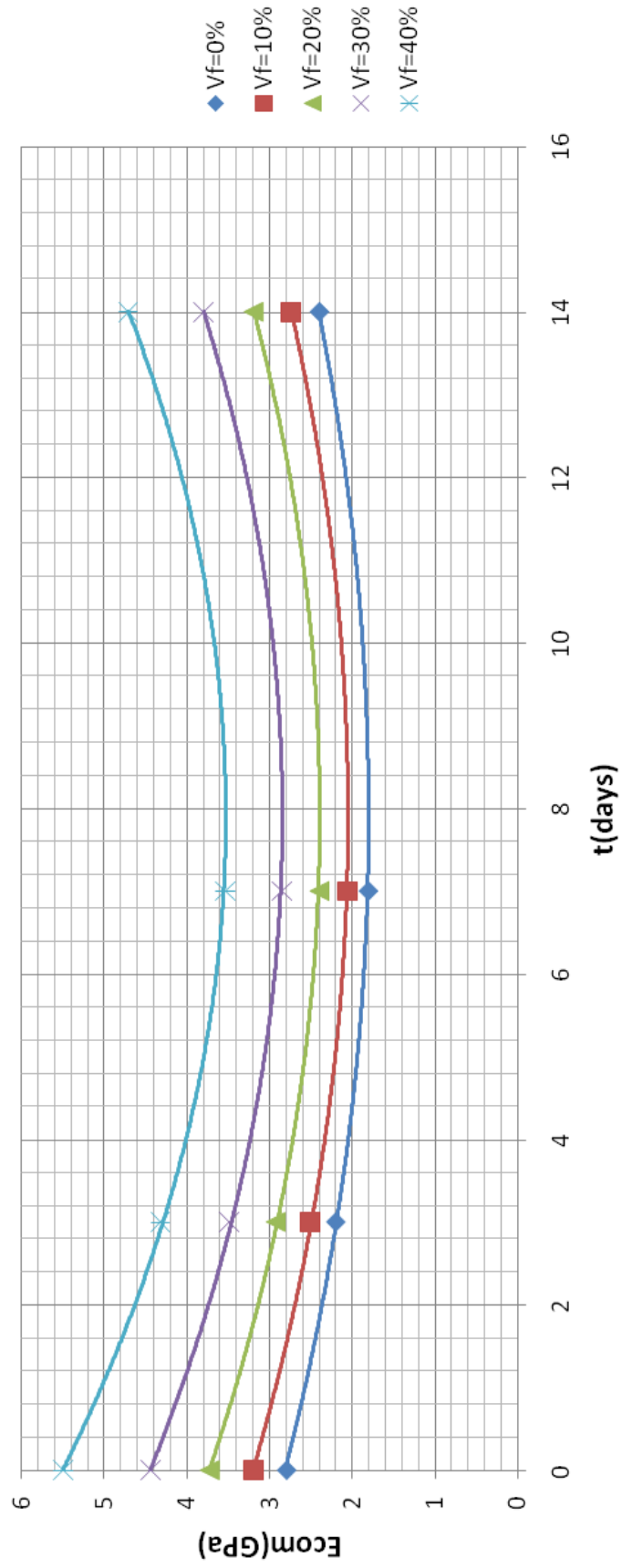
Μ9. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com-t(days)}$  (Μοντέλο Kerner)



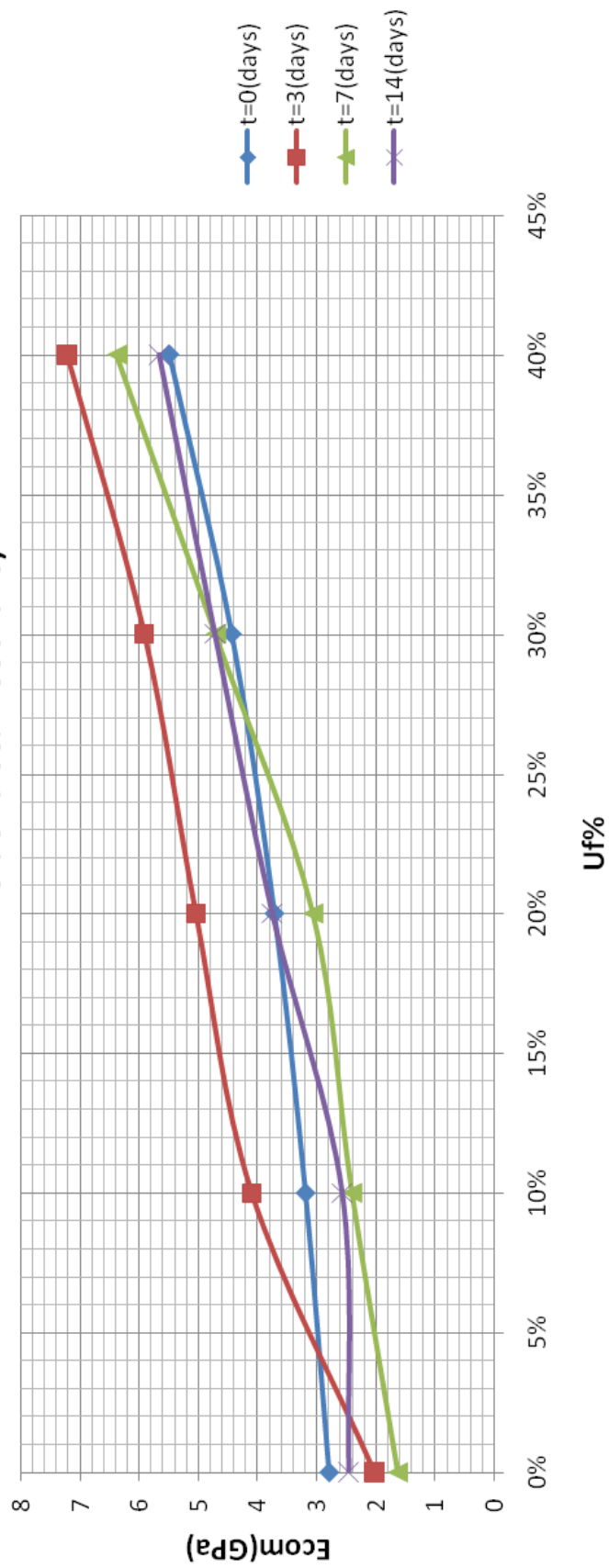
Μ10. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Eilers&Van Dycke)



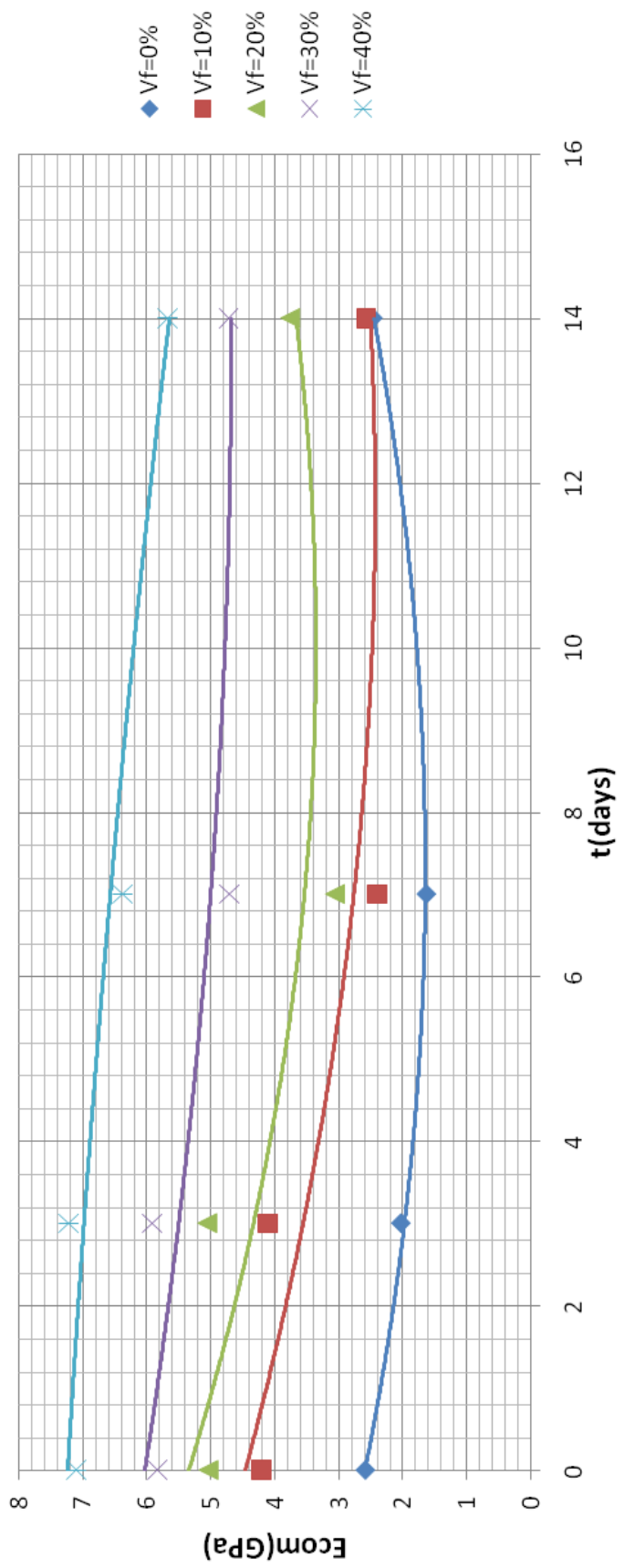
Μ11. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com-t(days)}$  (Μοντέλο Eilers&Van Dycke)



Μ12. Μέτρο ελαστικότητας Εσm-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Sideridis&Theocharis)

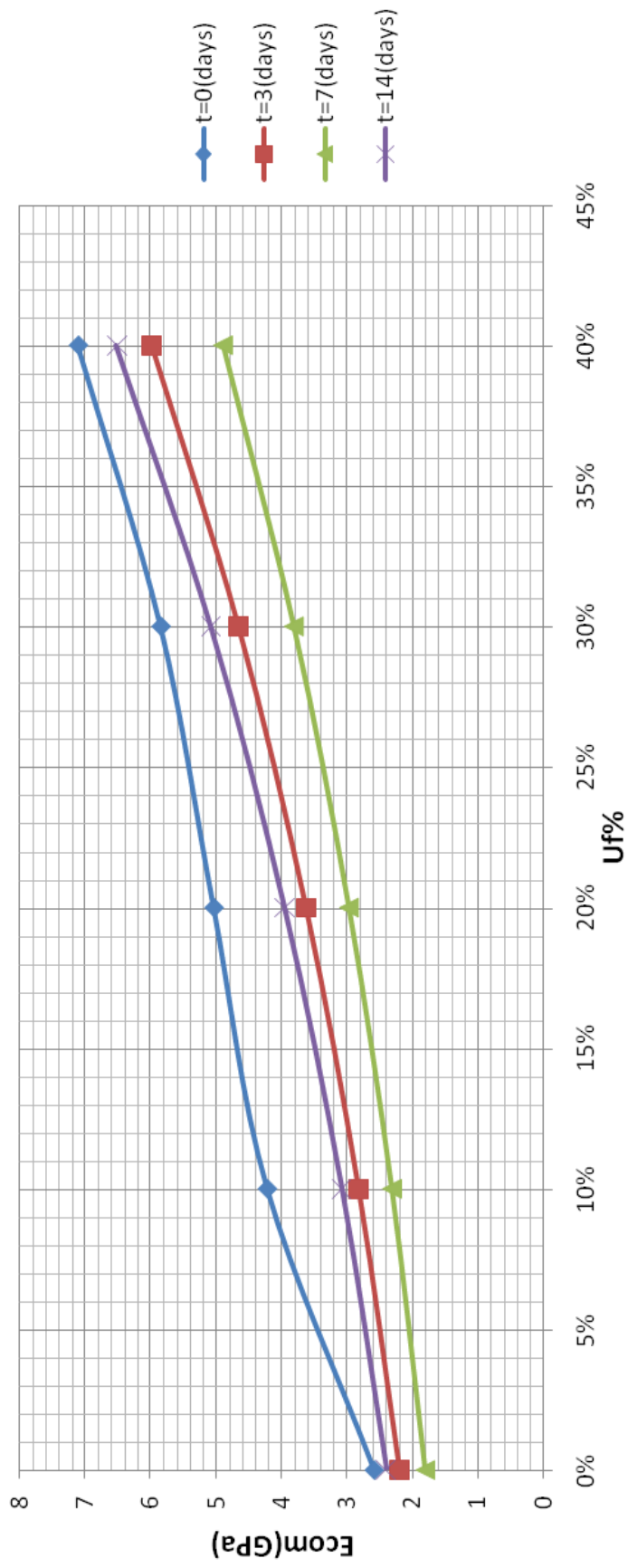


M13. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-t(days)(Μοντέλο Sideridis&Theocharis)

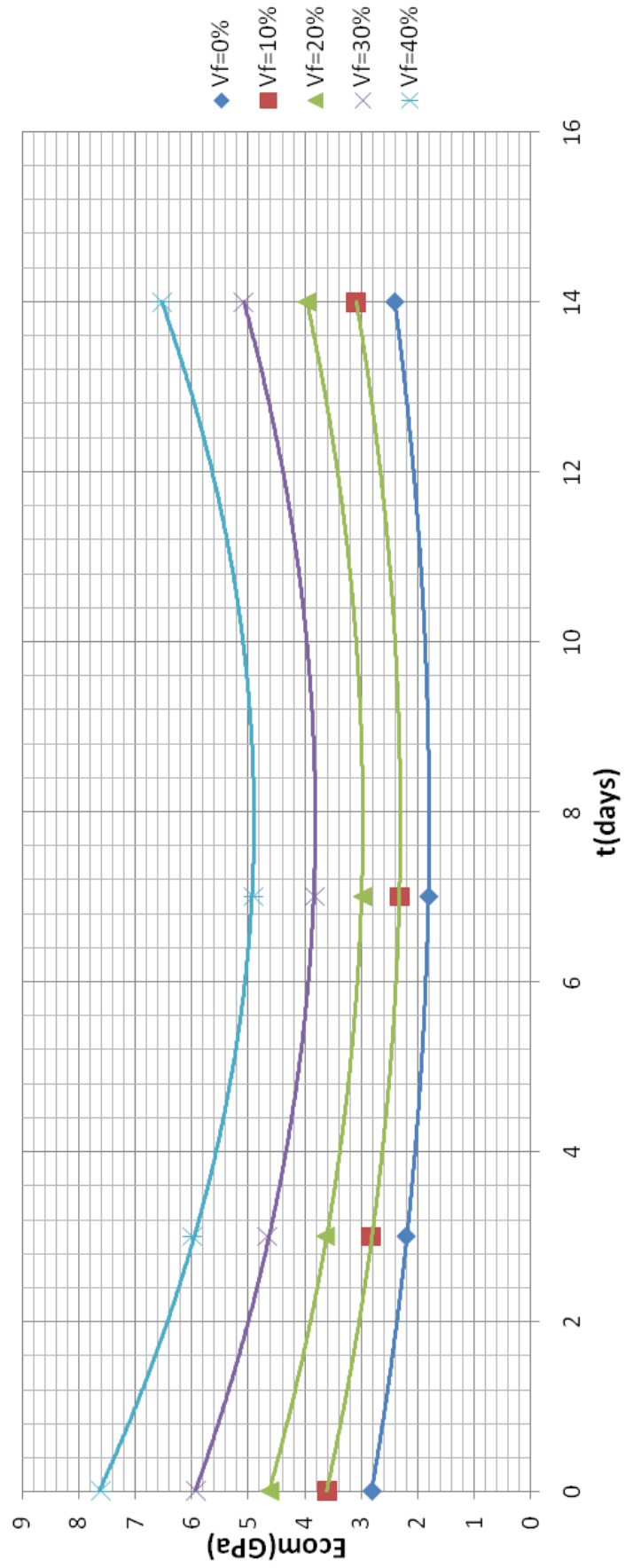




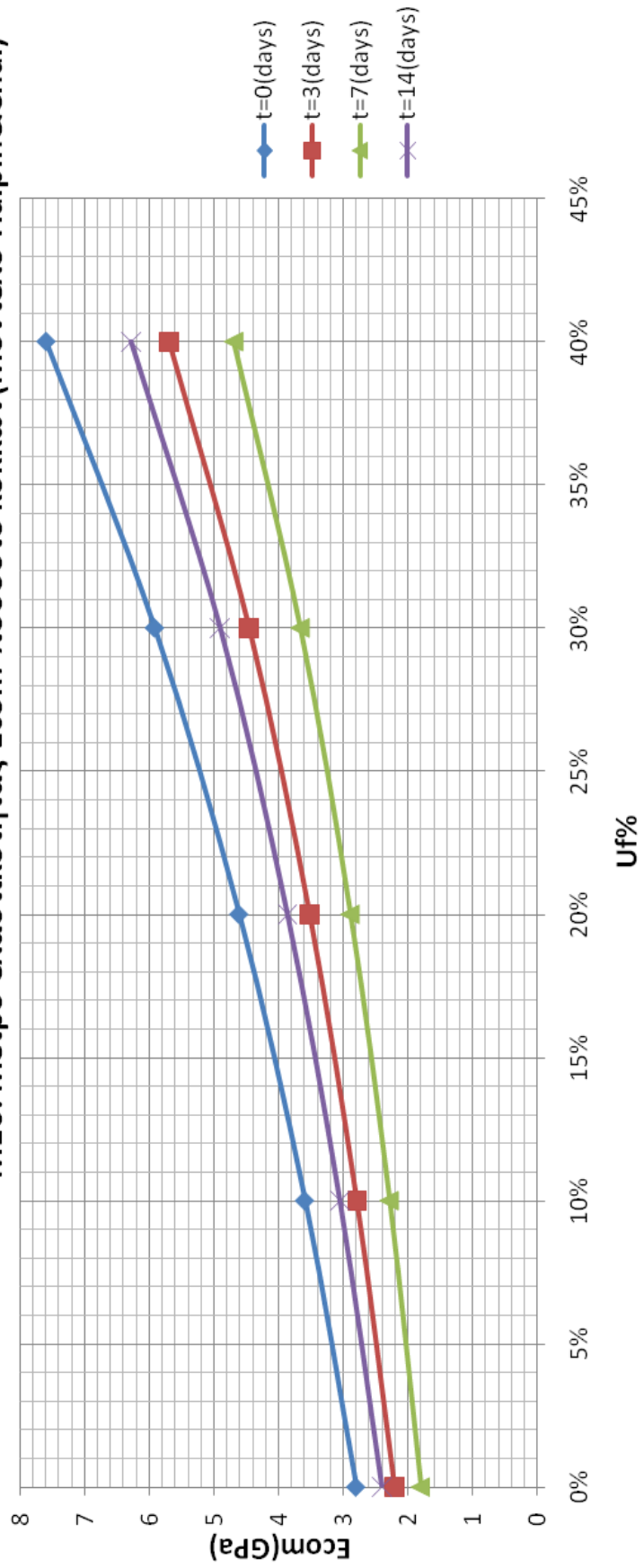
Μ14. Μέτρο ελαστικότητας Εσom-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Mooney)



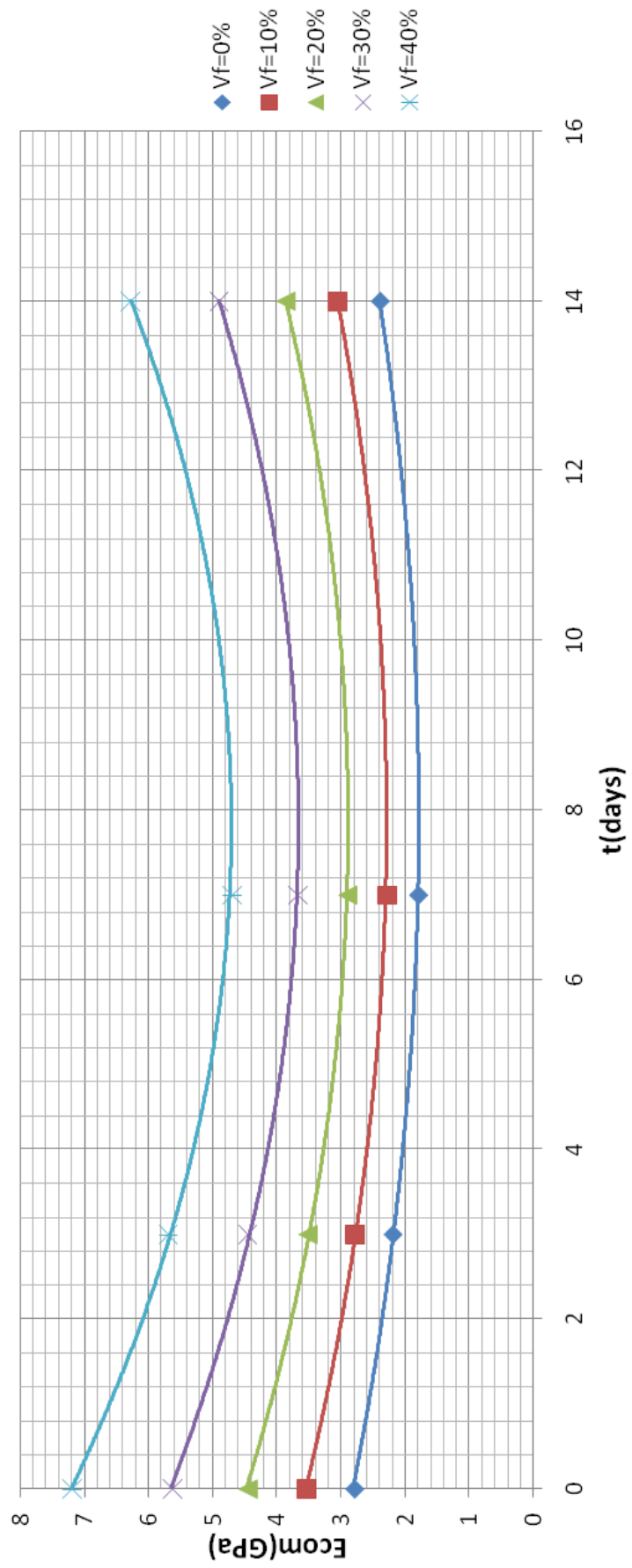
M15. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-t(days)(Μοντέλο Mooney)



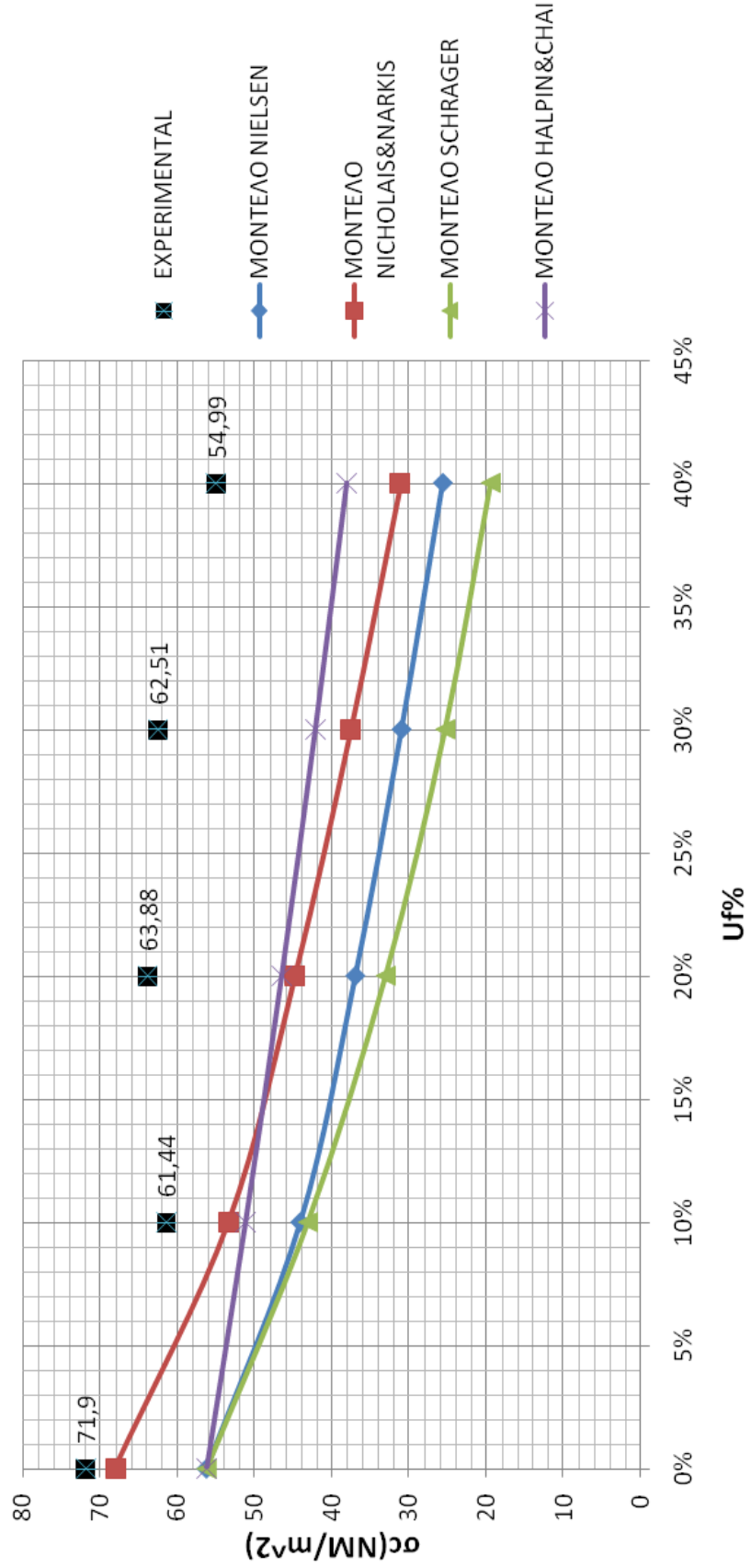
Μ16. Μέτρο ελαστικότητας Ecom-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Halpin&Chai)



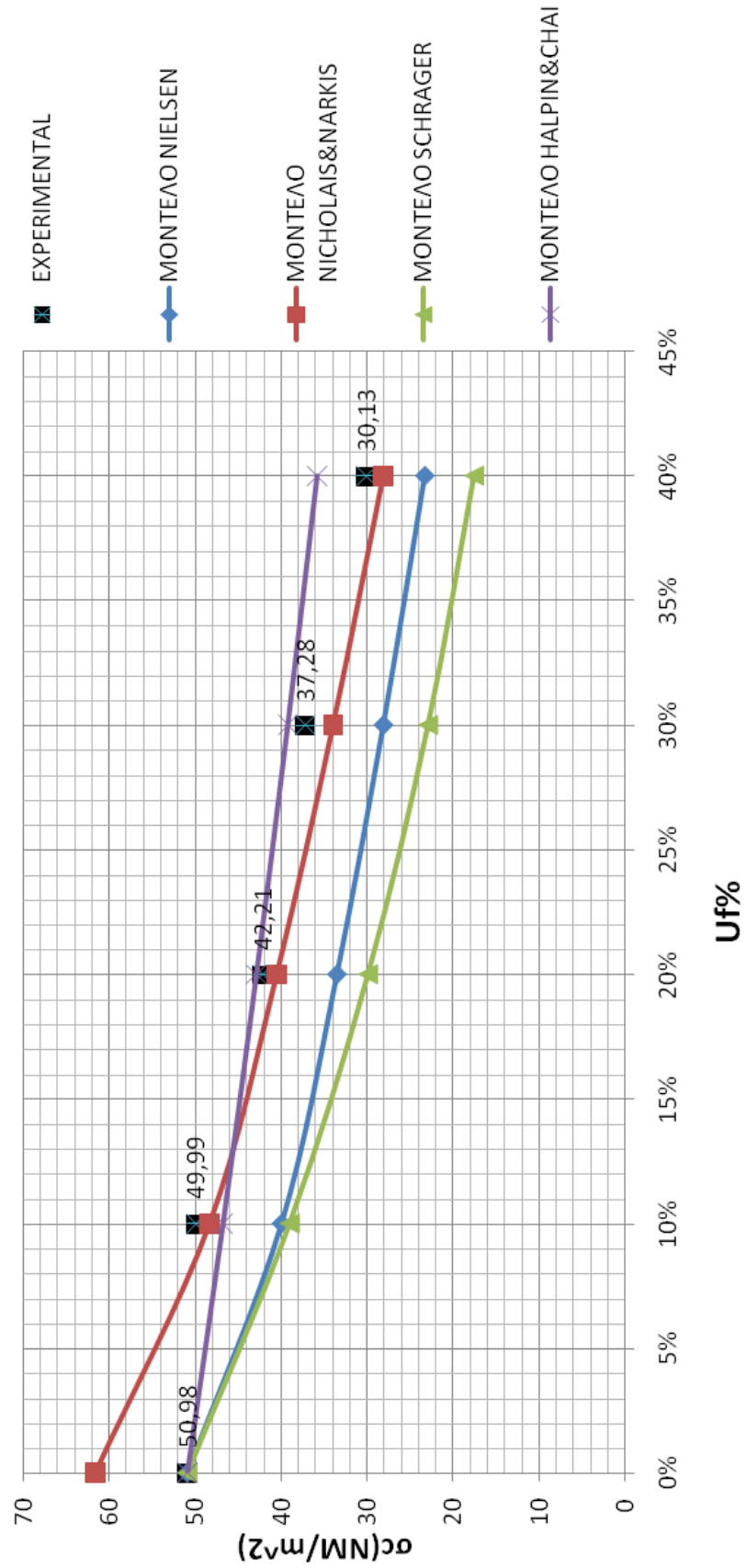
M17. Μέτρο ελαστικότητας  $E_{com-t(days)}$  (Μοντέλο Halpin&Chai)



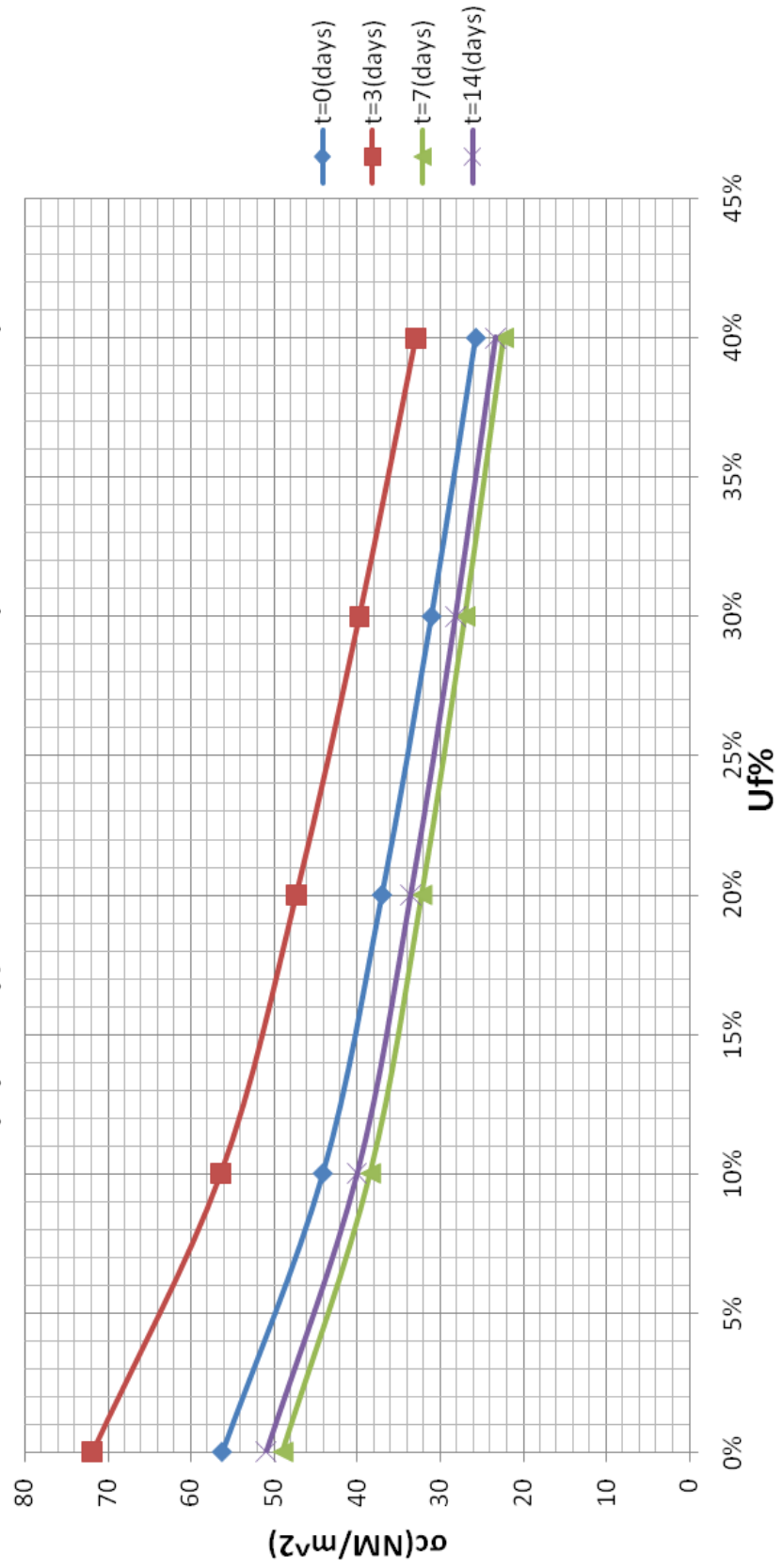
**B1. Τάση θραύσης σε-ποσοστό κόκκων(t=0(days))**

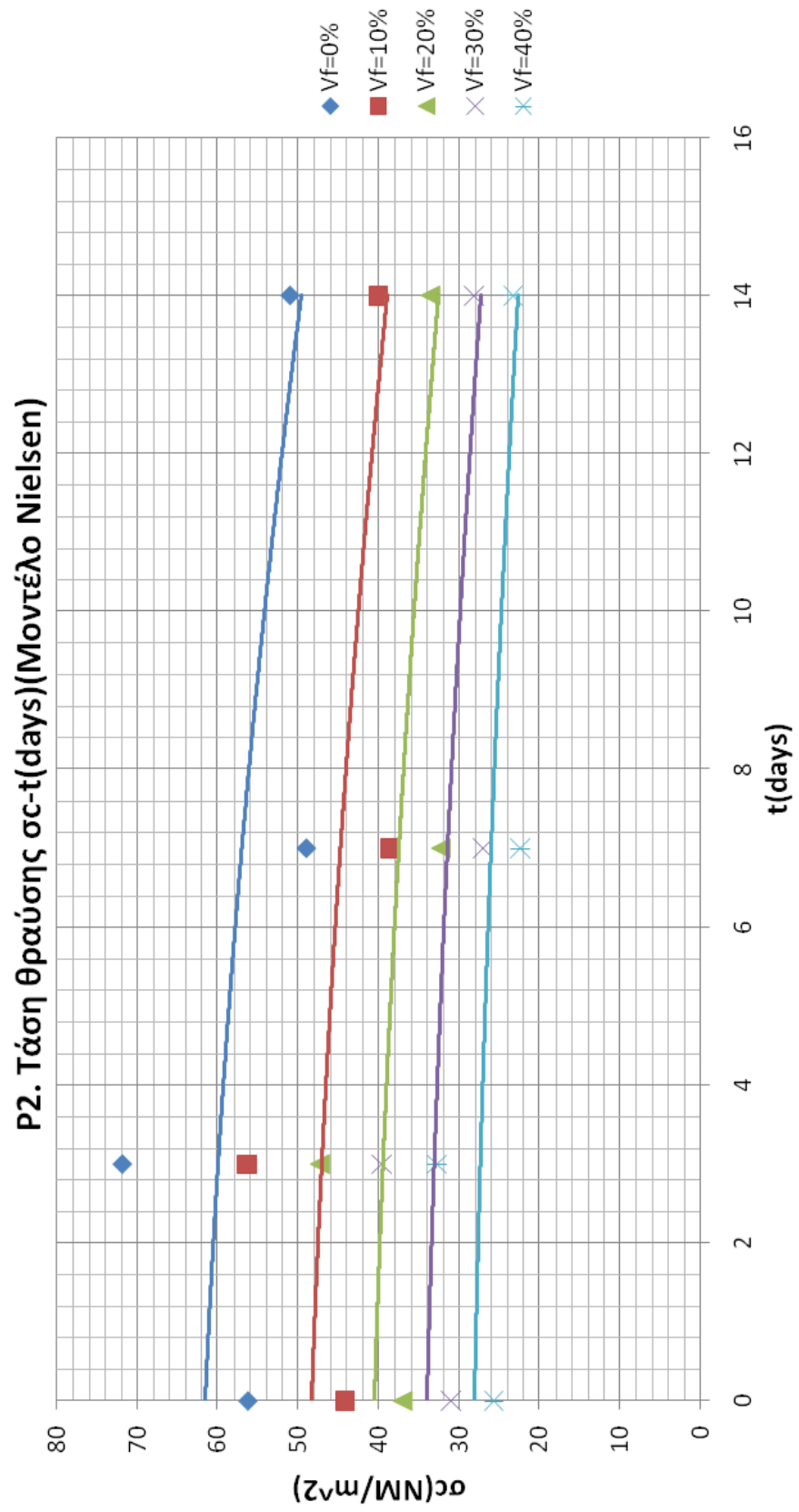


B2. Τάση θραύσης σε-ποσοστό κόκκων(t=14(days))



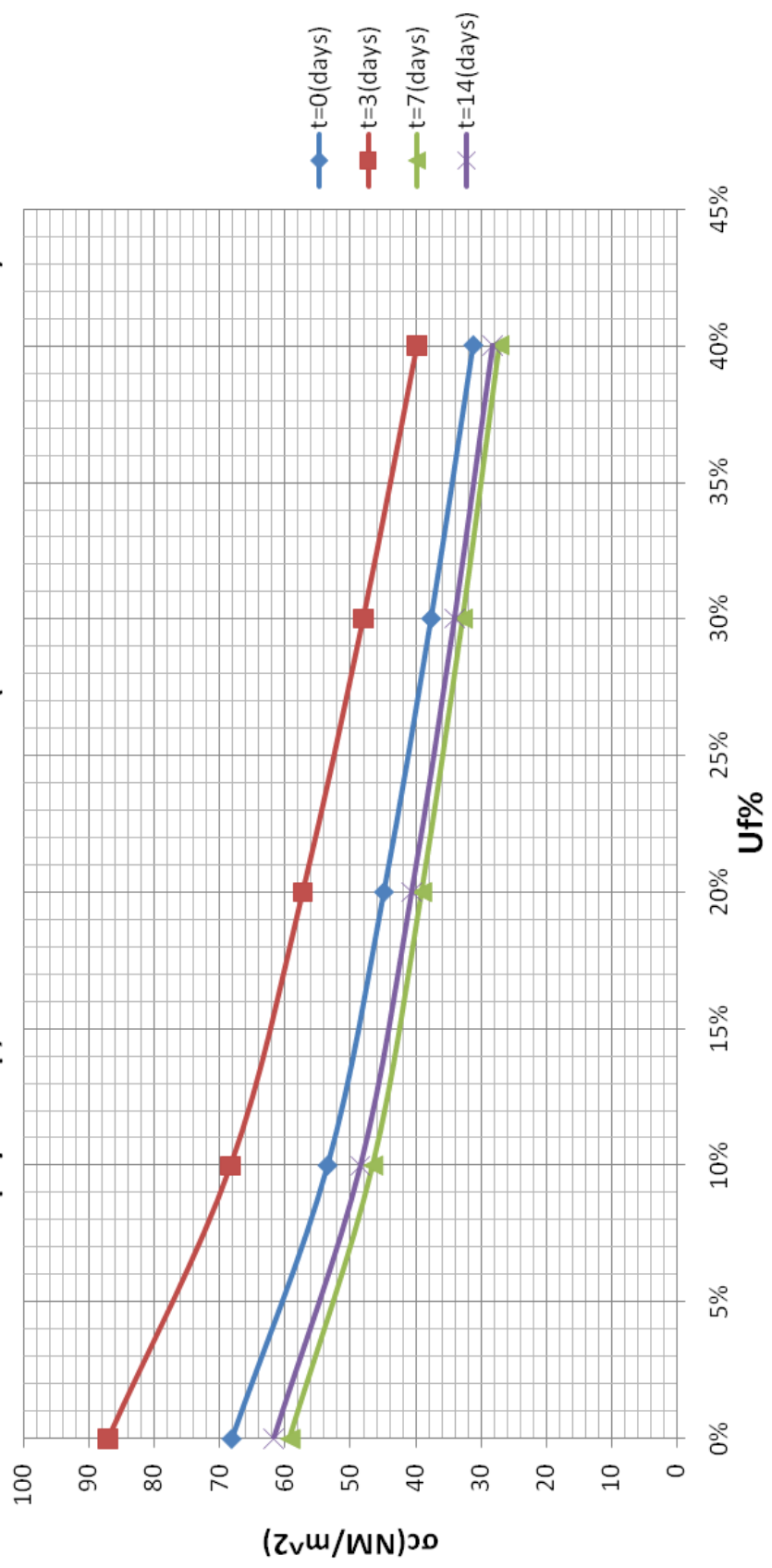
P1. Τάση θραύσης σε-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Nielsen)



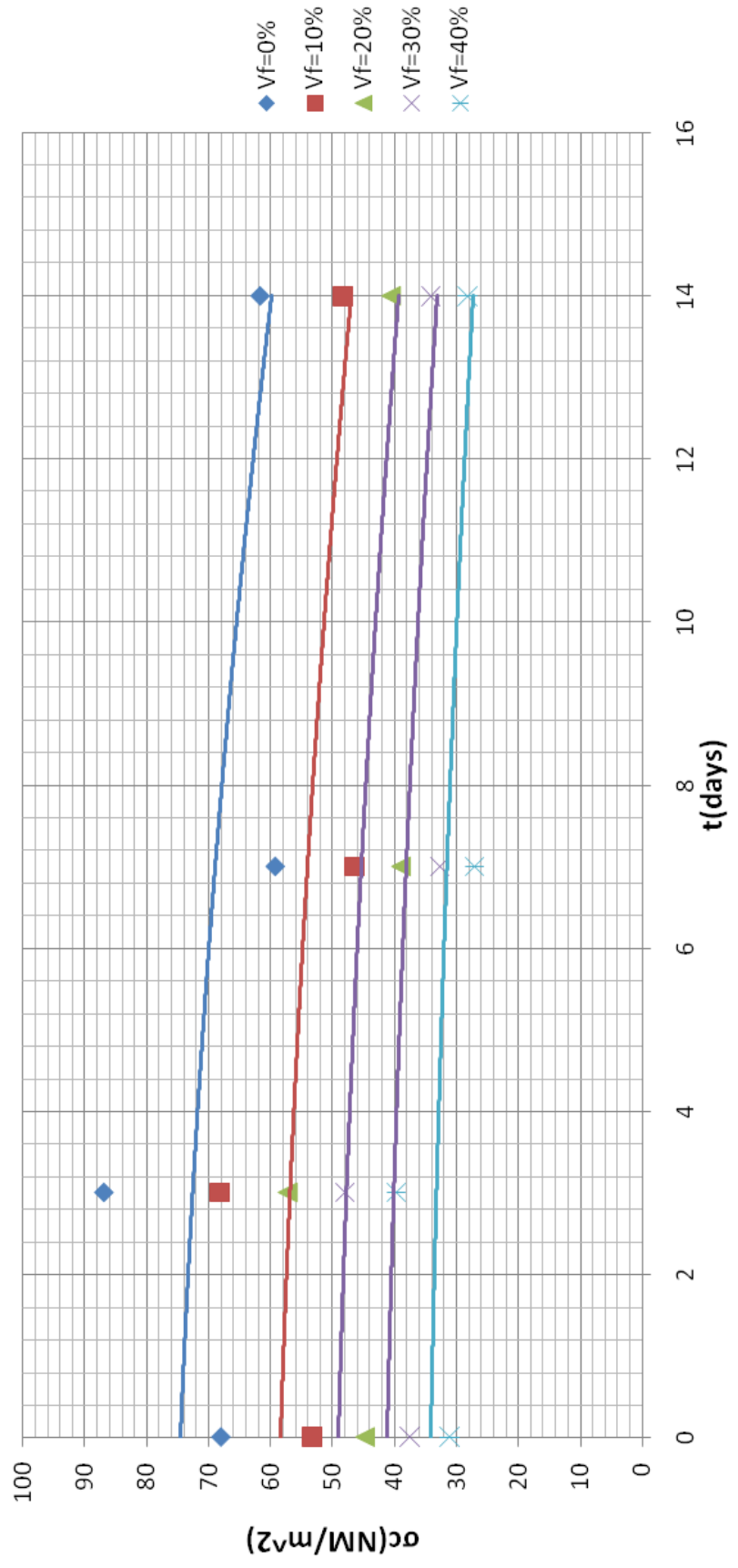




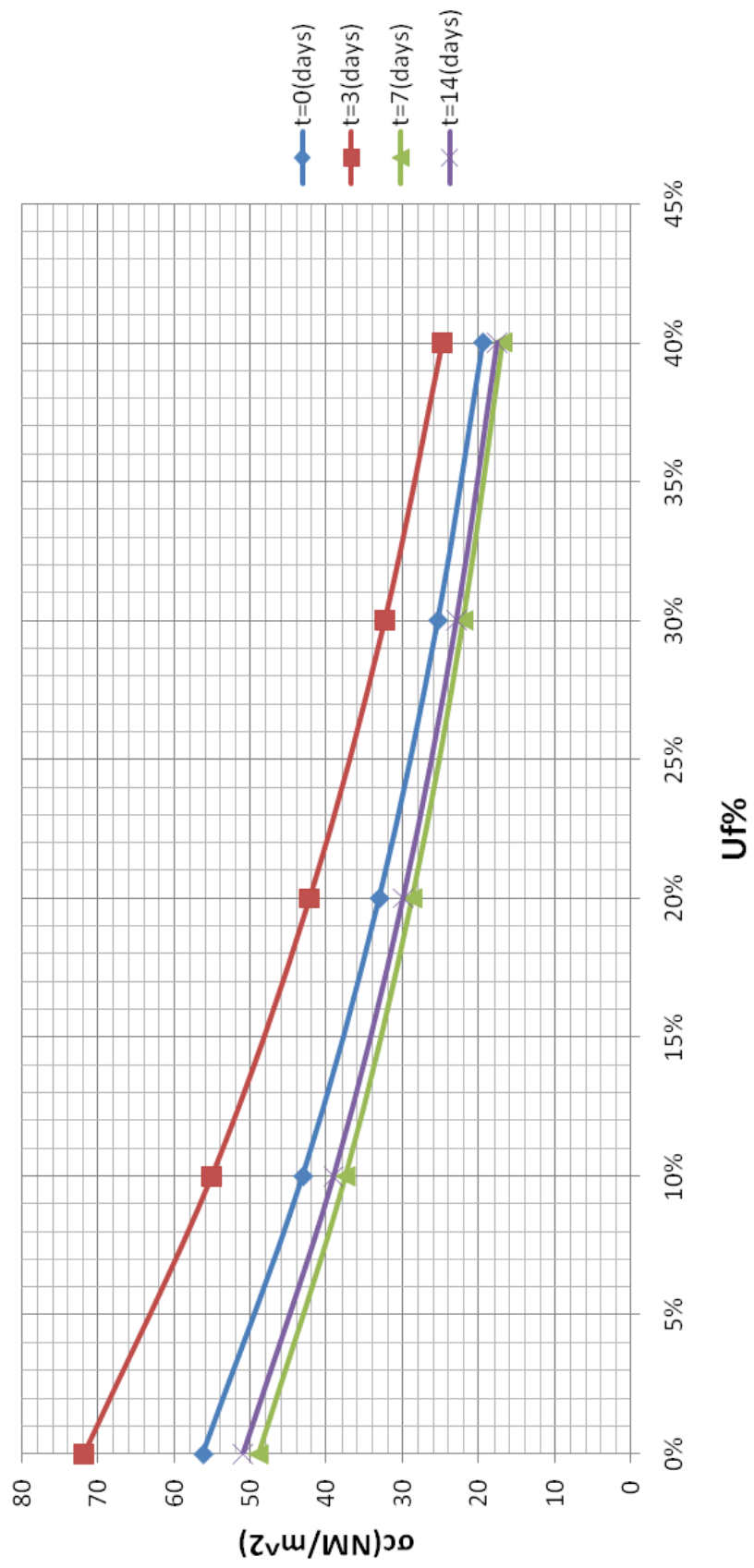
Ρ3. Τάση θραύσης σε-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Nicholais&Narkis)



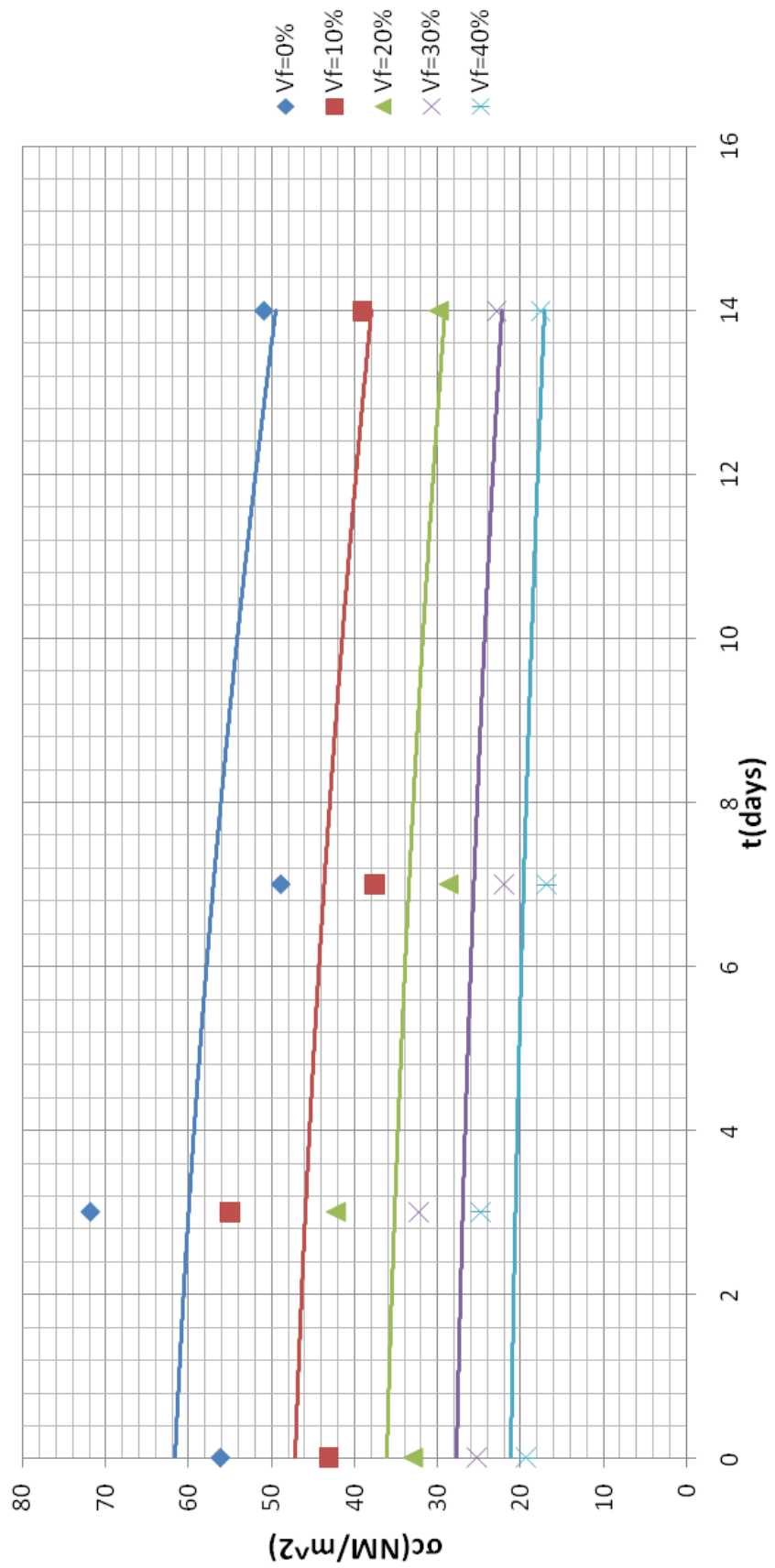
P4. Τάση Θραύσης  $\sigma$ - $t$ (days)(Μοντέλο Nicholais&Narkis)



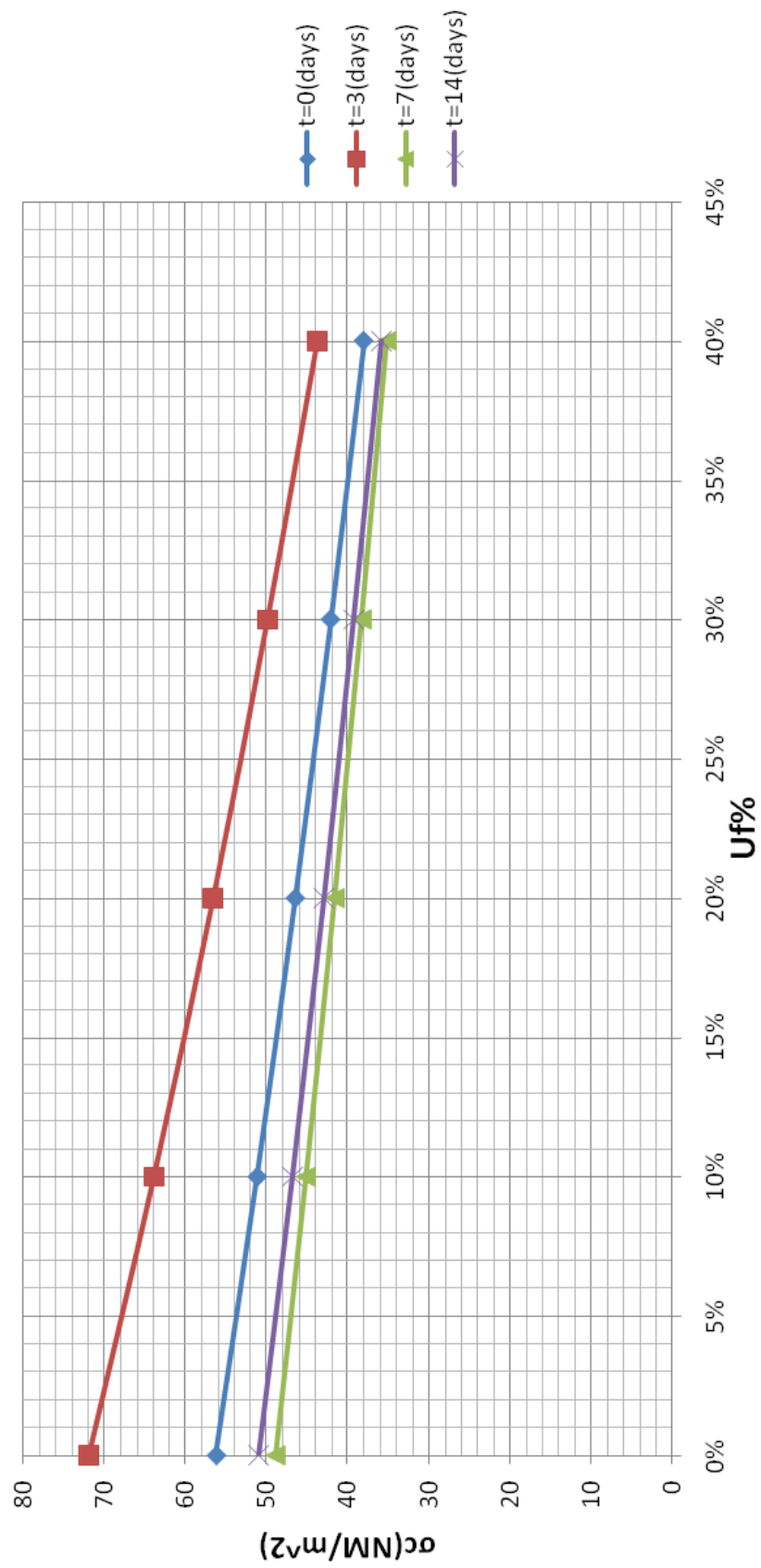
P5. Τάση θραύσης σε-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Schrage)



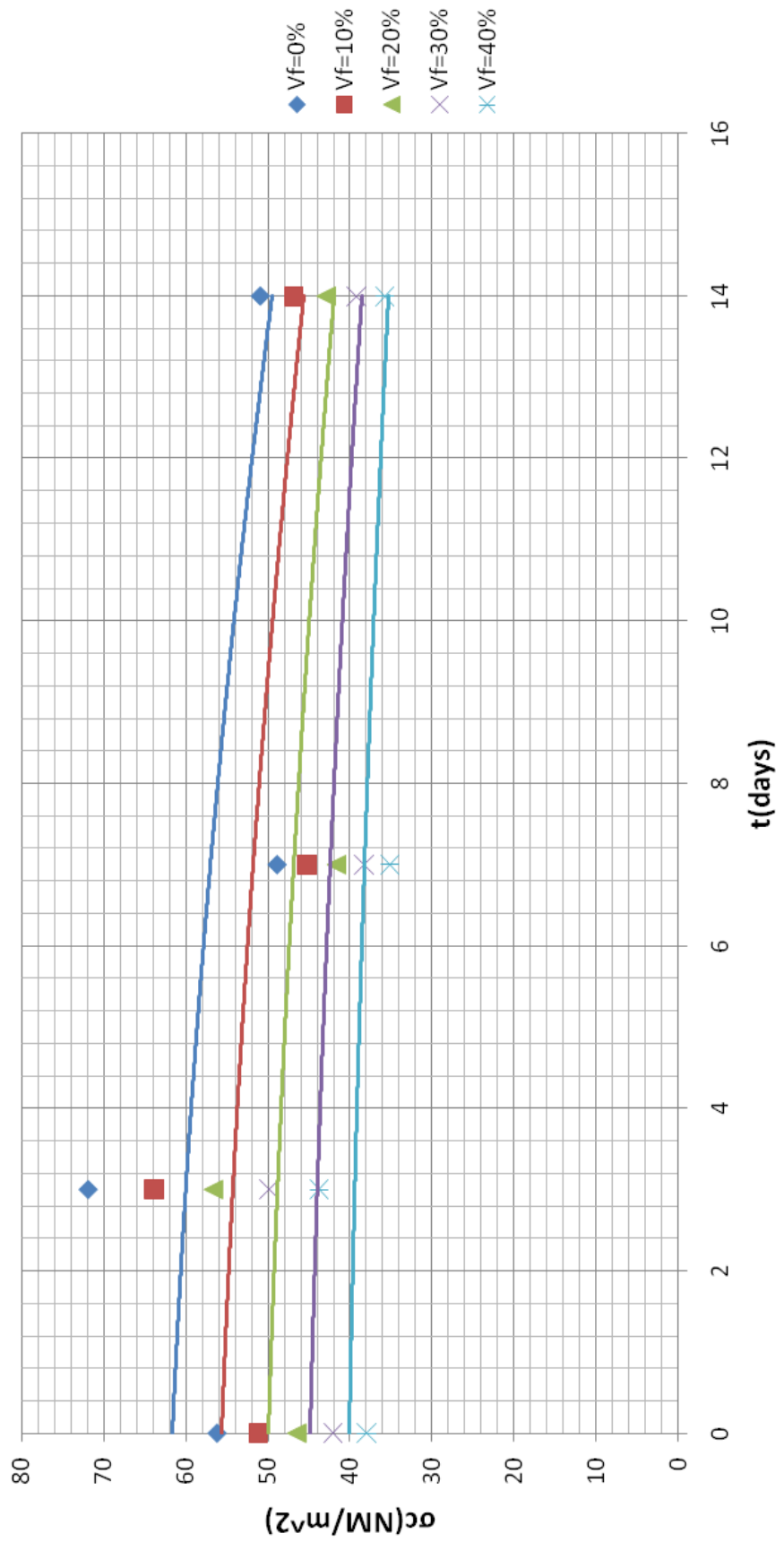
P6. Τάση θραύσης σc-t(days)(Μοντέλο Schrage)



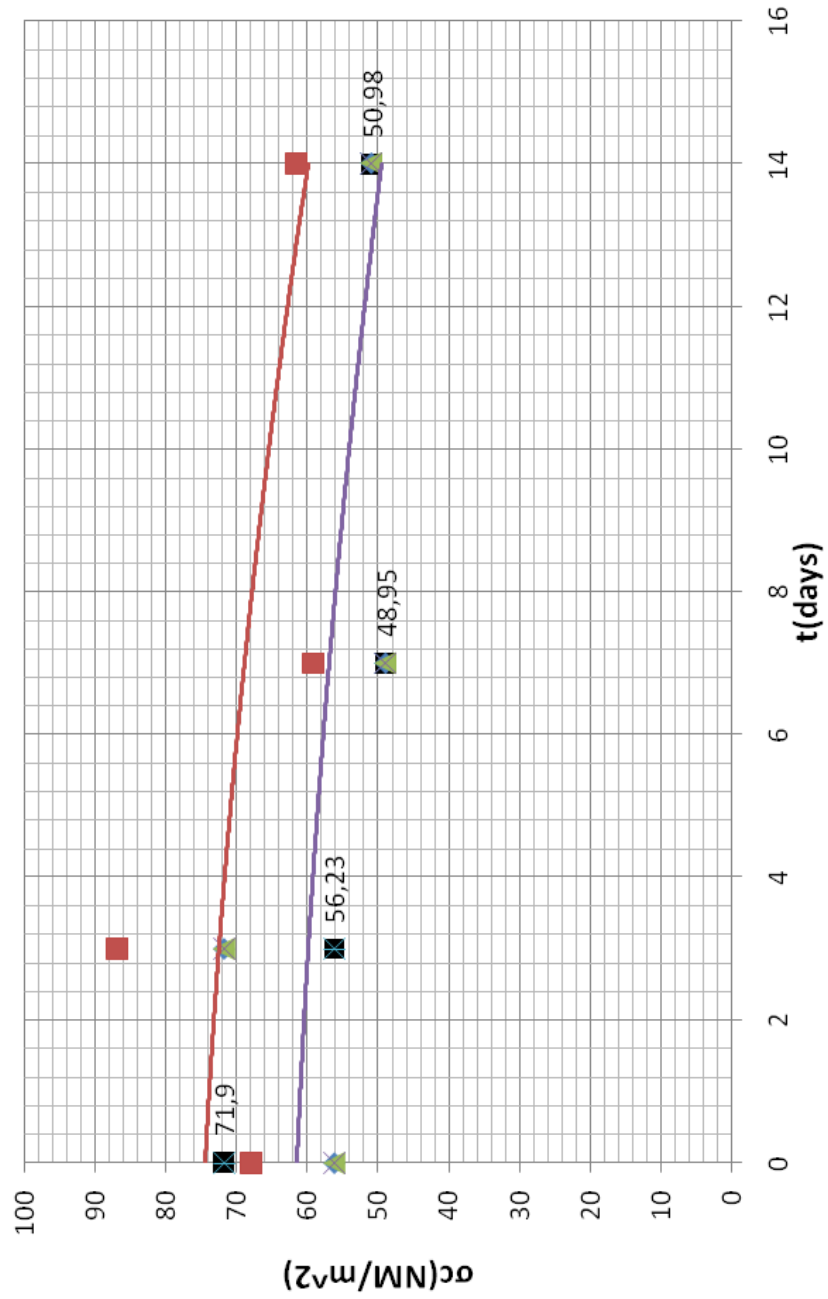
P7. Τάση θραύσης σε-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Halpin&Chai)



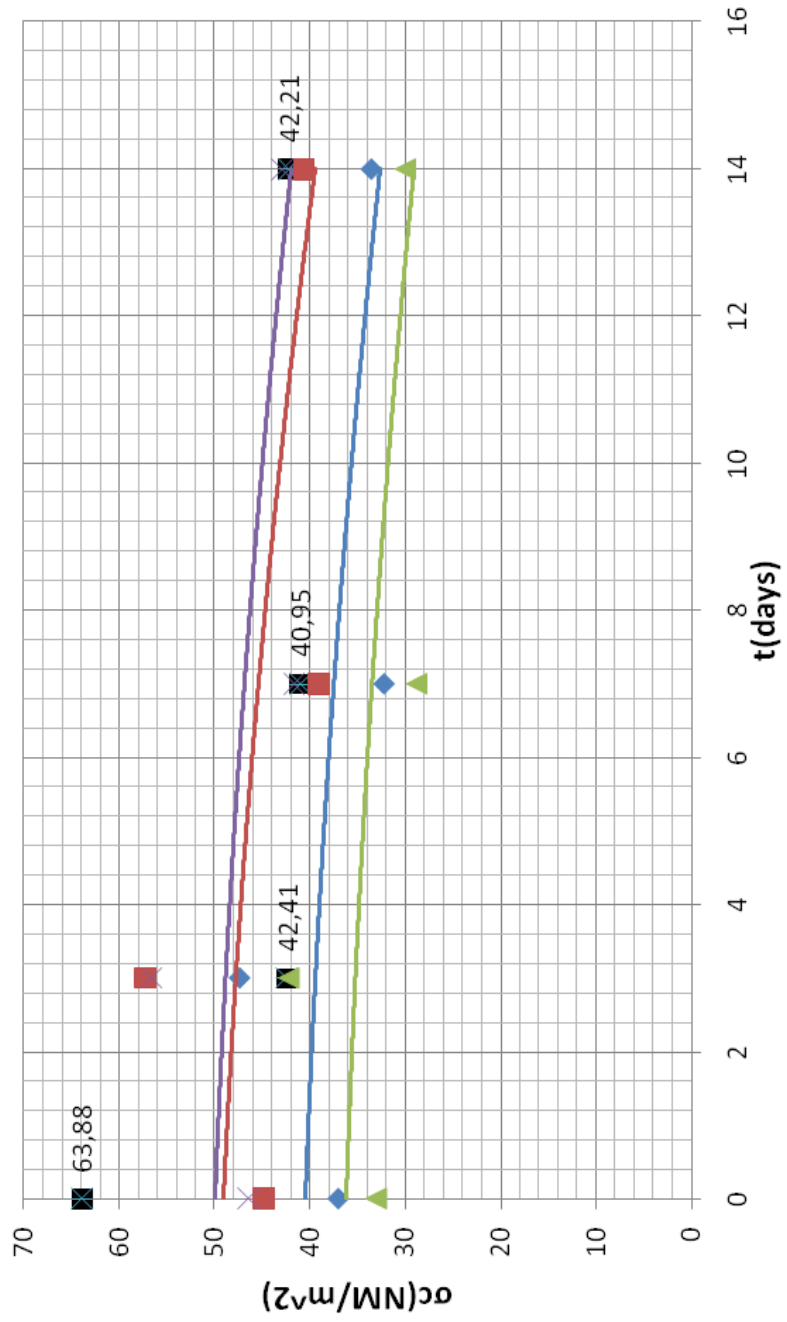
P8. Τάση θραύσης  $\sigma_c$ - $t$ (days)(Μοντέλο Halpin&Chai)



Τ1. Τάση θραύσης σc-t(days)(Vf=0%)

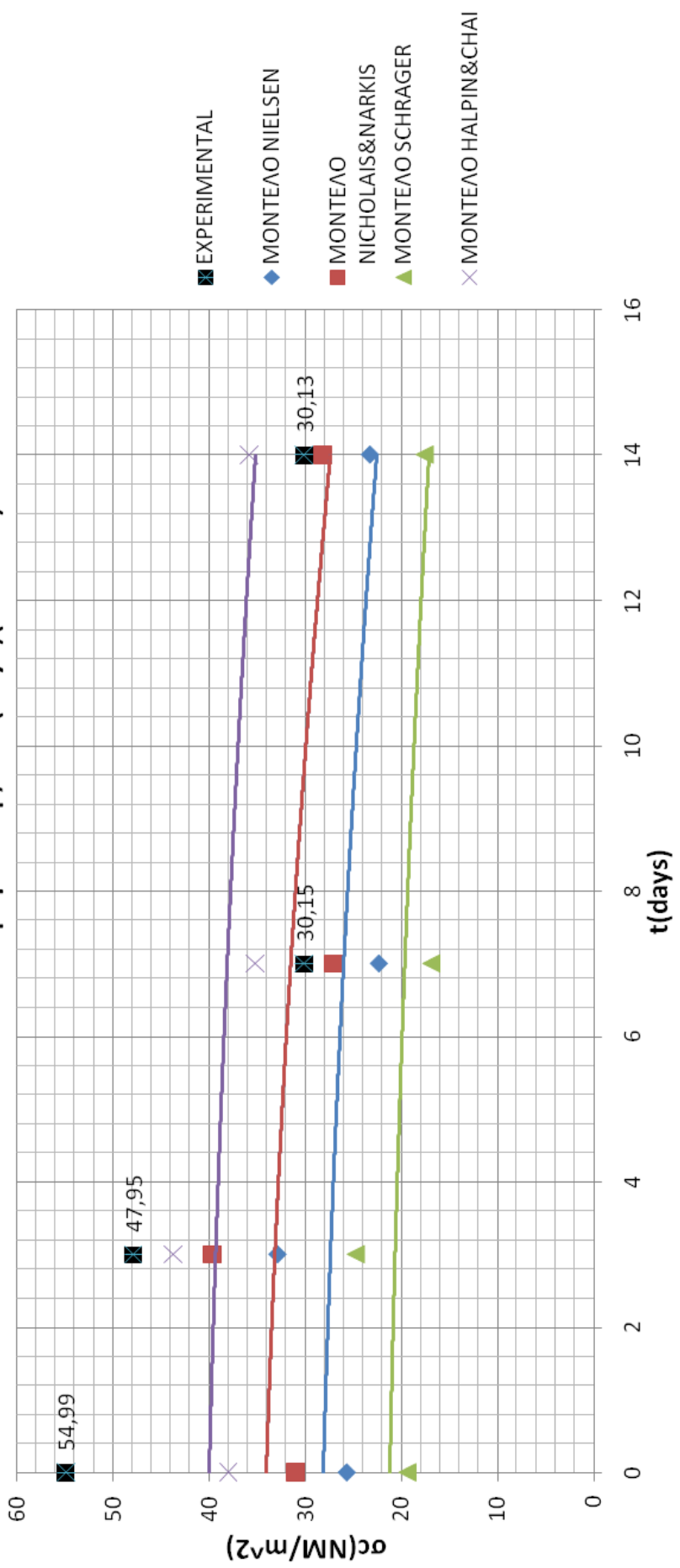


T2. Τάση θραύσης  $\sigma_c$ - $t$ (days)( $V_f=20\%$ )

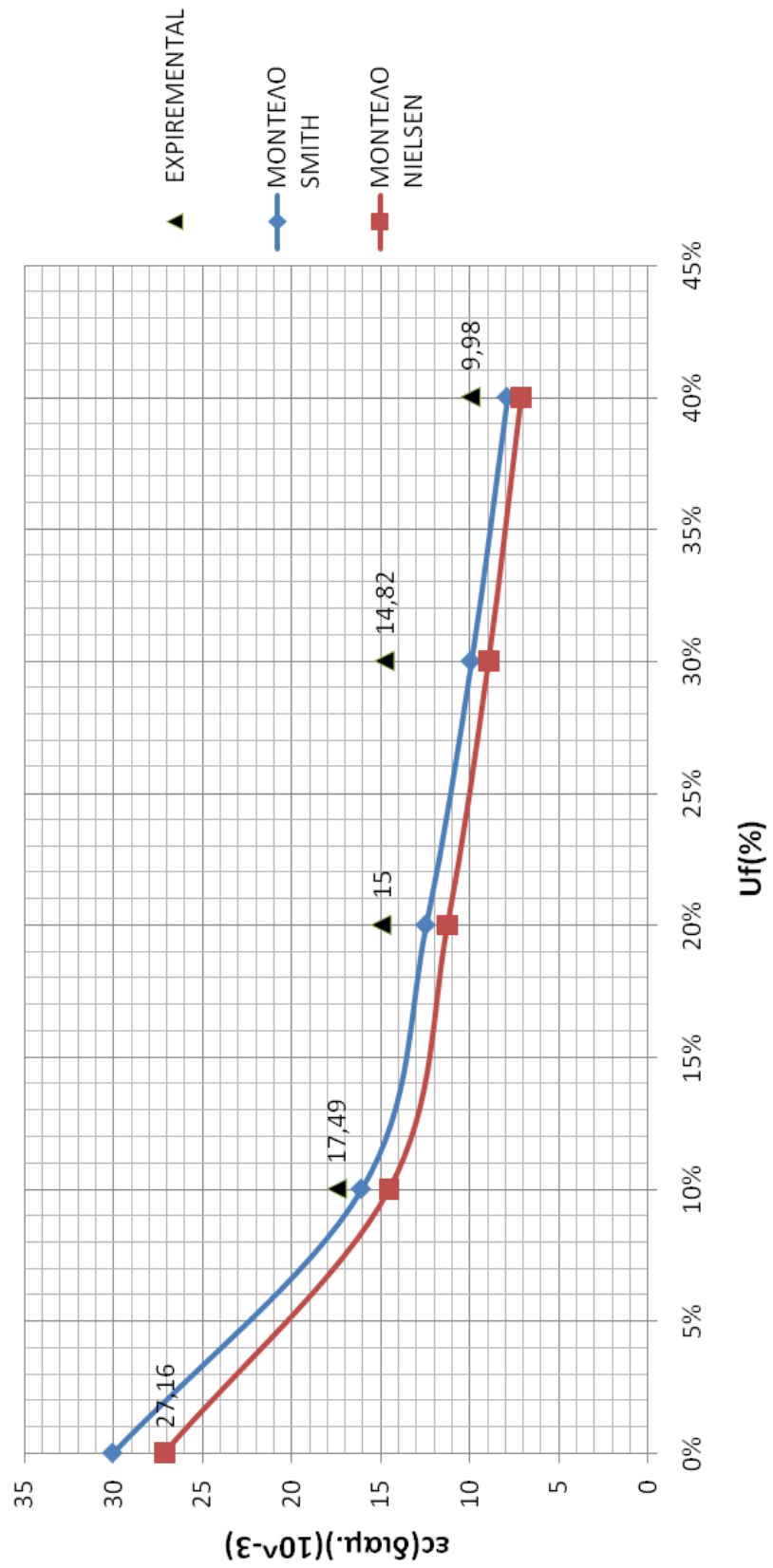




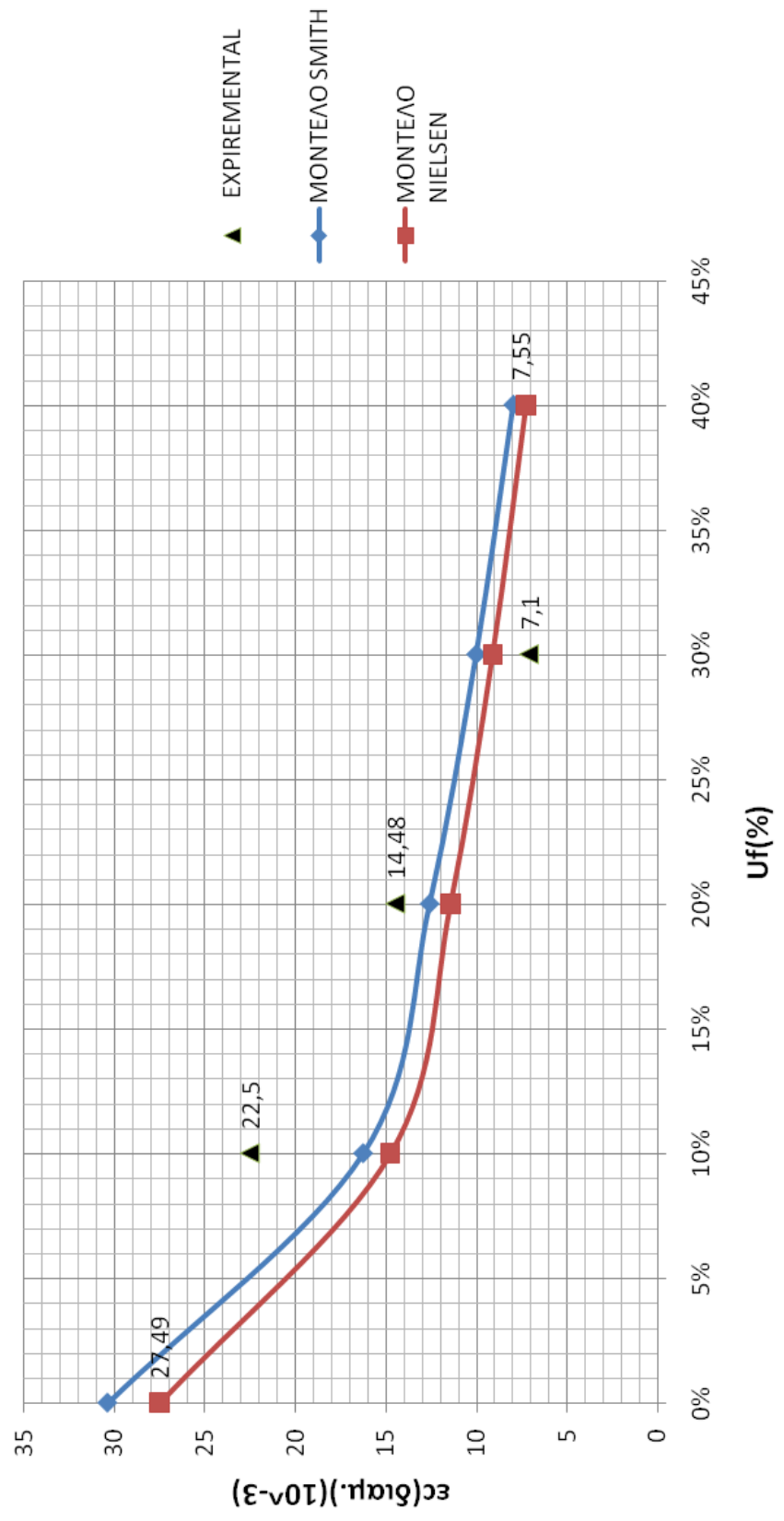
T3. Τάση θραύσης  $\sigma_c$ - $t$ (days)( $V_f=40\%$ )



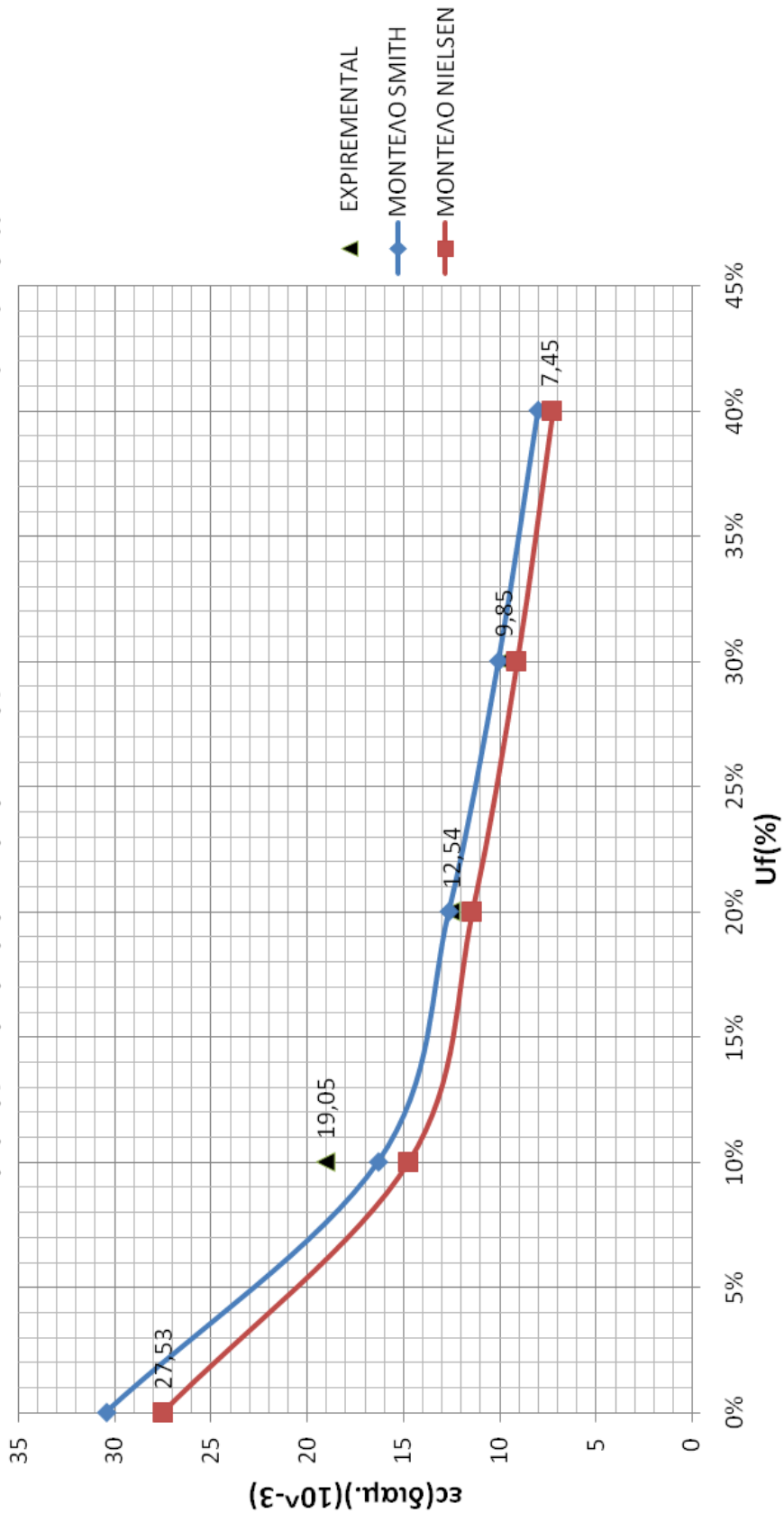
Δ1. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης εκ-ποσοστό κόκκων( $t=0(\text{days})$ )



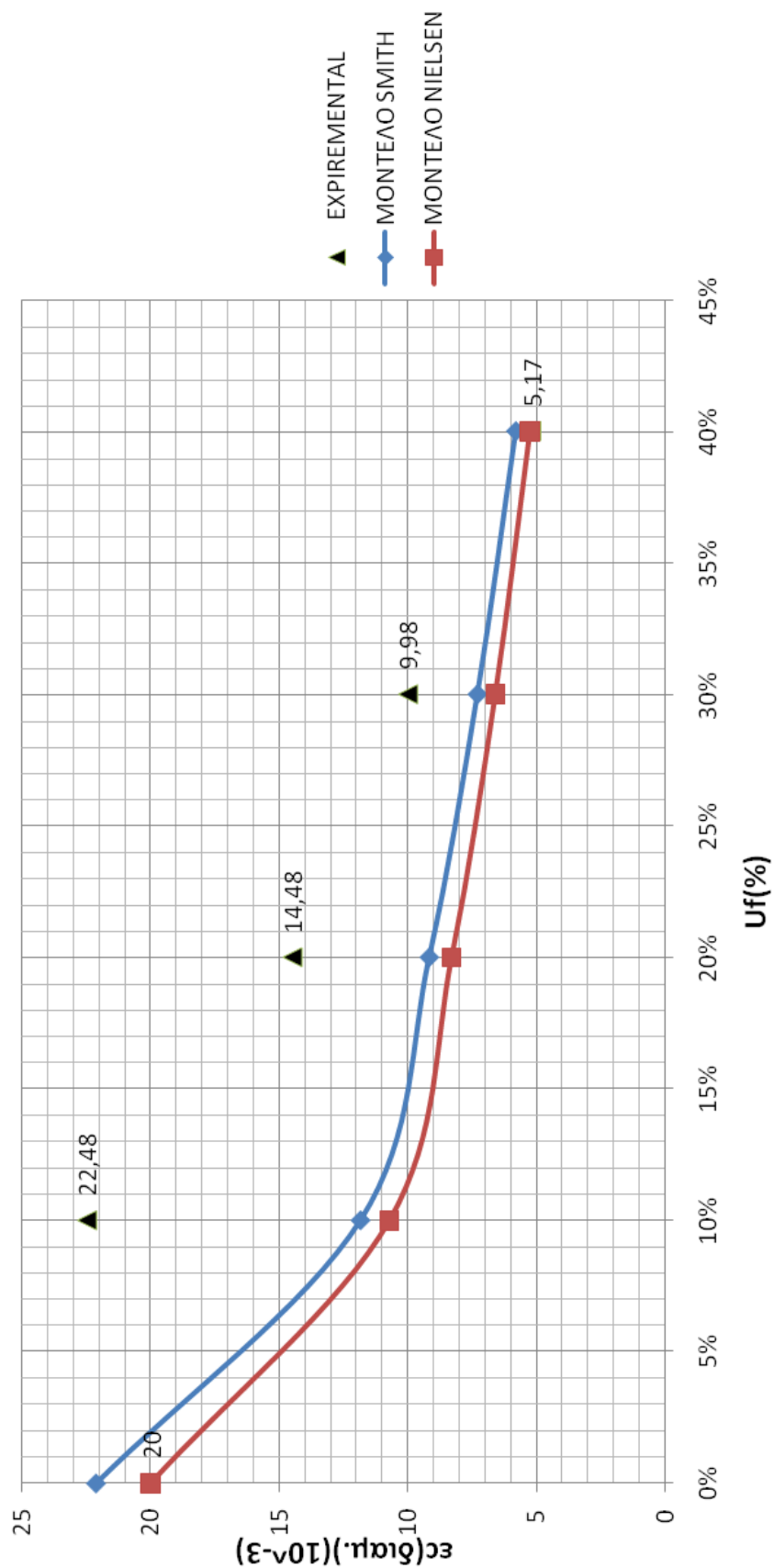
Δ2. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης εκ-ποσοστό κόκκων(t=3(days))



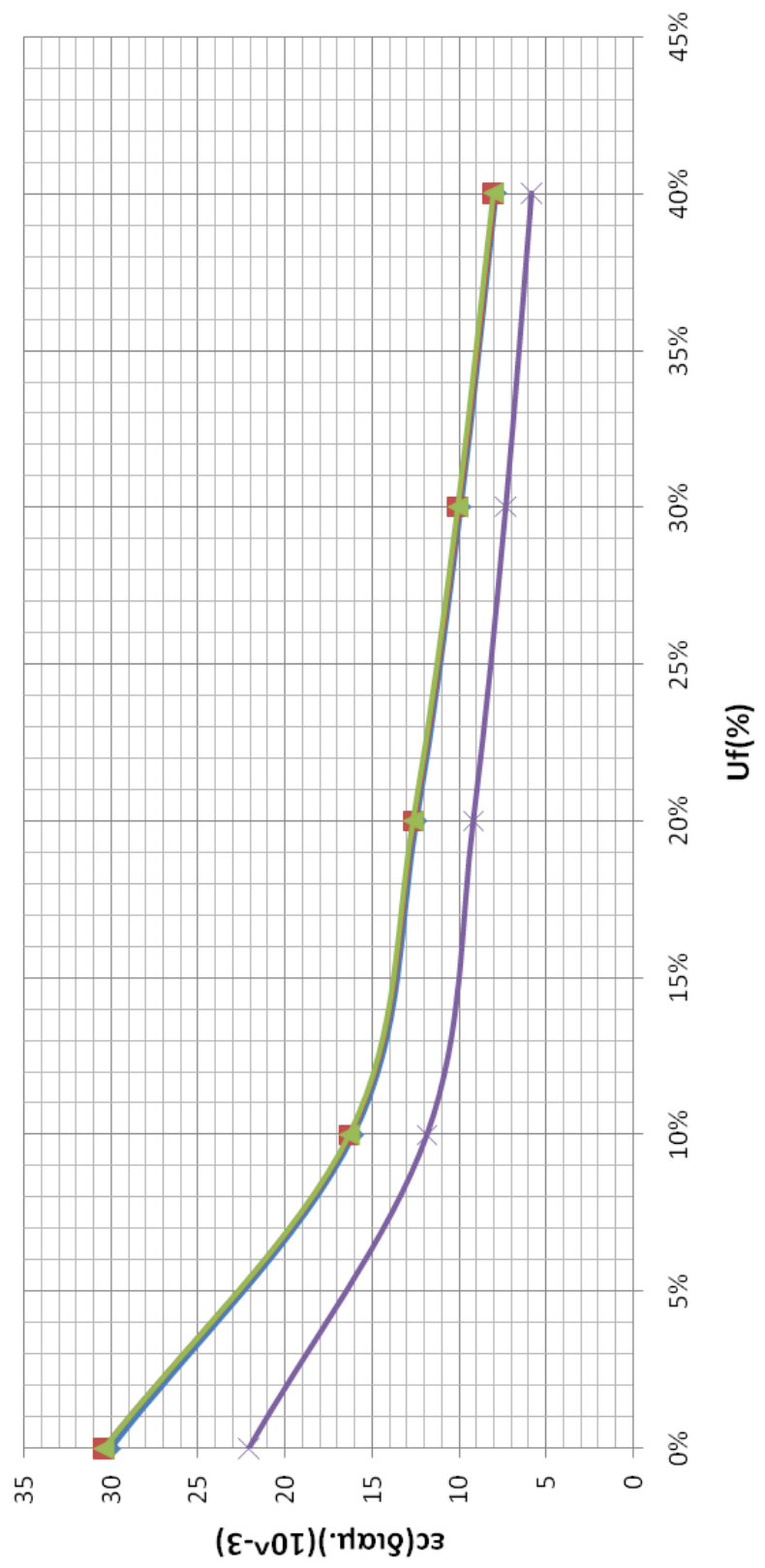
Δ3. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης εκ-ποσοστό κόκκων(t=7(days))



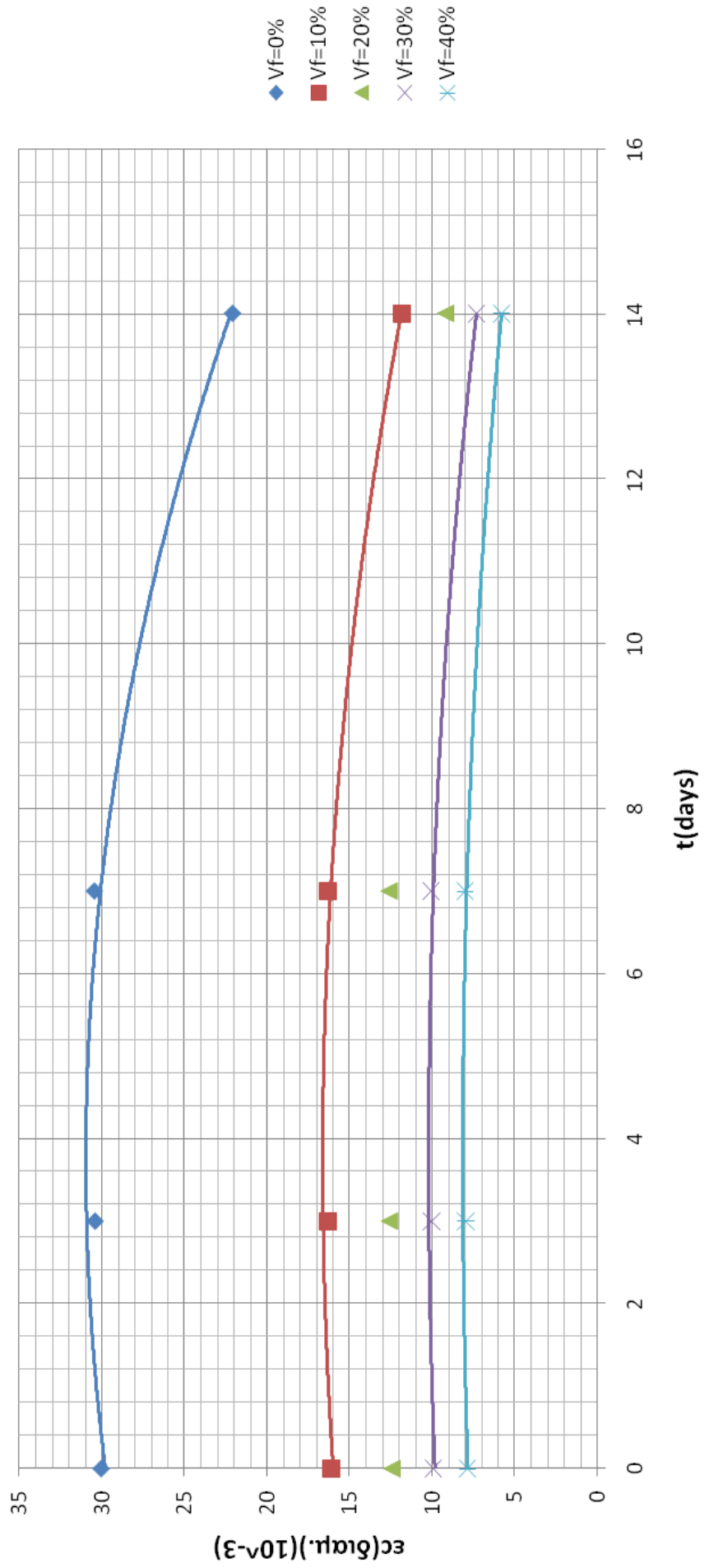
Δ4. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης εκ-ποσοστό κόκκων(t=14(days))



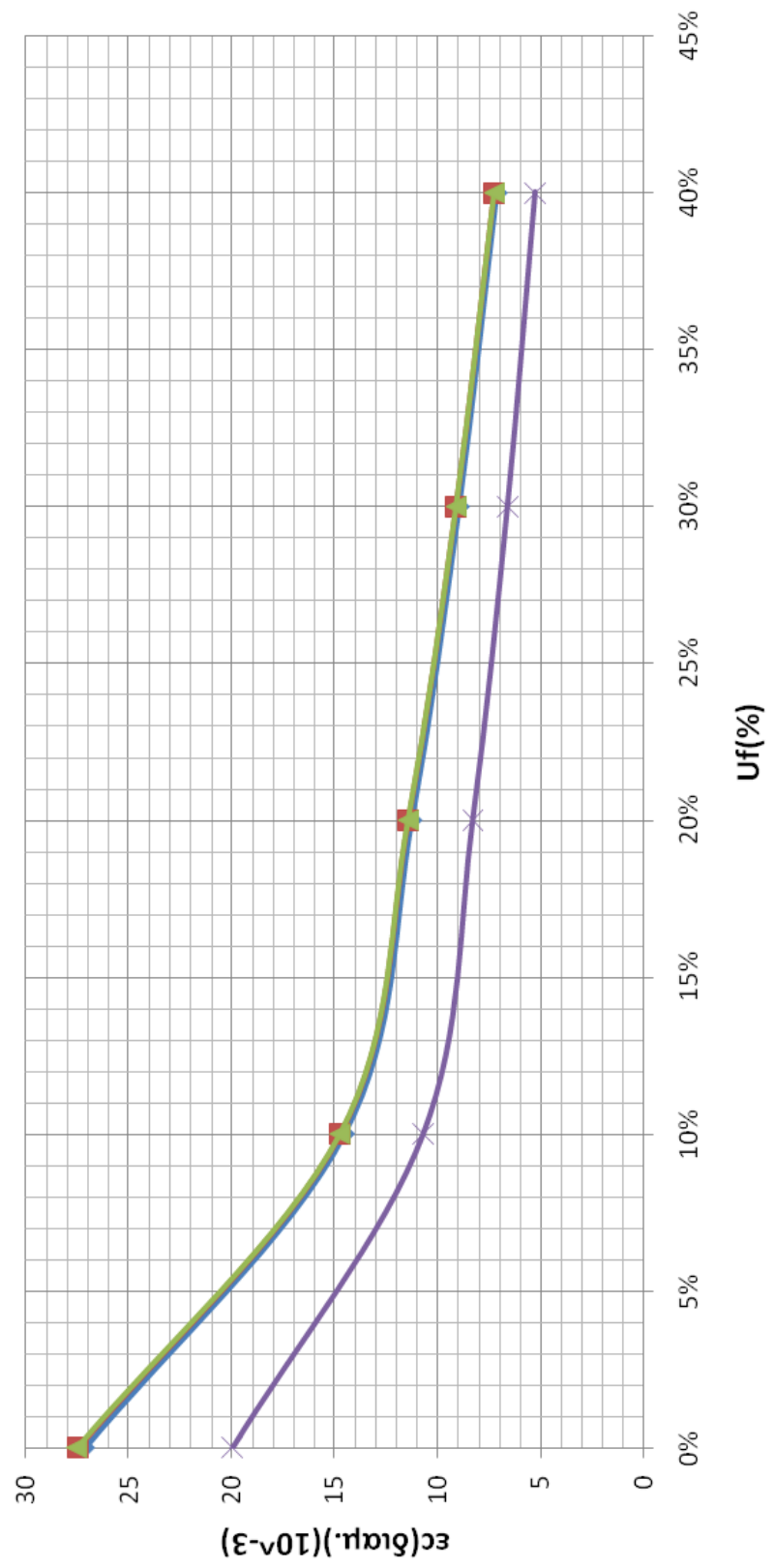
Δ5. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης εκ-ποσοστό κόκκων (Μοντέλο Smith)



Δ6. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon\text{-}t(\text{days})$  (Μοντέλο Smith)

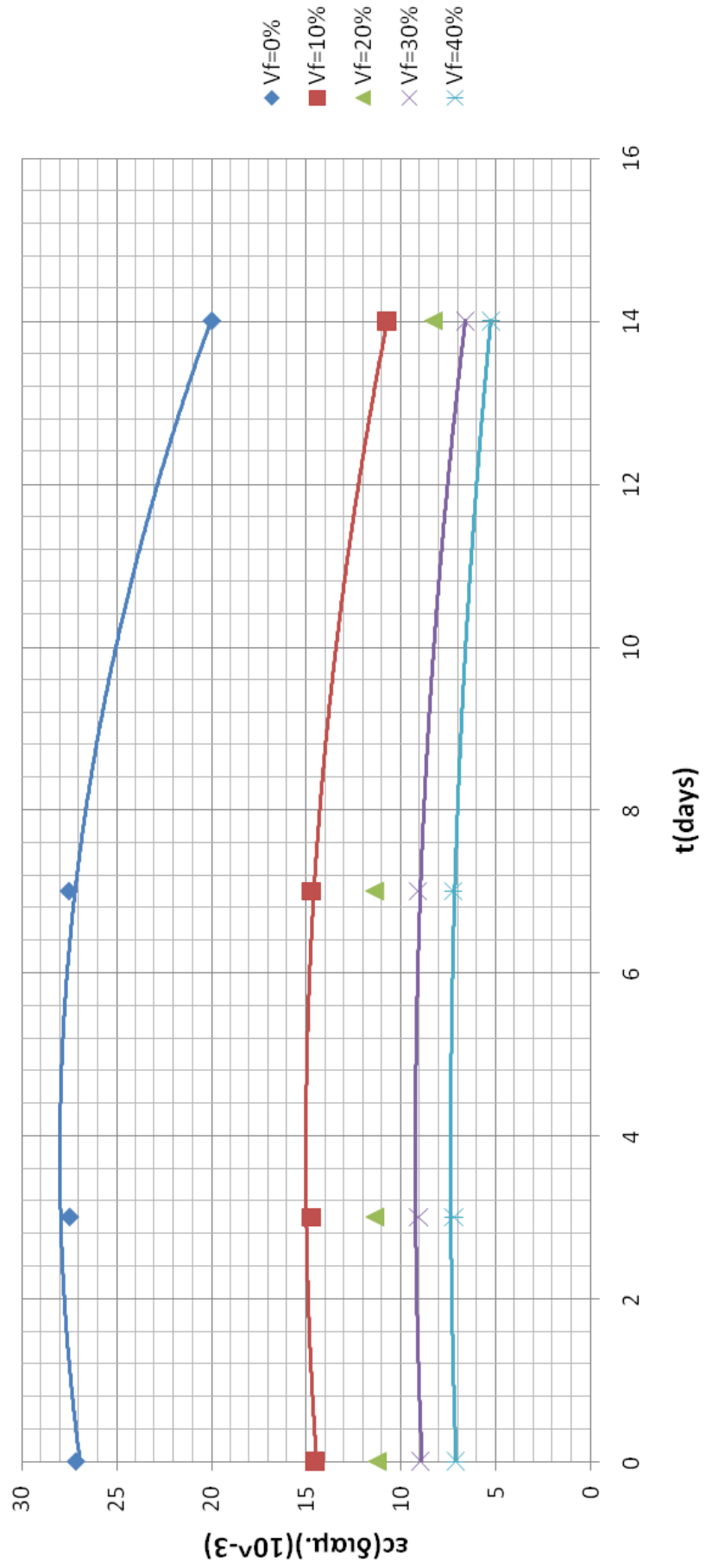


Δ7. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης εκ-ποσοστό κόκκων(Μοντέλο Nielsen)

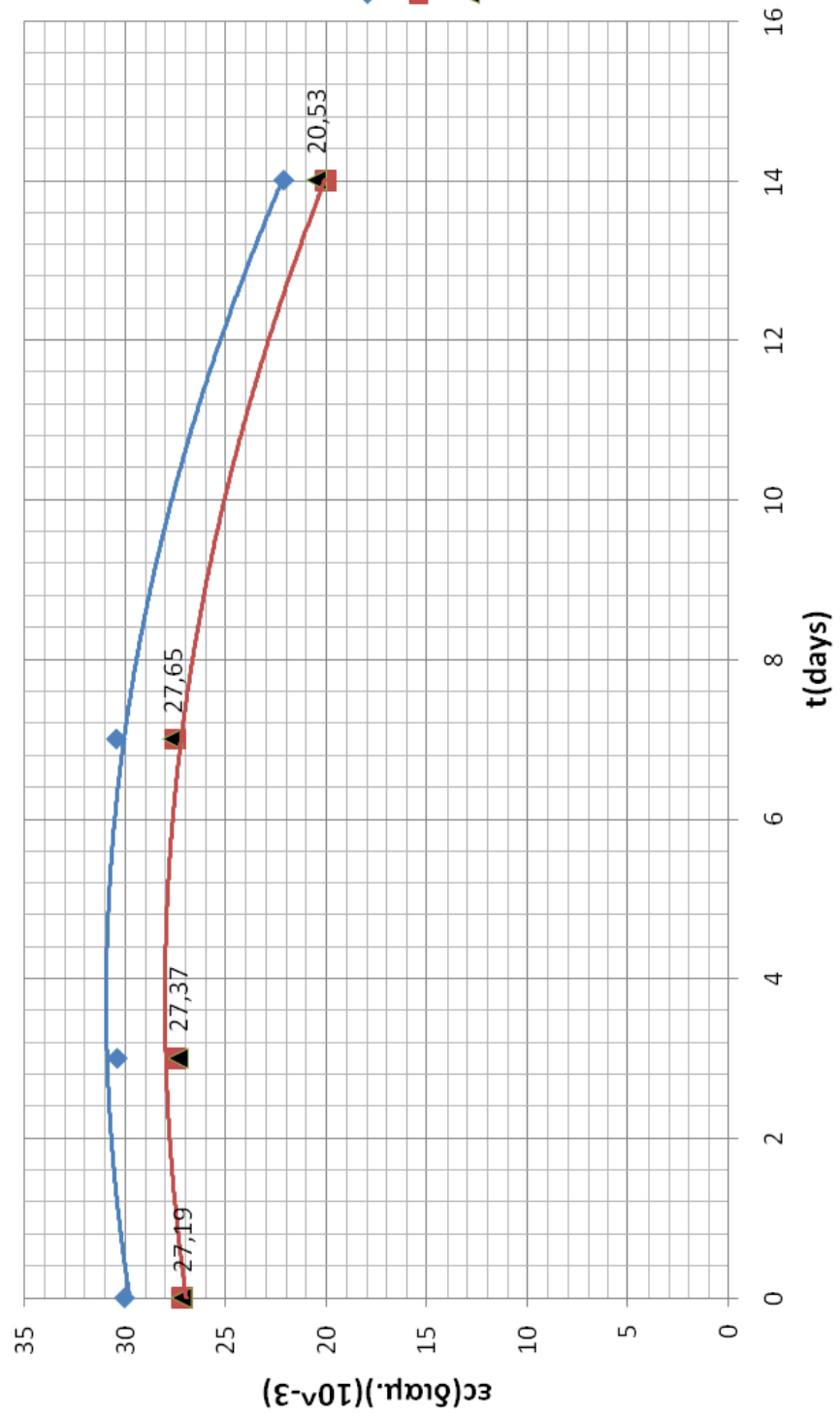




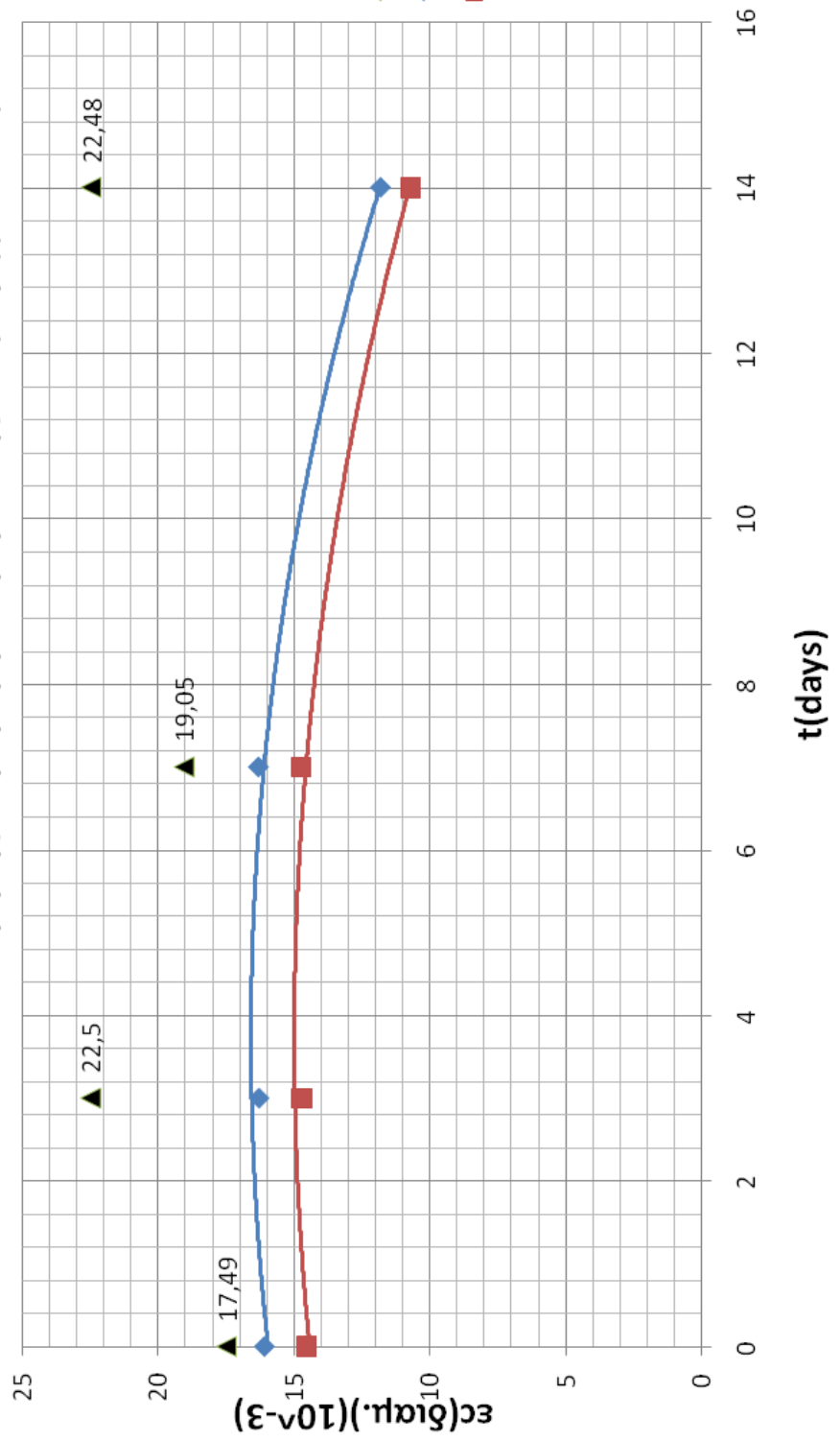
Δ8. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_c-t$ (days)(Μοντέλο Nielsen)



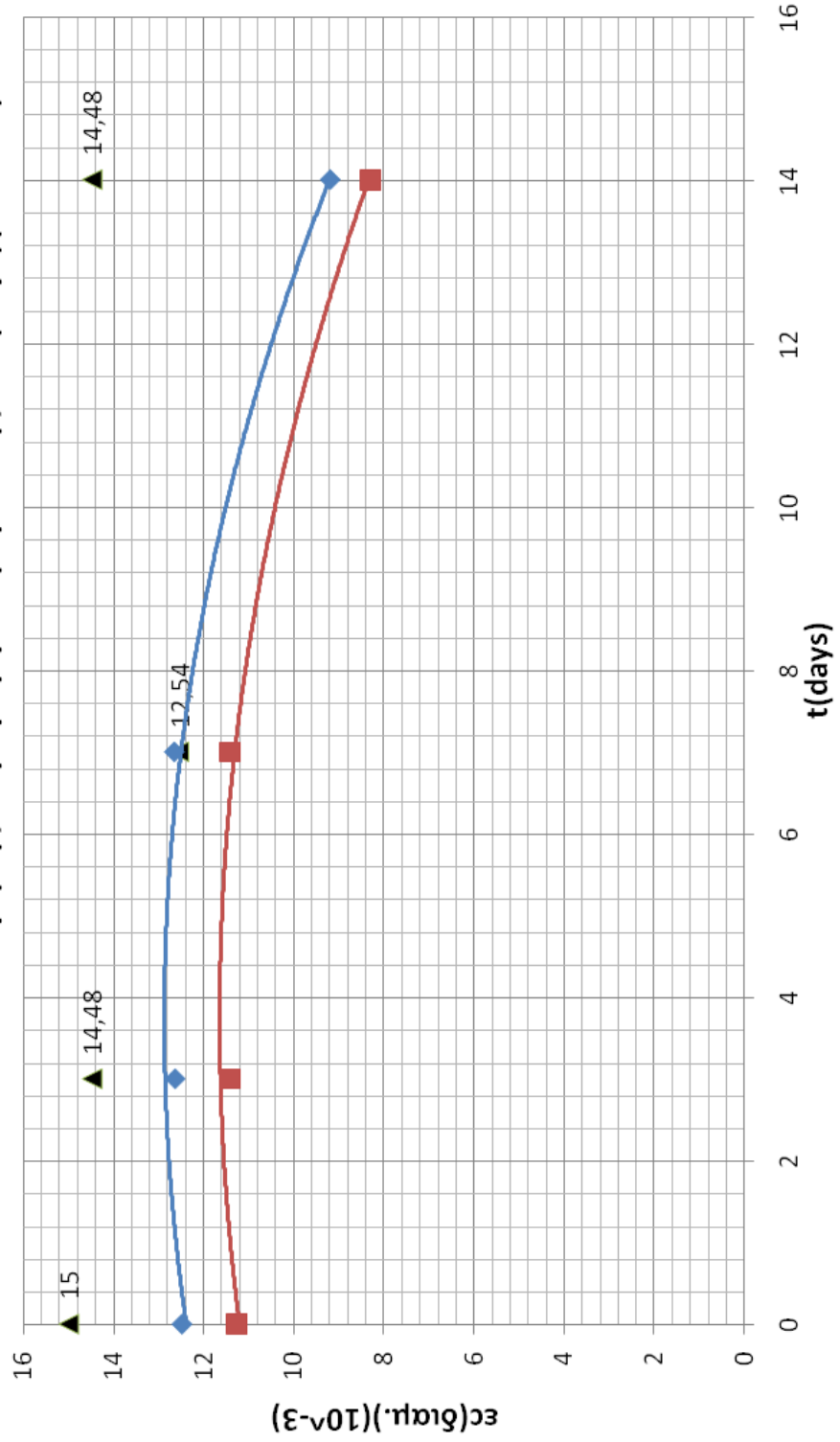
Δ9. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_c-t(\text{days})(V_f=0\%)$

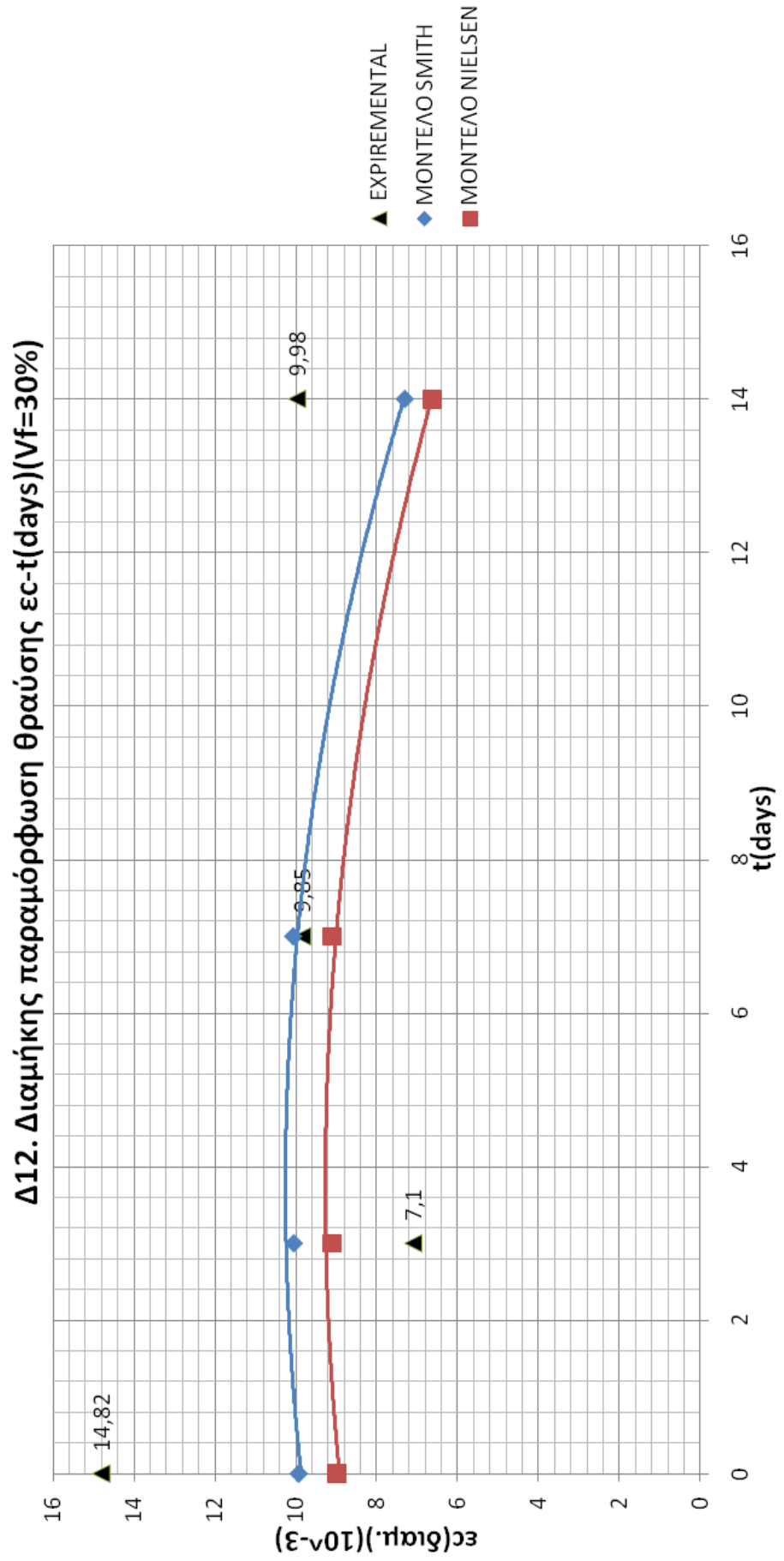


Δ10. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_c-t(\text{days})(V_f=10\%)$

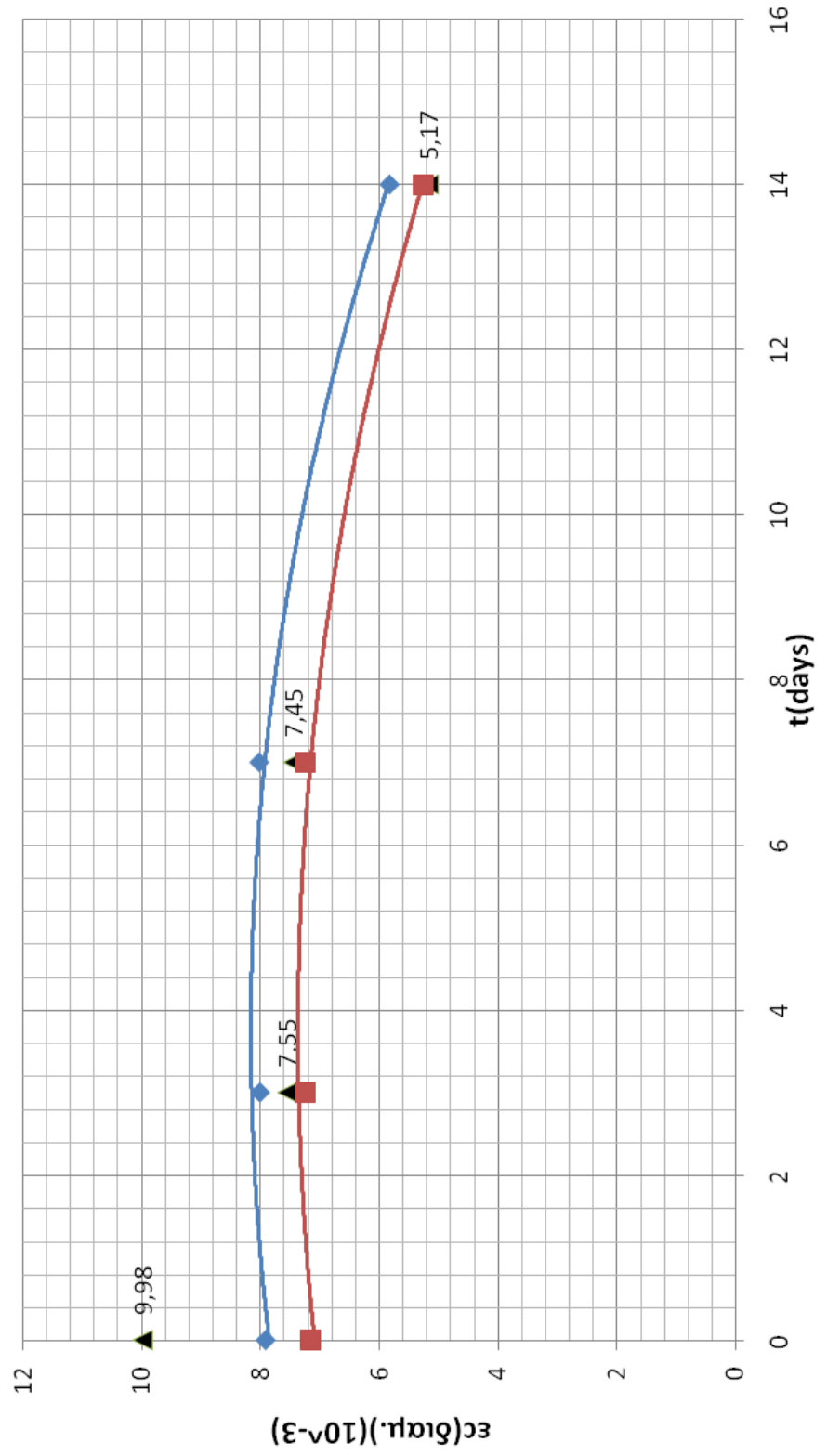


Δ11. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_c-t(\text{days})(V_f=20\%)$





Δ13. Διαμήκης παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_c-t(\text{days})(V_f=40\%)$



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. JUNE, R.R and Lager, J.R., "Commercial Aircraft", Applications of Composite Materials, ASTM STP 524, American Society for Testing and Materials 1973.
2. Salkind, M.J., "VTOL Aircraft", Applications of Composite Materials, ASTM STP 524, American Society for Testing and Materials 1973.
3. Lee & Neville, "Epoxy Resins, Their applications and technology", Mc Graw Hill, New York.
4. H.Lee, K.Neville, "Handbook of Epoxy Resins", Mc Graw-Hill, New York.
5. Κοντού, "Σχέση Δομής και Θερμομηχανικής Συμπεριφοράς Εποξειδικής Ρητίνης Τροποποιημένης με Μηχανικά και Χημικά Πρόσθετα, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1985.
6. Πειραματική Αντοχή των Υλικών, Ν.Ανδριανόπουλος, Ε.Κυριαζή, Κ.Λιακόπουλος, Αθήνα 1991.
7. Counto, Mag.Concr.Res 16(1964) 129.
8. Paul, Trans Amer. Inst. Mech. Eng. 36(1960) 218.
9. Ferry, "Viscoelastic Properties of Polymers" John Wiley & Sons Inc.
10. A. Einstein, "Uber die von Molekularkinetischen Theorie der. Warme Gefoderto Bewegung von in Ruhenden Flussigkeeten suspendionten Teilchen", Ann Physic, Vol 17, p 549, (1905), "Eine Neue Bestimmung der Molekuldimensionen" Ann Physic, Vol 19, p 289, (1906), "Berichitigung zu meiner Arbeit Eine neue Bestimmung der Molekuldimensionen", Vol 34, p 591,(1911).
11. E. Guth,"Theory of Filler Reinforcement", Jhl Appl. Phys. Vol.16, pp 20-26(1945).
12. H.M. Smallwood, "Limiting Law of the Reinforcement of Rubber" Jnl. Appl.Phys, Vol. 15, pp 785-762 (1944).
13. E.H. Kerner, The Elastic and Thermoplastic Properties of Composite Media, Proc.Phys, Soc.698, pp 808-813,(1953).
14. M.Mooney, "The Viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles", Intl.Colloid Sci. Vol. 6 pp, 162-169,(1951).
15. H.Eilers and Van Dyck , Kolloid Z, Vol.97, pp 313-318,(1941).
16. G.D Spathis, E.P. Sideridis and P.S. Thecocharis. "Adhension efficiency and Volume Fraction of the Boundary Interphase in Metal - Filled epoxies", Intl. Jnl. Adhesion and Adhesives, Vol 1, No 1, pp 195-201, (1981)
17. P.S. Theocharis, "The Mesophase and its influence on the Mechanical Behaviour of Composities", Advances in Polymer Science 66, Springer - Verlag Berlin, pp 149 - 186, (1985).
18. P.S. Theocharis, "The Adhesion Quality and the Extent of the Mesophase in Particulates", Jnl. of Reinforce Plastics and Composities, Vol 29,2997 - 3011 (1984)

19. P.S. Theocharis and E.Sideridis, Journal of Applied Polymer Science, Vol 29, 2997 - 30011 (1984)
20. R.Hill, J.Mech.Phys. Solid 11 (1963) 357.
21. T.Lewis and L.Nielsen, J. Appl. Polym. Sci. 14 (1970) 1449.
22. J. Spanoudakis and R.J. Young, J.Mater.Sci. 19 (1984) 487.
23. R.J. Young, Proceedings of the international Conference, "Fillers '86" (PRL. London, 1986) Paper 13.
24. P.H. Tb, Vollenbern and D.Heiken, ibid. (PRL. London, 1986) Paper 14.
25. A.M. Bueche, J. Polym. Sci. 25 (1957) 139.
26. T.T. Wu, Int. J. Solids Struc. 2 (1966) 1.
27. T.S. Chow, J. Polym. Phys. 16 (1987) 959.
28. S. Ahmed and F.R. Jones, Composites 19 (1988) 277.
29. Idem, ibid. 21 (1990) 81.
30. R.A. Dickie, J. Appl. Polym. Sci, 17 (1973) 454.
31. R.M. Christensen, "Mechanics of Composite Materials", (Wiley New York, 1979).
32. Y. Sato and J. Furukawa, Rubber Chem. Technol. 36 (1963) 1081.
33. A.C. Moloney, H.H. Kaush and H.R. Stieger, J. Mater. Sci. 18 (1983) 208.
34. Idem, ibi. 19 (1984) 1125
35. Saada SA (1962) Elasticity. Theory and Applications, Pergamon Press, New York.
36. L.E. Nielsen, J. Compos. Mater. 1 (1967) 100.
37. Idem, J. Polymer Sci. Polymer Phys. ed. 16 (1978) 959.
38. L.E. Nielsen, J. Appl. Polym. Sci. 10 (1966) 97.
39. L. Nicolais, E. Drioli and R.E. Landel, Polym. 14 (1973) 21.
40. L. Nicolais, Polym. Eng. Sci (1975) 137.
41. L. Nicolais & M. Narkis, ibid 11 (1973) 194.
42. L. Nicolais & L. Nicodemo, ibid 13 (1973) 469.
43. J. Leidner & R.T. Woodahams, J. Appl. Polym. Sci. 18 (1974) 1639.
44. A. Kelly, "Strong Solids" (Clarendon Oxford, 1966), p. 161.
45. A.G. Atkins, C.S. Lee and R.M. Caddell, ibid. 10 (1975) 1381.
46. T.L. Smith, Rubber Chem. Techn. Vol 34 pp 123 - 129, (1961), Trans. Sac. Rheol, Vol 3 pp 113 - 119, (1959).
47. F. Bueche. "Molecular Basis for the Mulins Effect" Jnl. Appl. Polym. Sci, Vol. 4pp 104 - 107, (1960).
48. F.F. Lange Fracture energy of particulate composites (1971).



- 49.** Griffith, A.A. (1920). Phil. Trans. Roy. Soc., A 221, 163.
- 50.** Orowan, E. (1984). Repts. Prog. Phys., 12, 185.
- 51.** Irwin, G.R. (1964) Appl. Mats. Res., 3, 65.
- 52.** Thomas, A.G. & Kadir, A. (1983). J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.
- 53.** Mohamed (Kadir), A. K. B. (1980). Crack propagation in rubbers, PhD Thesis, Queen Mary College, London, p.116.
- 54.** D. A. Summers, J. Corwinne and Li King Chen, Proceedings of the 12th Symposium on Rock Mechanics, Society of Mining Engineers, (A.I.M.M.P.E., New York 1971) p.241.
- 55.** S. Timochenko, "Strength of Materials", Pt 2 (Van Nostrand Reinhold, New York, 1958) p. 57.
- 56.** H.G. Tattersal and G. Tappin, J. Mater. Sci. 1 (1966) 296.
- 57.** C.E. Turner, Mat. Sci and Eng. 11 (1973) 275.
- 58.** H.R.Brown, J. Mater. Sci. 8 (1973) 941.
- 59.** J.R. McLaren, G. Tappin and R.W. Davidge, Proc. Brit. Ceram. Soc 20 (1972) 252.
- 60.** W.F. Brown and J.E. Swarley, ASTM Spec. Tech Pub. No 410 (1966).
- 61.** J. Topping, "Errors of Observation and their Treatmeant in SI units", (Chapman and Hall, London, 1972).
- 62.** S.W. Freiman "Fracture Mechanics applied to brittle Materials", STP 678, 1979
- 63.** N.E Dowling "Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture and fatigue", Prentice Hall, Inc., N.j., 1993.