

Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας



ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

**Εκτίμηση Συμπεριφοράς Ερπυσμού**  
**Ωστενιτικών Χαλύβων**

Κώνστας Βασίλειος

Χουλιάρας Βασίλειος

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Μπαξεβάνη Ελένη

Επιτροπή: Γιαννακόπουλος Αντώνιος  
Σοφιανόπουλος Δημήτριος

**Πτυχιακή Εργασία** που υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών  
Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ως μερική  
υποχρέωση για τη λήψη του πτυχίου του Πολιτικού μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2006



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5084/1  
Ημερ. Εισ.: 05-10-2007  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ  
2006  
ΚΩΝ

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

1.1 Γενικές παρατηρήσεις για το φαινόμενο του ερπυσμού.	2
1.2 Θερμοκρασιακή περιοχή ερπυσμού.	8
1.3 Δοκιμή και νόμος του ερπυσμού.	9
1.4 Τυπική συμπεριφορά υλικού στον ερπυσμό.	14

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

2.1 Γενικά	18
2.2 Προσέγγιση - Εκτίμηση του φαινομένου του ερπυσμού.	18
2.2.1 Μοντελοποίηση.	19
2.3 Προσεγγίσεις Μοντελοποίησης.	20
2.3.1 Σύνθετα μοντέλα (Composite Models).	20
2.3.2 Μοντέλα μικροδομής (Microstructural Models).	23
2.3.3 Παραμετρικά μοντέλα.	23
2.3.4 Μοντέλα δικτύου (Neural Network Models).	25

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

3.1 Γενικές παρατηρήσεις για την τεχνική προσέγγισης $\theta$ .	28
3.2 Μαθηματική διατύπωση της τεχνικής 5- $\theta$ .	30
3.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων 5- $\theta$ .	33

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

4.1 Πειραματική διαδικασία.	38
4.2 Αποτελέσματα.	41
4.3 Συμπεράσματα	134

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 135

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σ' αυτή την εργασία αφιερώνουμε την προσοχή μας στη μοντελοποίηση και στην ανάλυση του φαινομένου του ερπυσμού στα μέταλλα έτσι ώστε τα αποτελέσματα να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό κατασκευών που λειτουργούν κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες. Ως στόχος της εργασίας είναι η μελέτη του ερπυσμού από πλευράς μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού σε δεδομένες συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας και η συσχέτιση της μεταβολής παραμόρφωσης με την ενδεχόμενη θραύση με την ανάλυση σχεδιασμού που προσεγγίζεται.

Αφού έχει γίνει μια αναφορά στις έννοιες του ερπυσμού και στις διάφορες προσεγγίσεις μοντελοποίησης που έχουν γίνει μέχρι σήμερα στη συνέχεια παρουσιάζεται η δική μας δουλειά η οποία είναι μια προσπάθεια μοντελοποίησης του ερπυσμού με την παραμετρική μέθοδο των  $\theta$ .

Η τεχνική προσέγγισης  $\theta$ , (όπως έχει επικρατήσει να λέγεται) ανήκει γενικότερα στη κατηγορία των παραμετρικών μοντέλων προσέγγισης του φαινομένου του ερπυσμού. Η τεχνική λοιπόν αυτή υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια το χρόνο που χρειάζεται για την θραύση του υλικού. Ακόμη, επιτρέπει από ολόκληρη την καμπύλη ερπυσμού, δηλαδή και τα τρία στάδια (πρωτογενής δευτερογενής και τριτογενής ερπυσμός) να αξιοποιηθούν τα πειραματικά δεδομένα και χρησιμοποιηθούν ως οδηγός για την συμπεριφορά του υλικού για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Η τεχνική προσέγγισης  $\theta$  έχει τρία βασικά βήματα. Κατ' αρχάς, υπάρχει το πειραματικό στάδιο, όπου για κάθε μονοαξονικά εφαρμοζόμενη σταθερή τάση για συγκεκριμένη θερμοκρασία και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μας δίνει την καμπύλη ερπυσμού από την οποία στη συνέχεια υπολογίζεται η μαθηματική σχέση που εκφράζει την καμπύλη αυτή. Ο

υπολογισμός της μαθηματικής σχέσης έγκειται στον προσδιορισμό των λεγόμενων παραμέτρων  $\theta$  για κάθε ομάδα πειραματικών δεδομένων τάσης και θερμοκρασίας. Δεύτερον, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που υπολογίστηκαν στο πρώτο βήμα, η μορφή αυτών των καμπύλων ερπυσμού προβάλλεται σε άλλες τιμές τάσης και θερμοκρασίας, είτε μέσα, δηλαδή παρεμβολή, είτε έξω, δηλαδή παρέκταση, από την αρχική σειρά των πειραματικών δεδομένων. Τρίτον, υπολογίζονται κύρια μεγέθη που αφορούν το φαινόμενο του ερπυσμού και κατά συνέπεια τον σχεδιασμό του υλικού, όπως ο μέσος όρος του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης ή ο μέσος όρος του χρόνου θραύσης του υλικού, από τις προτεινόμενες μαθηματικές σχέσεις που έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παραπάνω τεχνική. Υπό αυτήν τη έννοια λοιπόν η τεχνική προσέγγισης  $\theta$  μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές κατηγορίες υλικών τα οποία υπόκεινται είτε σε μηχανικές καταπονήσεις, είτε σε ιδιαίτερα επιβαρυνμένες περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα ήταν ο χάλυβας με τύπο X6 CrNi 1811. Εξήντα πέντε δοκίμια, με ενεργό μήκος 50 mm και διάμετρο 10 mm εξετάστηκαν σε μια σειρά από τάσεις στις θερμοκρασίες 650 °C, 700 °C και 750°C . Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων επεξεργάστηκαν στην εργασία αυτή για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Δομοστατικός Τομέας

Βόλος 2006

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

**Ερπυσμός** είναι το φαινόμενο κατά το οποίο επέρχεται σταδιακή πλαστική παραμόρφωση ενός υλικού, υπό την επίδραση σταθερού φορτίου. Ο ερπυσμός εκδηλώνεται σε θερμοκρασίες σχετικά υψηλές σε σχέση με τη θερμοκρασία τήξης και γίνεται αντιληπτός όταν το φορτίο επιβάλλεται για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Το αποτέλεσμα του ερπυσμού είναι μια μόνιμη, παραμόρφωση.

Πολλοί τύποι υλικών είναι επιδεκτικοί στο φαινόμενο του ερπυσμού: μέταλλα, κεραμικά, πλαστικά, συνθετικά υλικά.

- Χαρακτηριστικό παράδειγμα ερπυσμού είναι η σταδιακή παραμόρφωση και Διάρρηξη δικτύων σωληνώσεων μεταφοράς ατμού σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, υπό την επίδραση του ίδιου βάρους τους. Οι αγωγοί αυτοί κατασκευάζονται από κραματωμένους χάλυβες σε βελτιωμένη κατάσταση, υλικά που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στον ερπυσμό. Η αστοχία επέρχεται τους μετά από αρκετές εκατοντάδες ώρες στις θερμοκρασίες λειτουργίας που είναι συνήθως της τάξης των 300-450 °C.
- Ένα ευρύτερα γνωστό γεωλογικό φαινόμενο, που οφείλεται σε ερπυσμό, είναι η κίνηση των παγετώνων. Όταν η θερμοκρασία των παγετώνων δεν απέχει πολύ από το σημείο τήξης (0 °C), τότε υπό την επίδραση του δικού τους βάρους αρχίζουν να έρπουν, δηλαδή να παραμορφώνονται πλαστικά στη βάση τους, να θρυμματίζονται και να μετακινούνται προς τις πλαγιές των βουνών. Ο πάγος ως οξείδιο του υδρογόνου (H<sub>2</sub>O) κατατάσσεται στην κατηγορία των κεραμικών υλικών.
- Πολλά πολυμερή υλικά όπως π.χ τα θερμοπλαστικά, «μαλακώνουν» με την άνοδο της θερμοκρασίας και παραμορφώνονται με την επίδραση πολύ μικρών φορτιών.

Ο ερπυσμός μπορεί να θεωρηθεί ως ένα καθολικό φαινόμενο στη συμπεριφορά των υλικών. [1,4,5]

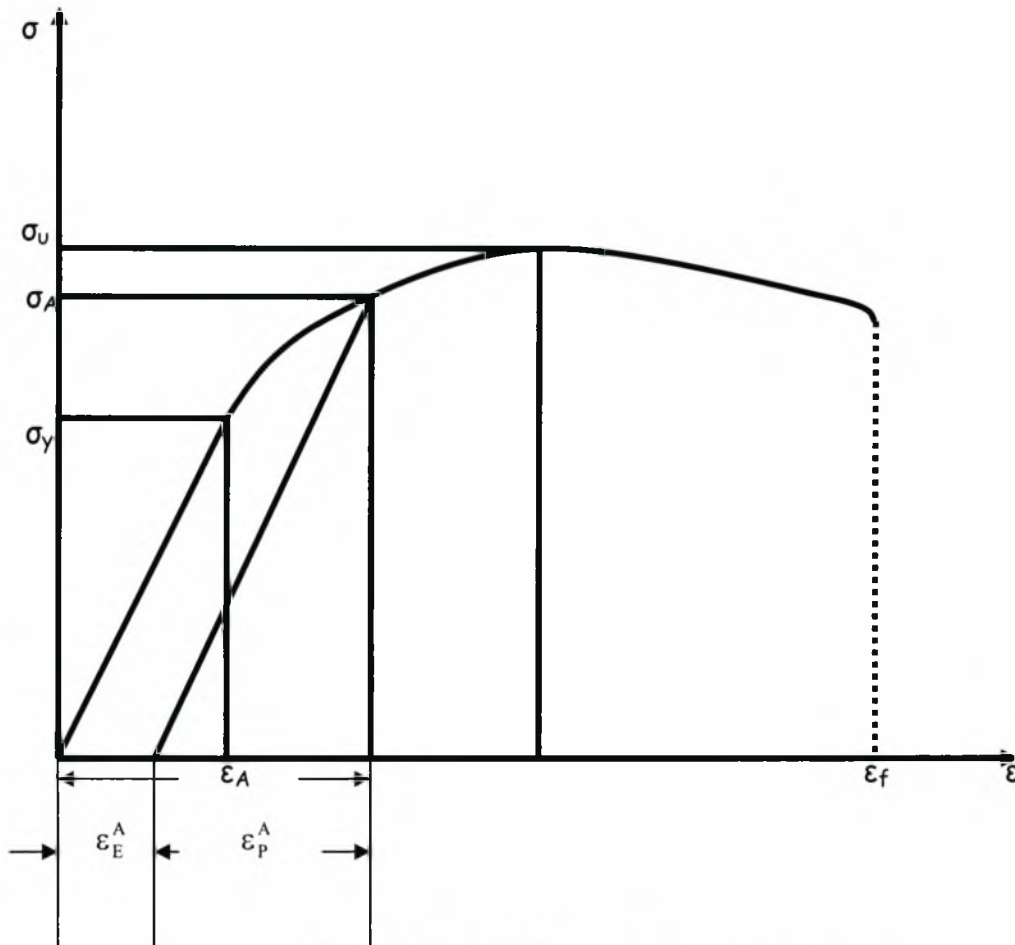
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### 1.1 Γενικές παρατηρήσεις για το φαινόμενο του ερπυσμού.

Στόχος της εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η ανάλυση του φαινομένου του ερπυσμού στον χάλυβα έτσι ώστε τα αποτελέσματα να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό κατασκευών που λειτουργούν κυρίως σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Ειδικότερα θα γίνει μελέτη του ερπυσμού από πλευράς μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού σε δεδομένες συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας και συσχέτιση της μεταβολής της παραμόρφωσης ερπυσμού με τον χρόνο.

Ο ερπυσμός είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο. Το πείραμα του εφελκυσμού δίνει μια σειρά από πληροφορίες όσον αφορά τη συμπεριφορά του υλικού. Ένα κυλινδρικό δοκίμιο τοποθετείται στην πειραματική μηχανή εφελκυσμού. Το δοκίμιο έχει εμβαδό διατομής  $A_0$  και αρχικό μήκος  $l_0$  και του ασκείται φόρτιση  $P$ . Η ονομαστική τάση που αναπτύσσεται ισούται με  $\sigma_n = P/A_0$ , ενώ η παραμόρφωση με  $\epsilon = (l-l_0)/l_0$ , όπου  $P$  και  $l$  η στιγμιαία φόρτιση και μήκος του δοκιμίου αντίστοιχα. Αν ληφθεί υπόψη η πραγματική μείωση του εμβαδού της διατομής (στένωση) τότε η πραγματική τάση ισούται με  $\sigma = P/A$ . [1]

Κατά τη διαδικασία του εφελκυσμού καθώς το φορτίο αυξάνεται, Σχ.1.1, τα περισσότερα μέταλλα επιδεικνύουν μια γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης μέχρι ένα όριο γνωστό ως όριο διαρροής  $\sigma_y$ . Εάν η τάση αφαιρεθεί πριν από την επίτευξη του ορίου διαρροής, η παραμόρφωση του υλικού μηδενίζεται, το υλικό δηλαδή συμπεριφέρεται στην περιοχή αυτή ελαστικά. Η κλίση της καμπύλης που περιγράφει την ελαστική περιοχή του υλικού ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας  $E$ . Για φόρτιση μεγαλύτερη του ορίου διαρροής του υλικού  $\sigma_y$ , η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης δεν είναι πλέον γραμμική, ενώ παρατηρείται ότι



Σχ. 1.1 Τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού

σταδιακά λιγότερη τάση απαιτείται για να παράγει μια δεδομένη μεταβολή παραμόρφωσης. Αυτή η συμπεριφορά συνεχίζεται μέχρι μια μέγιστη τάση  $\sigma_u$ , γνωστή ως μέγιστο όριο τάσης-όριο αντοχής, πέρα από το οποίο η τάση μειώνεται με περεταίρω αύξηση της παραμόρφωσης μέχρι ενός σημείου  $\epsilon_f$  στο οποίο επέρχεται θραύση του υλικού όταν αυτό είναι όλκιμο. Αν το δοκίμιο φορτιστεί μέχρι ενός τυχαίου σημείου  $A$ , το οποίο αντιστοιχεί σε τάση μεγαλύτερη του ορίου διαρροής και στη συνέχεια αποφορτιστεί παρατηρείται ότι, η παραμόρφωση του υλικού δεν μηδενίζεται. Υπάρχει μια παραμένουσα παραμόρφωση η οποία ονομάζεται πλαστική παραμόρφωση του υλικού  $\epsilon^p$  και η οποία ισούται με:

$$\epsilon_A^p = \epsilon_A - \epsilon_A^E = \epsilon_A - \frac{\sigma_A}{E} \quad , \quad (1.1)$$



Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη θραύση του δοκιμίου χρησιμοποιείται ως μέτρο της ολκιμότητας. Δηλαδή εάν η θραύση πραγματοποιείται σε υψηλές τιμές παραμόρφωσης το υλικό λέγεται ότι είναι όλκιμο ενώ εάν η θραύση πραγματοποιείται σε σχετικά χαμηλές τιμές τότε το υλικό χαρακτηρίζεται ως ψαθυρό. Η ολκιμότητα καθορίζεται από οποιαδήποτε από τις επόμενες εκφράσεις οι οποίες όμως αναφέρονται όλες στην χρονική στιγμή που πραγματοποιείται η θραύση. Δηλαδή έχουμε:

$$\varepsilon_f = \frac{l_f - l_o}{l_o} 100\% \quad , \quad (1.2)$$

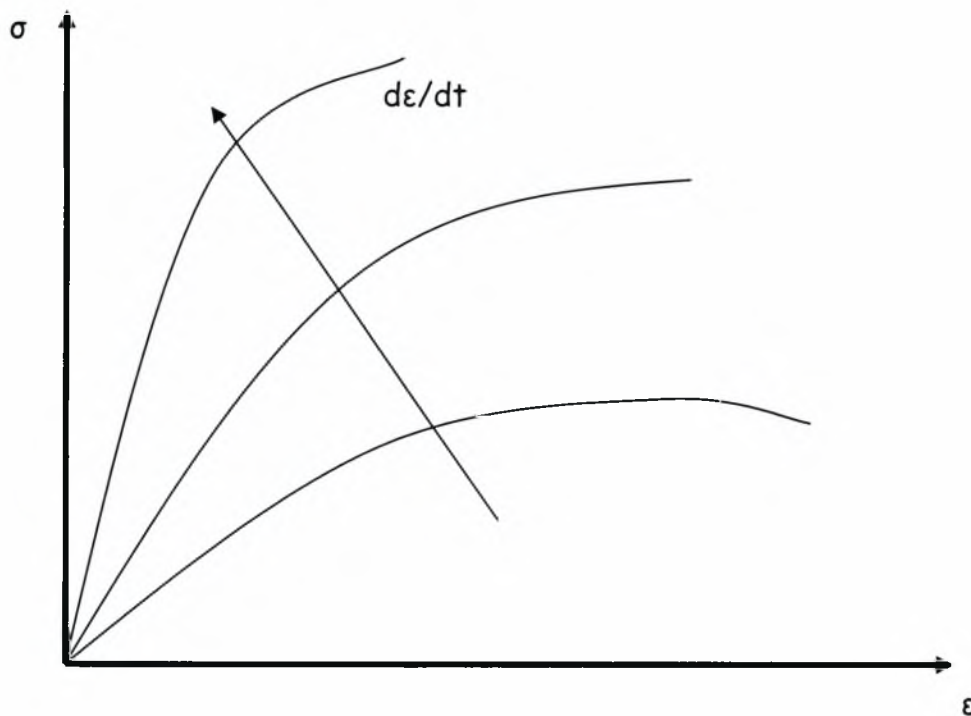
$$\varepsilon_f = \frac{A_o - A_f}{A_o} 100\% \quad , \quad (1.3)$$

$$\bar{\varepsilon}_f = \ln \frac{l_f}{l_o} 100\% \quad , \quad (1.4)$$

$$\bar{\varepsilon}_f = \ln \frac{A_o}{A_f} 100\% \quad , \quad (1.5)$$

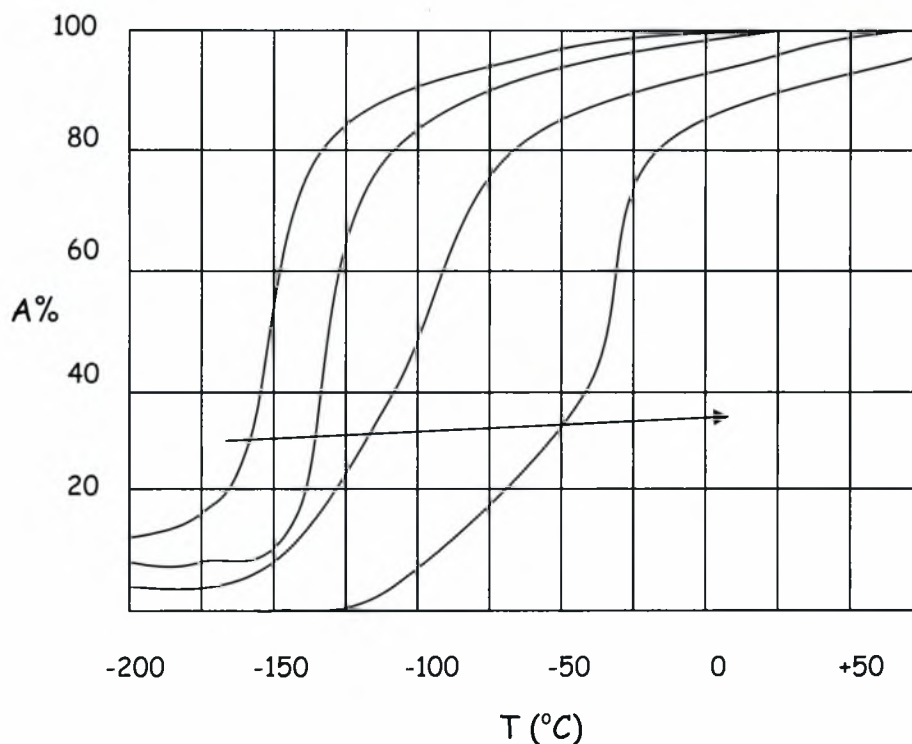
Η ολκιμότητα στην περίπτωση αυτή εκφράζεται υπό την έννοια της αλλαγής του μήκους του δοκιμίου ή της αλλαγής του εμβαδού διατομής στην περιοχή θραύσης του δοκιμίου. [1]

Η συμπεριφορά του υλικού όσον αφορά τη σχέση τάση- παραμόρφωση τόσο στην αρχική ελαστική περιοχή, όσο και στην πλαστική περιοχή που ακολουθεί μέχρι τη θραύση, δεν εξαρτάται από το χρόνο. Εντούτοις, εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης  $d\varepsilon/dt$ . Στο διάγραμμα (Σχ1.2) φαίνεται η επιρροή που έχει η αύξηση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης στο πείραμα του εφελκυσμού. Παρατηρώντας το διάγραμμα συμπεραίνεται ότι αυξάνοντας το ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης αυτό προκαλεί αύξηση του μέτρου ελαστικότητας καθώς επίσης του ορίου διαρροής και του ορίου θραύσης του υλικού.



Σχ1.2 Επιρροή του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης στο πείραμα του εφελκυσμού.

Η αλλαγή της θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιείται το πείραμα επίσης επηρεάζει το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης. Ειδικότερα αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση του μέτρου ελαστικότητας καθώς και του ορίου διαρροής. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η επιρροή της θερμοκρασίας και του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης στην ολκιμότητα του υλικού (Σχ1.3). Είναι φανερό ότι υπάρχει μια περιοχή θερμοκρασίας γύρω από την οποία το υλικό μεταβαίνει σχετικά απότομα από την όλκιμη στην ψαθυρή κατάσταση. Αυτό το όριο θερμοκρασίας αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης. Επίσης όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία που συμβαίνει η μετάβαση από την όλκιμη στην ψαθυρή κατάσταση τόσο απότομα πραγματοποιείται αυτή.



Σχ. 1.3 Επίρροή της θερμοκρασίας στην ολκιμότητα του υλικού.

Η πιο σημαντική επενέργεια της αύξησης θερμοκρασίας είναι η εισαγωγή ενός νέου φυσικού μεγέθους όπως είναι ο χρόνος ως παράγοντα που πρέπει να συνυπολογισθεί. Αυτή η χρονική εξάρτηση είναι κύρια χαρακτηριστική ιδιότητα του φαινομένου του ερπυσμού

Η γενική μορφή του φαινομένου του ερπυσμού μπορεί να παρασταθεί από μια συνάρτηση της μορφής:

$$\varepsilon = f(\sigma, t, T) \quad , \quad (1.6)$$

οπού:  $\varepsilon$  = παραμόρφωση

$\sigma$  = τάση

$t$  = χρόνος

$T$  = θερμοκρασία

Μια τέτοια σχέση εκφράζει την ερπυστική συμπεριφορά των υλικών κατά την οποία η παραμόρφωση δεν εξαρτάται μόνο από την τάση, αλλά και από την θερμοκρασία. Ο ερπυσμός είναι ένα φαινόμενο θερμικά ενεργοποιούμενο, επομένως

ελέγχεται από την ταχύτητα διάχυσης των ατόμων και εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Επειδή η διάχυση είναι η κίνηση ατόμων μέσα στο στερεό, ο χρόνος υπεισέρχεται ως θεμελιώδη μεταβλητή του φαινομένου είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω της ταχύτητας ερπυσμού  $\dot{\epsilon} = de/dt$ . Γι' αυτό το λόγο στη συνέχεια αντί να χρησιμοποιείται ως συνάρτηση για την περιγραφή του φαινομένου η παραμόρφωση  $\epsilon$ , χρησιμοποιείται η ταχύτητα ερπυσμού  $\dot{\epsilon} = de/dt$ . Πολύ σημαντική είναι επίσης η εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Στον ερπυσμό αν και διατηρείται σταθερή η τάση, η παραμόρφωση συνεχίζει να εξελίσσεται με τον χρόνο, μέχρι την τελική θραύση του υλικού. Αν αυξηθεί η θερμοκρασία ή η ασκούμενη τάση το φαινόμενο επιταχύνεται και η θραύση επέρχεται γρηγορότερα. [5]

Η συμπεριφορά αυτή πρέπει να αντιδιασταλεί με το γνωστό νόμο του εφελκυσμού  $\epsilon = f(\sigma)$ , ο οποίος εκφράζει συμπεριφορά ελαστοπλαστική, δηλαδή συμπεριφορά όπου η παραμόρφωση, ελαστική ή πλαστική, ακολουθεί στιγμιαία την επιβολή ή την αύξηση του φορτίου. Επίσης, η εξάρτηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς από την θερμοκρασία υπάρχει μεν αλλά σε αρκετά μικρότερο βαθμό. [1]

Στην πράξη, η ερπυστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών χαρακτηρίζονται συχνά ως συμπεριφορά υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας αντιστοίχως.

Ανάλογα με το σταθερό φορτίο που επιβάλλεται, η ταχύτητα παραμόρφωσης κατά τον ερπυσμό μπορεί να κυμαίνεται από  $\dot{\epsilon} = 1$  έως  $10^{-10} \text{ s}^{-1}$ . Συνηθέστερα η ταχύτητα παραμόρφωσης κυμαίνεται από  $10^{-1}$  έως  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$  και οι προκαλούμενες παραμορφώσεις πολλές φορές δεν γίνονται άμεσα αισθητές, παρά μόνο με τη πάροδο σημαντικού χρονικού διαστήματος.

## 1.2 Θερμοκρασιακή περιοχή ερπυσμού.

Όλα τα υλικά έρπουν όταν εργάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι όσον αφορά τις τεχνολογικές εφαρμογές, ο ερπυσμός ενδιαφέρει κυρίως την λειτουργία εγκαταστάσεων υψηλών θερμοκρασιών. Περιπτώσεις εκδήλωσης ερπυσμού παρατηρούνται συχνά σε μονάδες μετατροπής και παραγωγής ενέργειας, σε χημικές εγκαταστάσεις και σε μεταλλουργικές βιομηχανίες. Ερπυσμός εκδηλώνεται και σε γεωλογικά φαινόμενα με την παραμόρφωση πετρωμάτων. Έτσι εξηγούνται και οι πτυχώσεις διαφόρων ιζηματογενών ή μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων (ασβεστόλιθος, σχιστόλιθος κ.λ.π) οι οποίες παρατηρούνται πάνω στο φυσικό ανάγλυφο της γης. Οι πτυχώσεις αυτές πρέπει να έγιναν σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων, σε μεγάλα βάθη, διότι στις συνήθεις συνθήκες του περιβάλλοντος αυτά τα πετρώματα συμπεριφέρονται ψαθυρά.

Έχει διαπιστωθεί ότι η θερμοκρασία πάνω από την οποία αρχίζει να εκδηλώνεται έντονα το φαινόμενο του ερπυσμού συνδέεται άμεσα με το σημείο τήξης του υλικού.

Υλικά που έχουν υψηλό σημείο τήξης παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στον ερπυσμό. Έτσι το βολφράμιο αντέχει στον ερπυσμό ακόμα και σε κατάσταση πυράκτωσης. Στην ιδιότητα αυτή στηρίζεται η χρησιμοποίηση του στο νήμα των ηλεκτρικών λαμπτήρων. [2]

Υλικά με χαμηλό σημείο τήξης, όπως ο μόλυβδος μπορούν να έρπουν ακόμη και στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Είναι χαρακτηριστική η περίπτωση των σωληνώσεων μόλυβδου στις αποχετεύσεις των κτιρίων που αν δεν έχουν επαρκή στήριξη, παραμορφώνονται με τον χρόνο υπό την επίδραση του δικού τους βάρους.



Σχ 1.4 Οι σωλήνες μολύβδου παραμορφώνονται κατά τη διάρκεια των ετών λόγω του ερπυσμού.

Τόσο σε επίπεδο εργαστηριακό όσο και σε επίπεδο εμπειρικό έχει παρατηρηθεί ότι το φαινόμενο του ερπυσμού εμφανίζεται σε θερμοκρασίες που αντιστοιχούν στο 0,30 έως 0,50 του σημείου τήξης του υλικού. Να σημειωθεί ότι ο ερπυσμός μπορεί να παρατηρηθεί και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ανάλογα με τη φύση του υλικού και το μέγεθος του φορτίου. [3]

### **1.3 Δοκιμή και νόμοι του ερπυσμού.**

Η συμπεριφορά σε συνθήκες ερπυσμού, κοινή για όλες τις κατηγορίες των υλικών, γίνεται καλύτερα αντιληπτή με εργαστηριακές δοκιμές.

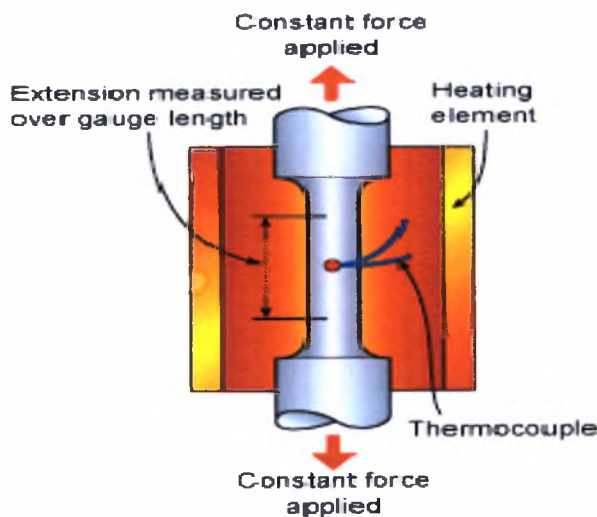
Τα πειράματα ερπυσμού μπορούν να καταταγούν σε δυο κατηγορίες.

Τα γνησία πειράματα ερπυσμού τα οποία διαρκούν από 2000h ως 10000h και γίνονται σε χαμηλά φορτία, ώστε να αποφευχθεί η έναρξη του τριτογενούς σταδίου που μπορεί να οδηγήσει στη θραύση. Στα πειράματα αυτά επιδιώκεται να προσδιορισθεί με ακρίβεια η ταχύτητα ερπυσμού για συγκεκριμένη θερμοκρασία και τάση. Η ολική παραμόρφωση δεν υπερβαίνει συνήθως το 2%, και για το λόγο αυτό απαιτούνται μετρητικές διατάξεις μεγάλης ακρίβειας (επιμηκυνσιόμετρα).

Συνηθέστερα είναι τα πειράματα καταπόνησης μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου, όπου η δοκιμή οδηγείται με μεγαλύτερες των πραγματικών ταχύτητες παραμόρφωσης μέχρι τη θραύση, με τη βοήθεια μεγαλύτερων φορτιών. Η δοκιμή διαρκεί από 100 ως 1000 ώρες και οι συνολικές παραμορφώσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες, ως 50%. Η χρήση της μεθόδου αυτής επεκτείνεται διαρκώς, ενώ η αξιοπιστία της μεθόδου δεν είναι απόλυτη στη περίπτωση που χρειάζεται να επεκταθούν τα αποτελέσματα σε μεγάλους χρόνους με μικρότερα φορτία και με μεταβολή της θερμοκρασίας. Ο κίνδυνος προκύπτει κυρίως από την πιθανότητα που υπάρχει, ο κυρίαρχος μηχανισμός του ερπυσμού να έχει αλλάξει. [4]

Είναι πάντως φανερό ότι η χρησιμοποίηση αυτής της τεχνικής είναι αναπόφευκτη, δεδομένου ότι η με ραγδαίο ρυθμό αναπτυσσομένη τεχνολογία δεν επιτρέπει να αναμένουμε έως και μερικά χρόνια για την παρατήρηση και αξιολόγηση ενός νέου υλικού.

Σε ένα τυπικό πείραμα ερπυσμού, ένα δοκίμιο ανάλογο με το δοκίμιο του κλασικού εφελκυσμού, υποβάλλεται σε εφελκυσμό (ή θλίψη) υπό σταθερό φορτίο. Το δοκίμιο περιβάλλεται από ένα θερμοστατικά ελεγχόμενο φούρνο, η θερμοκρασία του οποίου ελέγχεται από έναν θερμοστάτη. Η μεταβολή του μήκους του δοκιμίου μετριέται από ένα πολύ ευαίσθητο επιμηκυνσιόμετρο δεδομένου ότι η πραγματική παραμόρφωση πριν από την αστοχία μπορεί να είναι έως 2%.



Σχ.1.5 Αναπαράσταση δοκιμής ερπυσμού

Στη διάρκεια του πειράματος καταγράφεται η επιμήκυνση συναρτήσει του χρόνου, ενδεχομένως μέχρι την τελική θραύση. Η δοκιμή μπορεί να διαρκέσει πολλές ημέρες, μήνες ή ακόμη και μερικά χρόνια.

Τόσο η δοκιμή όσο και ο σχεδιασμός των δοκιμίων που χρησιμοποιούνται για το πείραμα γίνονται σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN EN 150 204 (*Metallic Materials-Uniaxial Creep Testing in Tension-Method of Test, 2005*) έτσι ώστε να μπορούν να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων. Ειδικότερα η ευθύτητα του δοκιμίου πρέπει να ελέγχεται και να βρίσκεται μέσα στο  $\frac{1}{2}\%$  περίπου της διαμέτρου. Ένα δοκίμιο με ελαφρώς μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής διαμέτρου θα εισάγει καμπτικές τάσεις οι οποίες θα έχουν σοβαρές επιπτώσεις. Η επιφάνεια του δοκιμίου είναι επίσης σημαντική. Δηλαδή το δείγμα πρέπει να είναι ομαλό, λείο και χωρίς εκδορές και το επιμηκυνσιόμετρο πρέπει να είναι προσαρμοσμένο πάνω στο δοκίμιο και όχι σε κάποιο άλλο μέρος της μηχανής ερπυσμού έτσι ώστε η μέτρηση μεταβολής του μήκους του δοκιμίου να είναι η πραγματική.

Η δοκιμή πραγματοποιείται γενικά στον αέρα, στην ατμοσφαιρική πίεση. Εντούτοις, εάν είναι απαραίτητο να παραχθούν δεδομένα ερπυσμού για υλικά τα οποία αντιδρούν με τον αέρα, τότε τα πειράματα γίνονται σε ειδικούς θαλάμους παρουσία αδρανούς ατμόσφαιρας ή κενού. Ένα χαρακτηριστικό δοκίμιο υπό θραύση φαίνεται στο Σχ. 1.6 :

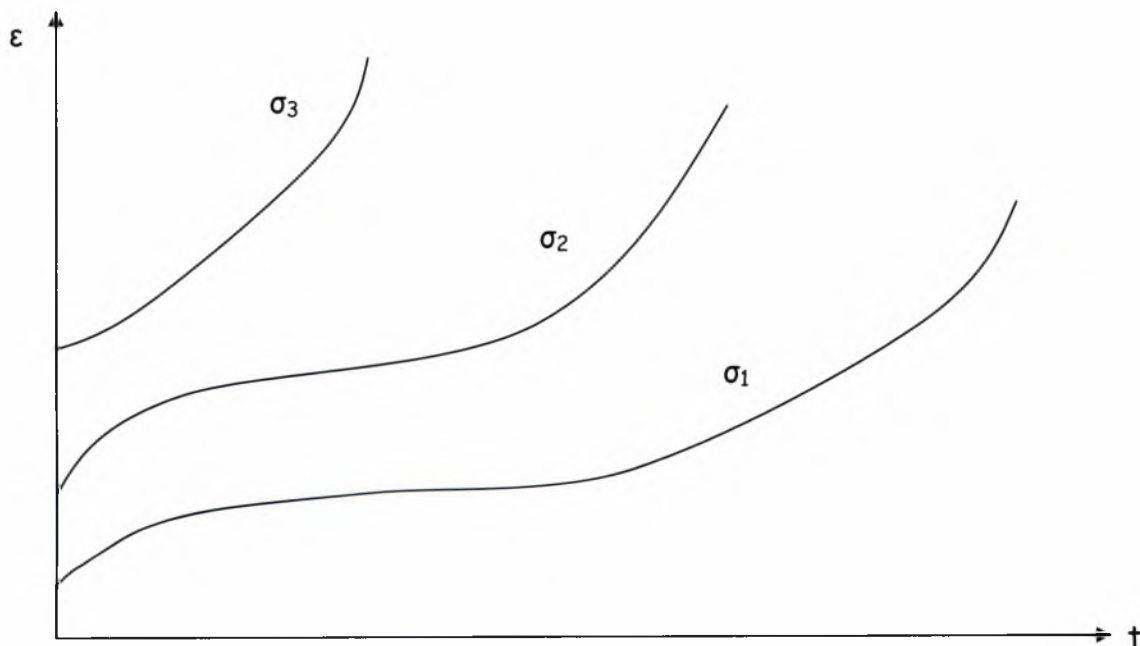


Σχ 1.6 Χαρακτηριστικό δείγμα θραύσης δοκιμίου υπό το φαινόμενο του ερπυσμού.



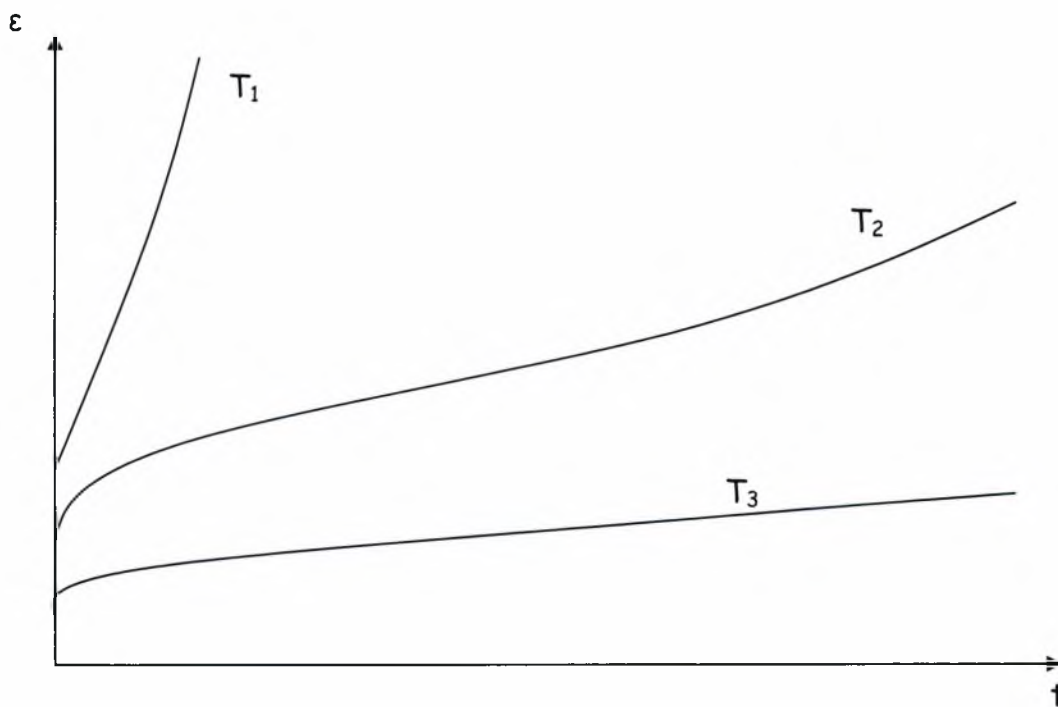
Οι δοκιμές που γίνονται υπό σταθερό φορτίο, δηλαδή σταθερή εφελκυστική δύναμη, δεν πρέπει να θεωρούνται ότι είναι υπό σταθερή τάση, διότι κατά την επιμήκυνση μειώνεται η διατομή του δοκιμίου, ώστε ενώ το φορτίο παραμένει σταθερό, η τάση να αυξάνεται συνεχώς. Θα ήταν προτιμότερο να γίνονται οι δοκιμές υπό σταθερή τάση και όχι υπό σταθερό φορτίο, αλλά αυτό απαιτεί δύσκολες και πολύ ακριβές πειραματικές διατάξεις και γι' αυτό δεν συνηθίζεται.

Οι τρεις καμπύλες του Σχ. 1.7 περιγράφουν ένα τυπικό παράδειγμα δοκιμών ερπυσμού για την περίπτωση του μολυβδού. Οι δοκιμές γίνονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπου ο μολυβδος έρπει και χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές ονομαστικές τάσεις  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  με  $\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$ . Παρατηρείται ότι η παραμόρφωση που οφείλεται στον ερπυσμό προχωρεί πιο γρήγορα όσο αυξάνει το φορτίο.



Σχ1.7 Τυπική μορφή καμπύλων ερπυσμού σε διαφορετικές τάσεις για τον μολυβδο.

Ανάλογη μορφή καμπύλων λαμβάνεται εάν μεταβάλλεται η θερμοκρασία ως παράμετρος. Το Σχ.1.8 δείχνει τις καμπύλες εξέλιξης της παραμόρφωσης του ερπυσμού συναρτήσει του χρόνου  $t$ , με μεταβλητή παράμετρο τη θερμοκρασία για το αλουμίνιο. [1]



Σχ1.8 Τυπική μορφή καμπύλων ερπυσμού για διαφορετικές θερμοκρασίες  $T_1$ ,  $T_2, T_3$  με  $T_1 > T_2 > T_3$  για τον μόλυβδο.

Παρατηρείται και εδώ ότι η παραμόρφωση που ερπυσμού προχωρεί ταχύτερα όσο η θερμοκρασία είναι αυξάνεται. Επομένως η θερμοκρασία και η ένταση καταπόνησης έχουν ισχυρή και ανάλογη επίδραση στη μορφή καμπυλών. Αύξηση αυτών έχει σαν συνέπεια εντονότερη ερπυστική παραμόρφωση.

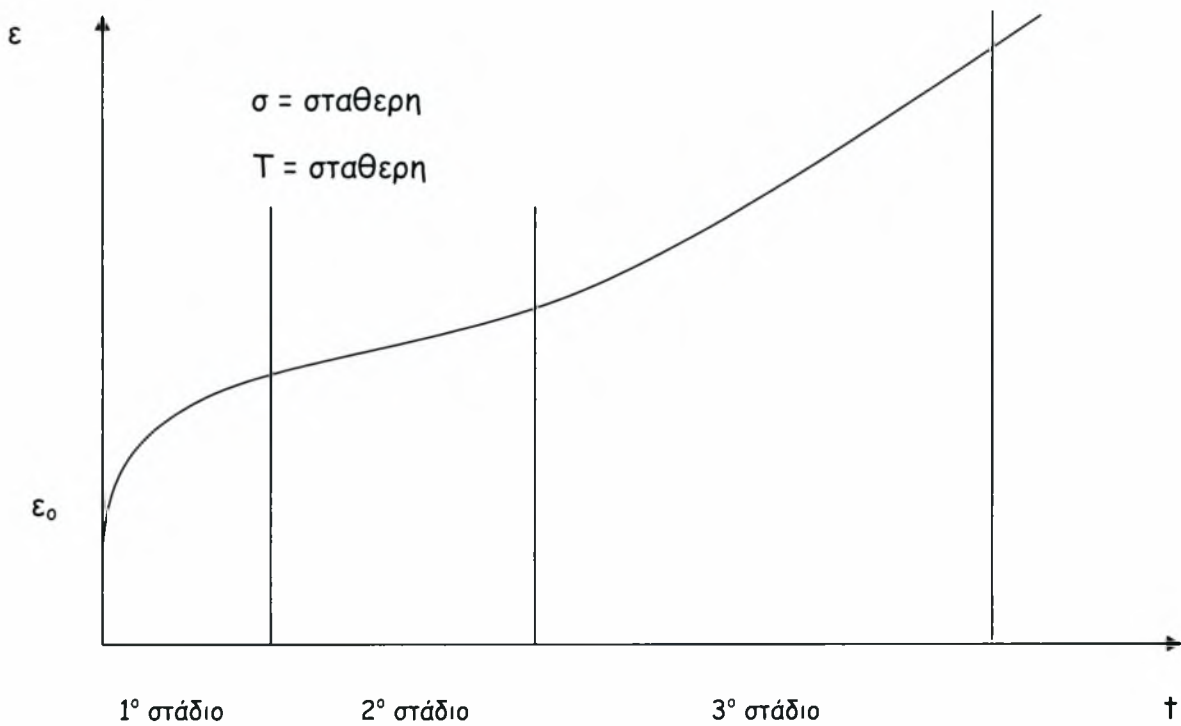
#### 1.4 Τυπική συμπεριφορά υλικού στον ερπυσμό.

Η τυπική συμπεριφορά ενός υλικού στον ερπυσμό αποδίδεται από την καμπύλη του Σχ.1.9 σ' ένα διάγραμμα παραμόρφωσης  $\epsilon$  - χρόνου  $t$ . Στον άξονα των παραμορφώσεων παρατηρείται αρχικά η ελαστική παραμόρφωση του υλικού  $\epsilon_0$ , η οποία επέρχεται στιγμιαία μόλις επιβληθεί το σταθερό φορτίο. Για την ακρίβεια μέρος της παραμόρφωσης αυτής μπορεί να είναι και ανελαστική και να χρειάζεται κάποιο χρόνο για να μηδενισθεί όταν αρθεί το φορτίο, όμως μπορεί κατά προσέγγιση να την θεωρηθεί ως ελαστική και να αφαιρεθεί από τη συνολική παραμόρφωση του ερπυσμού.

Στη συνέχεια η παραμόρφωση προχωρεί με ταχύ αλλά συνεχώς ελαττούμενο ρυθμό, μέχρι τη σταθεροποίηση της ταχύτητας παραμόρφωσης έ μια έως δυο τάξεις μεγέθους κάτω από την αρχική. Στο στάδιο αυτό η αντοχή ερπυσμού του δοκιμίου αυξάνεται. Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται ως στάδιο I του ερπυσμού και ονομάζεται πρωτογενής ή μεταβατικός ερπυσμός (πρώτο στάδιο).

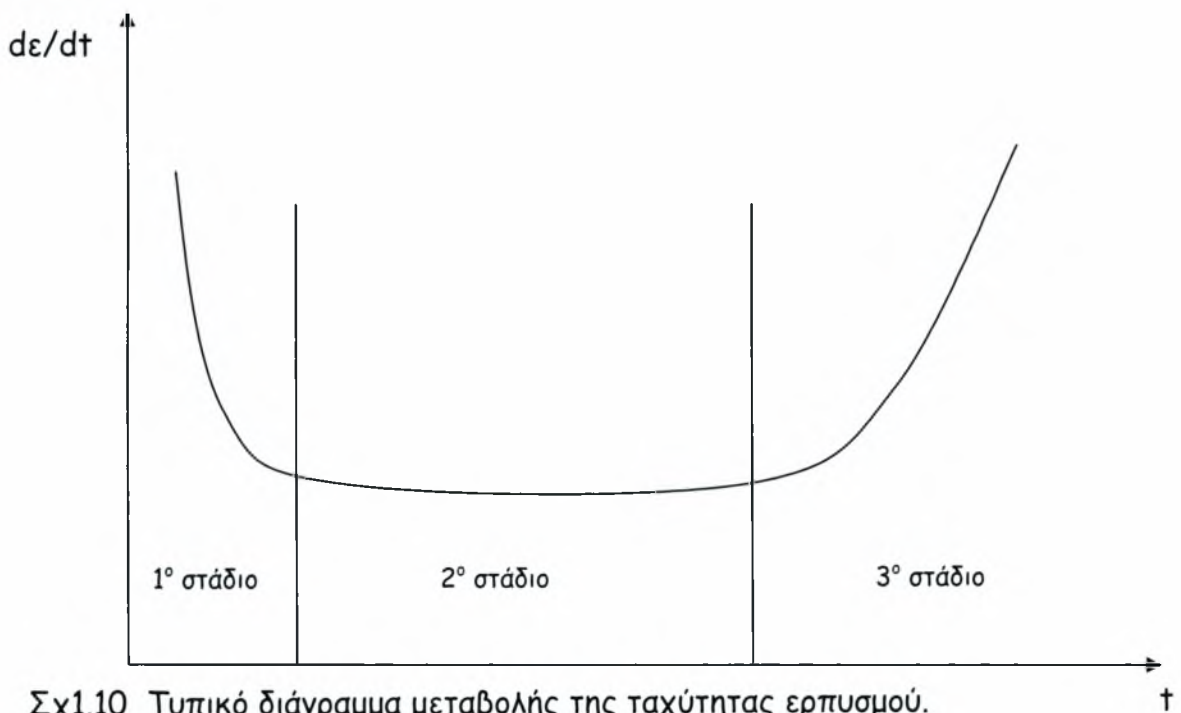
Κατόπιν ο ερπυσμός εξακολουθεί με σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το στάδιο αυτό, στάδιο II του ερπυσμού, παρουσιάζει το μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον και χαρακτηρίζεται ως ερπυσμός στάθερης κατάστασης ή δευτερογενής ερπυσμός (δεύτερο στάδιο).

Το τελευταίο, ισχυρά ανοδικό τμήμα της καμπύλης είναι το στάδιο III του ερπυσμού και αποδίδει το τελικό στάδιο καταστροφής του υλικού με έντονη παραμόρφωση και την συνακόλουθη ενδεχόμενη θραύση. Χαρακτηρίζεται ως τριτογενής ή επιταχυνόμενος ερπυσμός. Επέρχεται όταν η διατομή του δοκιμίου έχει ελαττωθεί σημαντικά λόγω σχηματισμού λαιμού. [5]



Σχ1.9 Τυπικό διάγραμμα ερπυσμού.

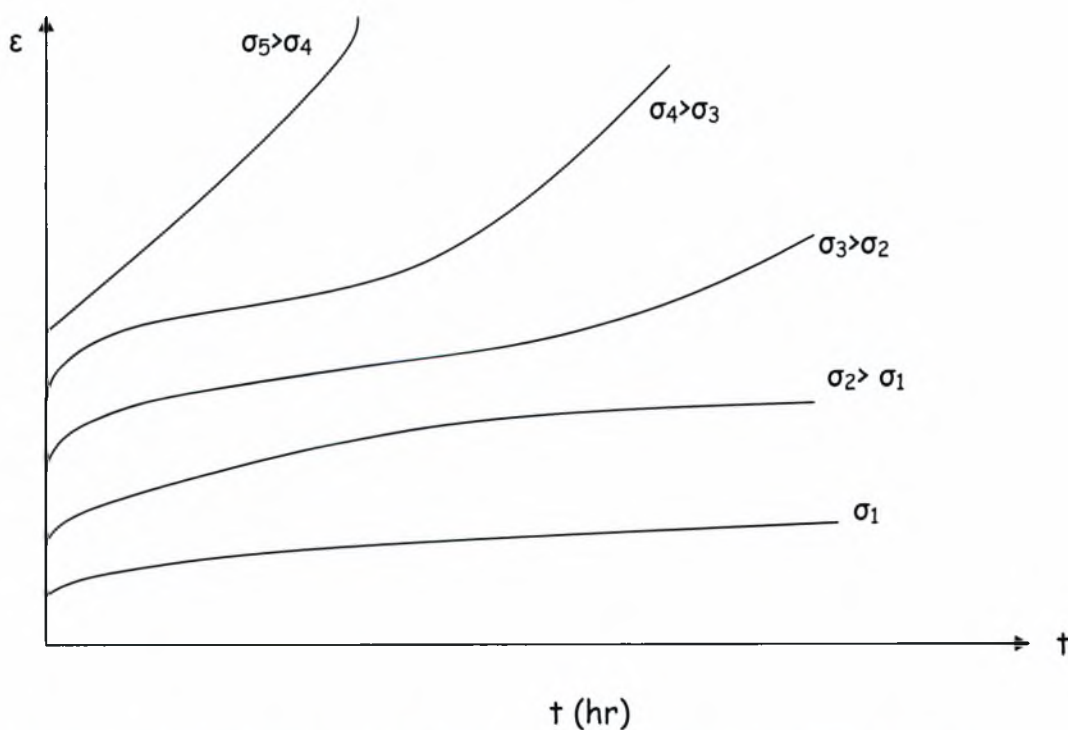
Η διαδοχή των προαναφερθέντων σταδίων ερπυσμού γίνεται άμεσα αντιληπτή και από την μεταβολή της ταχύτητας του ερπυσμού στη διάρκεια μιας δοκιμής.



Σχ1.10 Τυπικό διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας ερπυσμού.

Στο Σχ1.10 απεικονίζεται καθαρά η μεταβολή της ταχύτητας ερπυσμού συναρτήσει του χρόνου και φαίνεται καθαρά η φθίνουσα ταχύτητα του πρώτου σταδίου, η σταθερή ταχύτητα του δεύτερου σταδίου, και η αύξουσα ταχύτητα του τρίτου σταδίου του ερπυσμού.

Η σχηματική αναπαράσταση της παραμετρικής επίδρασης της τάσης στην μορφή των καμπύλων υπό σταθερή θερμοκρασία δίδεται στο Σχ.1.11. Στην ακραία περίπτωση των πολύ μικρών τάσεων η παραμόρφωση τείνει ασυμπτωτικά σε μια οριακή τιμή, ο ερπυσμός δηλαδή σταματά μετά το μεταβατικό στάδιο. Στην άλλη ακραία περίπτωση των πολύ μεγάλων τάσεων ο ερπυσμός παρακάμπτει το στάδιο της στάσιμης κατάστασης και περνάει κατ' ευθείαν στο τελευταίο τρίτο στάδιο του επιταχυνόμενου ερπυσμού. Πέραν αυτών των ακραίων καταστάσεων ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη πράξη παρουσιάζει ο ερπυσμός για ενδιάμεσες τιμές καταπονήσεων οπότε παρατηρούνται και τα τρία στάδια που αναφέρθηκαν προηγουμένως και έχουμε την τυπική συμπεριφορά του ερπυσμού. [1]



Σχ1.11 Χαρακτηριστικές καμπύλες ερπυσμού για διαφορετικές τάσεις.

Για τη σχεδίαση των εγκαταστάσεων που θα λειτουργήσουν σε συνθήκες όπου εμφανίζεται το φαινόμενο του ερπυσμού είναι υποχρεωτικό να προβλεφθεί η συμπεριφορά του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί σε μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες και φορτίσεις. Μια τέτοια πρόβλεψη προϋποθέτει τη γνώση μεγάλου αριθμού δεδομένων και απαιτεί την διεξαγωγή πολυάριθμων δοκιμών και μακροχρονίων πειραμάτων. Διευκολύνεται όμως όταν είναι γνωστοί οι νόμοι που συνδέουν

- α) τις ταχύτητες παραμόρφωσης με την τάση υπό σταθερή θερμοκρασία.
- β) τις ταχύτητες παραμόρφωσης με τη θερμοκρασία υπό σταθερή τάση.

Η ανάγκη λοιπόν για μοντελοποίηση της ερπυστικής συμπεριφοράς ενός υλικού ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά του, κάτω από διαφορετικές συνθήκες καταπόνησης είναι επιτακτική.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Γενικά

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρατεθούν οι πρόσφατες εξελίξεις πάνω στην μοντελοποίηση του φαινομένου του ερπυσμού. Ο σχεδιασμός των υλικών εφαρμοσμένης μηχανικής περιλαμβάνει γενικά την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων, συχνά κάτω από περιστάσεις όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων δεν είναι καθορισμένες. Στόχος της μοντελοποίησης είναι να επιταχυνθεί η διαδικασία σχεδιασμού και να ελαχιστοποιηθεί η χρησιμοποίηση μεγάλου αριθμού πειραματικών δεδομένων.

Είναι απόλυτα θεμιτό και ζητούμενο η γλώσσα των μαθηματικών να είναι σε θέση να εκφράσει την επιστήμη και να οδηγεί στις επαληθεύσιμες προβλέψεις. Η προσπάθεια θα αρχίσει με τον διαχωρισμό της μοντελοποίησης από την συνηθισμένη επιστημονική πρακτική.

### 2.2 Προσέγγιση-Εκτίμηση του φαινομένου του ερπυσμού.

Προσεγγίζοντας επιστημονικά ένα πρόβλημα ο στόχος είναι να «περιορισθεί» αυτό έτσι ώστε να μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας κανόνες και νόμους αποσαφηνισμένους στο σύγχρονο γνωστικό πεδίο. Στον ερπυσμό το πρόβλημα κατά κύριο λόγο επικεντρώνεται στο δεύτερο στάδιο που είναι το κυρίαρχο του φαινομένου. Ο ρυθμός παραμόρφωσης για μέταλλα δίνεται από μια συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης ( $\sigma$ ), της απόλυτης θερμοκρασίας ( $T$ ) και του μεγέθους κόκκου του υλικού ( $d$ )

$$\dot{\epsilon} = f \{ \sigma, T, d \} \quad (2.1)$$

ή ειδικότερα:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = a_1(DGb/kT)(b/d)^m(\sigma/G)^n \quad (2.2)$$

όπου  $\dot{\epsilon}_{ss}$  είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης του δευτέρου σταδίου,  $a_1$  είναι συνήθως μια εμπειρική σταθερά,  $D$  είναι ένας κατάλληλος συντελεστής διάχυσης,  $b$  είναι το μέτρο του διανύσματος και  $G$  είναι το μέτρο διάτμησης. Ο εκθέτης  $n$  της τάσης και ο εκθέτης  $m$  του μεγέθους του κόκκου εξαρτώνται από τους μηχανισμούς του ερπυσμού. Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί η ανάγκη χρησιμοποίησης μιας ενεργού τάσης ( $\sigma - \sigma_0$ ),

$$\dot{\epsilon}_{ss} = a_1(DGb/kT)(b/d)^m((\sigma - \sigma_0)/G)^n \quad , \quad (2.3)$$

διότι παρατηρήθηκε η εξαγωγή μεγάλων τιμών για τον εκθέτη  $n$  της τάσης. Αυτές οι δυναμικές προσεγγίσεις ποτέ δεν δώσανε επαρκή αποτελέσματα

### 2.2.1 Μοντελοποίηση

Η μοντελοποίηση μπορεί να ηγηθεί της δημιουργίας μιας νέας θεωρίας με στόχο την απλούστευση σε αυτό που λέμε σχεδιασμός μηχανικών κατασκευών. Μπορεί να οριστεί ως μια μέθοδος που μπορεί να ποσοτικοποιήσει το πρόβλημα δίνοντας μια ακριβή λύση χωρίς να θεωρηθεί ότι δίνει μια συμβιβαστική λύση υποβιβάζοντας την πολυπλοκότητα του αρχικού προβλήματος. Αρκεί βεβαίως να τηρηθούν κάποιοι περιορισμοί όπως:

- Ένα μοντέλο ανεξάρτητα από τη δομή του ή την εξάρτηση του σε εμπειρικές γνώσεις θα πρέπει να είναι ικανό να εξαγει εκτιμήσεις που να μπορούν να επαληθεύονται.
- Οποιοσδήποτε εκτιμήσεις θα πρέπει να σχετίζονται με ενδείξεις αβεβαιότητας. Το πρώτο είδος αβεβαιότητας καλείται «θόρυβος» και έχει να κάνει με το ότι ορισμένες μεταβλητές δεν κινούνται στα όρια που θα έπρεπε



για πειράματα που επαναλαμβάνονται. Το δεύτερο είδος αβεβαιότητας έχει να κάνει με τη δομή του ίδιου του μοντέλου.

- Η δομή του μοντέλου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ενσωματώνει και τη φυσική υπόσταση του προβλήματος.[6,7]

Κατά τη μοντελοποίηση μπορούν να συνδυαστούν με την ίδια βαρύτητα αρχές που διέπουν τους νόμους της επιστήμης με γνώσεις που αποκτήθηκαν μέσα από απλή εμπειρία με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος. Σε άλλο αυτό υπάρχει μια σειρά αβεβαιοτήτων. Τα αποτελέσματα δεν θα είναι τόσο διαυγή όσο αυτά της αμιγούς επιστήμης. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό για το μοντέλο να χρησιμοποιηθεί και να εκτεθεί σε όσο το δυνατόν περισσότερες και απρόβλεπτες καταστάσεις. Ο μόνος δρόμος για να επιτευχθεί αυτό είναι να γίνει το μοντέλο διαθέσιμο στην ευρύτερη επιστημονική κοινότητα.[8]

## **2.3 Προσεγγίσεις μοντελοποίησης**

Κατά καιρούς έχουν γίνει πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης. Και αυτό γιατί η ερπυστική συμπεριφορά του κάθε χάλυβα είναι μοναδική και είναι αρκετά δύσκολο να βρεθεί ένας κοινός τρόπος περιγραφής. Αυτό οφείλεται στο ότι η χημική του σύνθεση η παραγωγική του διαδικασία και η ποικίλη χρήση του επηρεάζουν σημαντικά την ερπυστική του συμπεριφορά.

### **2.3.1 Σύνθετα μοντέλα (Composite Models)**

Τα σύνθετα μοντέλα είναι μοντέλα που ως επί το πλείστον δεν εισάγουν παραμέτρους στο πρόβλημα με τον τρόπο που γίνεται σε κάποιες άλλες διαδικασίες μοντελοποίησης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η παρακάτω έρευνα. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί ένας χάλυβας 9-12% Cr χρησιμοποιήθηκε το σύνθετο μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον W.Blum εισάγοντας δεδομένα που προήλθαν από θερμοδυναμικούς υπολογισμούς βασισμένα στην προσέγγιση του Calphad (θερμοδυναμική συνάρτηση).[9]

Το σύνθετο αυτό μοντέλο (composite model) αποδίδει μια φυσική περιγραφή της συμπεριφοράς του ως προς την παραμόρφωση για υλικά τα οποία έχουν μια ευδιάκριτη ετερογενής αποδιοργάνωση της δομής τους. Κάποιες από τις παραμέτρους που εισήχθησαν μετρήθηκαν θερμοδυναμικά μέσω μιας διάταξης H/Y (Matlab-Thermo-Calc interface) και στη συνέχεια εισήχθησαν στο κυρίως πρόγραμμα.[10] Αυτή η συνδυασμένη προσέγγιση επιτρέπει την προσέγγιση του προβλήματος με λιγότερες διερευνήσεις που θα αφορούσαν την μικροδομή.

Το σύνθετο μοντέλο λαμβάνει υπόψη την επιρροή της αλλαγής της δομής των μορίων λόγω κίνησης με συνέπεια την παραμόρφωση που συμβαίνει στα κρυσταλλικά υλικά.

Το μοντέλο κάνει ένα διαχωρισμό των εσωτερικών στοιχειωδών στοιχείων με των περιμετρικών του υλικού και αναφέρει ως «μαλακές» και «σκληρές» αντίστοιχα τις περιοχές αυτές από πλευράς πλαστικής παραμόρφωσης. Ωστόσο δέχεται για λόγους εναρμόνισης ίση παραμόρφωση και στις δύο περιοχές. Έτσι έχουμε τα εξής:

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{s,pl} + \sigma_s / E \quad , \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{h,pl} + \sigma_h / E \quad , \quad (2.5)$$

Ο δεύτερος όρος και στις δύο εξισώσεις παριστάνει την ελαστική παραμόρφωση. Παίρνοντας τη διαφορά των δυο εξισώσεων προκύπτει:

$$E(\varepsilon_{s,pl} - \varepsilon_{h,pl}) = \sigma_h - \sigma_s \quad , \quad (2.6)$$

Η μέση τάση μπορεί να εκφραστεί ως ένα άθροισμα βαρύτητας των αντίστοιχων τάσεων:

$$\sigma = (1 - f_h)\sigma_s + f_h\sigma_h \quad , \quad (2.7)$$

όπου  $f_h$  ο συντελεστής βαρύτητας της «σκληρής» περιοχής δηλαδή του συνόρου και  $(1-f_h)$  ο συντελεστής βαρύτητας των εσωτερικών «περιοχών». Τότε προκύπτει ότι η πλαστική παραμόρφωση είναι ίση με:

$$\epsilon_{tot,pl} = (1 - f_h)\epsilon_{s,pl} + f_h\epsilon_{h,pl} \quad , \quad (2.8)$$

Όμοια ο ρυθμός παραμόρφωσης ισούται με

$$\dot{\epsilon}_{tot,pl} = (1 - f_h)\dot{\epsilon}_{s,pl} + f_h\dot{\epsilon}_{h,pl} + f_h(\epsilon_{h,pl} - \epsilon_{s,pl}) \quad , \quad (2.9)$$

Τα μέλη αυτής της εξίσωσης είναι είναι συναρτήσεις με παραμέτρους μικροδομής οι οποίοι με τη σειρά τους είναι συναρτήσεις παραμόρφωσης και θερμοκρασίας

$$df_h/d\epsilon_{tot,pl} = 2\{(da/d\epsilon_{tot,pl})w - a(dw/d\epsilon_{tot,pl})\}/w^2 \quad , \quad (2.10)$$

Οι σχέσεις κίνησης μπορούν να διατυπωθούν για τους τοπικούς πλαστικούς ρυθμούς παραμόρφωσης για τις σκληρές και μαλακές περιοχές αντίστοιχα. Αυτές είναι συναρτήσεις των τοπικών τάσεων και της μικροδομής π.χ.

$$\dot{\epsilon}_s(\sigma_s, X) \text{ και } \dot{\epsilon}_h(\sigma_h, X)$$

$$k = 8\sigma V_m^a / \{9 \sum_{i=1}^c (x_i^a - x_i^{\beta/a})^2 / [(x_i^{\beta/a} D_i^\beta) / RT]\}.$$

όπου  $X$  αντιπροσωπεύει τις διάφορες παραμέτρους μικροδομής.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί η ολική πλαστική παραμόρφωση όπως επίσης και η πλαστική παραμόρφωση μεταξύ κάθε περιοχής. [11,12,13,]

### **2.3.2 Μοντέλα μικροδομής (Microstructure Models)**

Ο Yin και ο Faulkner χρησιμοποίησαν κλασική πυρηνική θεωρία προκειμένου να προσομοιώσουν την αποδιοργάνωση των μορίων ασύλληπτης μικρότητας  $M_{23}C_6$  του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας[14]. Οι παράμετροι που προσεγγίζονται στο μοντέλο τους περιλαμβάνουν την πυκνότητα των επί μέρους εμπύρηνων περιοχών που παρουσιάζονται εξετάζοντας μικροσκοπικά και την εσωτερική καρβιδική-φερριτική ενέργεια ανά μονάδα περιοχής. Η θεωρία επίσης ενσωματώνει τις επόμενες προσεγγίσεις, ότι η διάχυση μεταξύ των συστατικών στοιχείων μπορεί να παραμεληθεί, ότι τα τριχοειδή φαινόμενα μπορούν να υπολογιστούν χωρίς τη επιρροή των συστατικών στοιχείων κ.τλ. Στα πλαίσια αυτά, εξετάζοντας την εκτράχυνση του υλικού, κινήθηκαν και ο Venugopalan με τον Kirkaldy.[15]

Τέλος ο Abe εξέθεσε ενδιαφέροντα στοιχεία για την εκτράχυνση των μικροσκοπικών μορίων  $M_{23}C_6$  ενός Fe-9Cr-W χάλυβα σαν συνάρτηση του περιεχόμενου βολφραμίου και του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός πειράματος ερπυσμού στους 600°C. Σύμφωνα με τον Abe η προσθήκη βολφραμίου ελαττώνει τον ρυθμό εκτράχυνσης[16].

### **2.3.3 Παραμετρικά μοντέλα**

Η αντίσταση του υλικού στον ερπυσμό είναι αρκετά πολύπλοκη έτσι ώστε δεν θα μπορούσε επαρκώς να προσδιορισθεί χρησιμοποιώντας τους μηχανισμούς που περιγράφηκαν πιο πάνω. Εν τούτοις είναι σημαντικό να γνωρίζει κανείς τη μακροπρόθεσμη ερπυστική συμπεριφορά τέτοιων υλικών για την ασφαλή τους χρήση σε εφαρμογές, που αυτό είναι άκρως απαραίτητο, όπως εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας και αεροκινητήρες. Για το λόγο αυτό ένας μεγάλος αριθμός

εμπειρικών και ημιεμπειρικών μεθόδων που αναπτύχθηκαν κατά καιρούς επιτρέπει την ακριβή παρουσίαση των πειραματικών δεδομένων και την ίδια στιγμή διευκολύνει το στόχο που δεν είναι άλλος από την εξαγωγή αποτελεσμάτων ικανών να δώσουν χρήσιμα συμπεράσματα συμπεριφοράς ερπυσμού.[17]

Ο ερπυστικός ρυθμός παραμόρφωσης είναι μια απευθείας μέτρηση της υπολειπόμενης ζωής έτσι ο ασφαλής υπολογισμός τέτοιων δεδομένων είναι ένας κύριος στόχος στο δρόμο μιας όσο το δυνατόν αξιόλογης και ακέρατης εξαγωγής στοιχείων.

Μια αρκετά δημοφιλής μέθοδος είναι αυτή που εμπεριέχει τις παραμέτρους  $\theta$  ως εξής:[18]

$$\varepsilon = \theta_1[1-\exp\{-\theta_2 t\}] + \theta_3[\exp\{\theta_4 t\}-1] \quad , \quad (2.11)$$

όπου  $\theta_i$  προσδιορίζονται ώστε να προσεγγίζουν τα πειραματικά δεδομένα,  $t$  είναι ο χρόνος. Οι πρώτες δύο από τις παραμέτρους αυτές περιγράφουν το πρώτο και δεύτερο στάδιο της αποδόμησης ενώ οι υπόλοιποι δύο την επιτάχυνση του φαινομένου(τρίτο στάδιο).

Το δεύτερο και κυρίαρχο στάδιο όπως επιτάσσει η θεωρία του ερπυσμού οδηγεί σε μια εξίσωση της μορφής:

$$\dot{\varepsilon} = a_3 \sigma^n \exp\{-Q/RT\} \quad , \quad (2.12)$$

όπου  $a_3$  είναι μια εμπειρική σταθερά. Αυτή η εξίσωση μπορεί να πάρει τη μορφή, προκειμένου να βρεθεί ο χρόνος θραύσης  $t_r$ , ως εξής:

$$\ln\{t_r\} = \ln\{\varepsilon_r/a_3\} - n \ln\{\sigma\} + Q/RT \quad , \quad (2.13)$$

Μια διαφορετική και με ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα όπως έχει βρεθεί είναι αυτή της μορφής:

$$\ln\{t_r\} = a_4 + a_5 + a_6 T \quad , \quad (2.14)$$

όπου  $a_i$  συντελεστές που προσεγγίζουν τα δεδομένα.[18,19,20].

Για την πρόβλεψη θραύσης λόγω ερπυσμού ενός 2.25Cr-1Mo μια εξίσωση που μπορεί να εξάγει ικανοποιητικά συμπεράσματα είναι η εξής:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + A\{1 - \exp(-a\tau)\} + B\{\exp(a\tau) - 1\} \quad , \quad (2.15)$$

όπου  $\varepsilon_0, A, B$  παράμετροι που προσδιορίζονται ώστε η καμπύλη που προκύπτει να ταυτίζεται με αυτή που προκύπτει από πειραματικά δεδομένα. Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με αυτή των  $\theta$ -παραμέτρων.[21]

Ο Maruyama κατέληξε ότι ο χρόνος θραύσης μπορεί να συσχετιστεί γραμμικά με την ακόλουθη παράμετρο θραύσης  $P$  που προκύπτει από την εξίσωση ερπυσμού:

$$P = (1/a) \ln\{(\varepsilon_r - \varepsilon_0 - A)/B\} \quad , \quad (2.16)$$

όπου  $\varepsilon_r$  είναι η παραμόρφωση θραύσης.

Η πρόβλεψη του χρόνου ζωής μπορεί να γίνει με τη συμβολή της παραμέτρου  $P$  [22,23].

### 2.3.4 Μοντέλα δικτύου (Neural Network Models)

Τα μοντέλα αυτά είναι μια γενική στατιστική μέθοδος της απόκλισης μιας εξαρτημένης στατιστικής μεταβλητής. Τα μοντέλα αυτά κατά κύριο λόγο βασίζονται σε συμπεράσματα που προέκυψαν με στατιστικές μεθόδους χρησιμοποιώντας προγενέστερες συνήθως εμπειρικές αναλύσεις. Με τη μέθοδο αυτή μια ευπροσάρμοστη μη γραμμική συνάρτηση προσαρμόζεται στα πειραματικά δεδομένα. Λεπτομερείς αναφορές τέτοιων μοντέλων έχουν γίνει αρκετές[24,25,26]. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να ξεπεράσει δυσκολίες που σχετίζονται με γενικές γραμμικές αποκλίσεις της εξαρτημένης μεταβλητής περιπτώσεις κατά τις οποίες μια ακριβής σχέση εξάρτησης πρέπει να διαλεχτεί προτού αρχίσει η ανάλυση. [27].

Μιλώντας γενικά ένα τέτοιο μοντέλο δημιουργείται προσδιορίζοντας μια ομάδα παραμέτρων γνωστούς ως «συντελεστές βάρους» οι οποίοι συνθέτουν ένα

μοντέλο το οποίο προσδιορίζει τη διαδρομή από τα εισαχθείσα στα εξαχθείσα στοιχεία[28]. Οι παράμετροι αυτοί προσδιορίζονται παίρνοντας ζευγάρια εισαγόμενων και εξαγόμενων δεδομένων με στόχο τη προσεκτική δημιουργία μιας συνάρτησης λάθους [29]. Μια πιθανή δυσκολία που παρουσιάζεται χρησιμοποιώντας τη μη γραμμική απόκλιση είναι η πιθανότητα να συγκλίνουν περισσότερα από τα δεδομένα που θα έπρεπε. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Bayesian στον έλεγχο της πολυπλοκότητας του μοντέλου μπορεί να λυθεί το πρόβλημα αυτό. Ωστόσο οι «συντελεστές βάρους» δεν είναι πάντα εύκολο να προσδιορισθούν. Μια καλύτερη μέθοδος είναι να χρησιμοποιείται το «δίκτυο» ώστε να γίνονται προβλέψεις και στη συνέχεια να εφαρμόζονται οι προβλέψεις αυτές επάνω σε διάφορα πειραματικά δεδομένα.[30] Η ευαισθησία της μη γραμμικής συνάρτησης σχετίζεται με τον αριθμό των κρυμμένων κόμβων  $i$ .

Η τελική εξαγόμενη μεταβλητή  $y$  (εξαρτημένη μεταβλητή) καθορίζεται ως εξής:

$$y = \sum_i w_i^{(2)} h_i + \theta^{(2)} \quad , \quad (2.17)$$

Όπου: 
$$h_i = \tanh\left(\sum_j w_{ij}^{(1)} x_j + \theta_i^{(1)}\right) \quad , \quad (2.18)$$

ενώ  $x_j$  είναι μεταβλητές από τις οποίες η  $y$  εξαρτάται,  $w_i$  συντελεστές βάρους,  $\theta_i$  σφάλματα. Η συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης χρησιμοποιείται διότι μια τέτοια συνάρτηση είναι μη γραμμική και ευέλικτη. Συνδιάζοντας ορισμένες υπερβολικές εφαπτόμενες μαζί δίνεται μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στο μοντέλο κάνοντας το έτσι πιο πολύπλοκο. Με δεδομένες τις συναρτήσεις και τα «βάρη» τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή των εισαχθέντων μεταβλητών προσδιορίζεται το δίκτυο επακριβώς.

Όταν το μοντέλο εφαρμόζεται σε εμπειρικά δεδομένα οι παράμετροι προσδιορίζονται έτσι ώστε να δημιουργούν μια μη γραμμική συνάρτηση που επαληθεύει τα δεδομένα αυτά. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα

σύνολο συντελεστών και ο προσδιορισμός των συναρτήσεων οι οποίες περιλαμβάνουν τα «βάρη».

Στην πλειοψηφία τους σε αυτή την κατηγορία μοντέλων ερπυσμού, μπορούν να γίνουν προβλέψεις της ερπυστικής παραμόρφωσης σε συνάρτηση με μεταβλητές που εισάγονται όπως χρόνος, θερμοκρασία ή τάση. Τα διαγράμματα ασφαμάτων των προβλέψεων ποσοτικοποιούν την βεβαιότητα των προβλέψεων τους.

Σημαντική διαφορά ενός μοντέλου αυτής της κατηγορίας έναντι των παραμετρικών μοντέλων είναι το γεγονός του ότι οι συντελεστές δεν έχουν καμία φυσική σημασία.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Γενικές παρατηρήσεις για την τεχνική προσέγγισης Θ.

Με βάση τις παραπάνω προσεγγίσεις που έχουν γίνει για την εξήγηση και την ερμηνεία του φαινομένου του ερπυσμού γίνεται αντιληπτό ότι η αντίσταση των υλικών στον ερπυσμό και κατ' επέκταση η εξέλιξη του φαινομένου στο χρόνο είναι μια πολύπλοκη και σύνθετη διαδικασία και ως εκ τούτου ο σχεδιασμός του υλικού που θα ανταποκρίνεται στις ειδικές συνθήκες κάθε φορά, του περιβάλλοντος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, δεν είναι εύκολη υπόθεση. Έτσι λοιπόν είναι σημαντικό να είναι γνωστή μακροπρόθεσμα η συμπεριφορά του υλικού μέχρι την ενδεχόμενη θραύση του.[5]

Σήμερα υπάρχει ένα ευρύ φάσμα υλικών διαθέσιμων για ένα σχεδιαστή κατασκευών, έτσι ώστε αυτός να μπορεί να επιλέξει λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες ιδιότητες, το κατάλληλο υλικό. Σε πολλές από τις εφαρμογές των υλικών, αυτά αναμένονται να εμφανίσουν προβληματική συμπεριφορά και μάλιστα περισσότερο σε βάθος χρόνου και λιγότερο βραχυπρόθεσμα. Οι απροσδόκητες αποτυχίες των υλικών μπορούν να αποδειχθούν καταστροφικές και εξαιρετικά αντιοικονομικές. Από αυτό γίνεται κατανοητό ότι υπάρχει μεγάλη ανάγκη να είναι σε θέση, η προσπάθεια ερμηνείας, εξήγησης και κατηγοριοποίησης των πειραματικών δεδομένων να συνδέεται με την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του υλικού κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Μόνο έχοντας αυτήν ως φιλοσοφία σχεδιασμού, οι αποτυχίες μπορούν να ελαχιστοποιηθούν.[31] Για αυτό το λόγο έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός εμπειρικών ή ημι-εμπειρικών μεθόδων, οι οποίες με αρκετά μεγάλη επιτυχία, επιτρέπουν την σύνδεση των πειραματικών δεδομένων και διευκολύνουν συγχρόνως την επέκταση των βραχυπρόθεσμων στοιχείων ερπυσμού.[18]

Συχνά οι μηχανισμοί της αποτυχίας, όπως είναι η θραύση λόγω ερπυσμού, των μετάλλων, εμφανίζουν μια συγκεκριμένη πορεία μέσα στο χρόνο. Δηλαδή υπάρχει ένα χρονικό διάστημα, από την στιγμή εμφάνισης του φαινομένου, όπου παρατηρείται μια επιβράδυνση όσον αφορά την εξέλιξη του ενώ στη συνέχεια η ταχύτητα του φαινομένου διατηρείται σταθερή μέχρι ενός χρονικού σημείου, όπου από εκεί και πέρα το φαινόμενο επιταχύνεται.

Η τεχνική προσέγγισης  $\theta$  για την οποία θα γίνει εκτενής αναφορά σε αυτό το κεφάλαιο, ανήκει γενικότερα στη κατηγορία των παραμετρικών μοντέλων προσέγγισης του φαινομένου του ερπυσμού.[5,18]. Επιτρέπει από ολόκληρη την καμπύλη ερπυσμού, δηλαδή και τα τρία στάδια (πρωτογενής δευτερογενής και τριτογενής ερπυσμός) να αξιοποιηθούν τα πειραματικά δεδομένα και χρησιμοποιηθούν ως οδηγός για την συμπεριφορά του υλικού για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Η τεχνική προσέγγισης  $\theta$  έχει τρία βασικά βήματα. Κατ' αρχάς, υπάρχει το πειραματικό στάδιο, όπου για κάθε μονοαξονικά εφαρμοζόμενη σταθερή τάση για συγκεκριμένη θερμοκρασία και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα εξάγεται η καμπύλη ερπυσμού από την οποία στη συνέχεια υπολογίζεται η μαθηματική σχέση που εκφράζει την καμπύλη αυτή. Ο υπολογισμός της μαθηματικής σχέσης έγκειται στον προσδιορισμό των λεγόμενων παραμέτρων  $\theta$  για κάθε ομάδα πειραματικών δεδομένων τάσης και θερμοκρασίας. Δεύτερον, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που υπολογίστηκαν στο πρώτο βήμα, η μορφή αυτών των καμπύλων ερπυσμού προβάλλεται σε άλλες τιμές τάσης και θερμοκρασίας, είτε μέσα, δηλαδή παρεμβολή, είτε έξω, δηλαδή παρέκταση, από την αρχική σειρά των πειραματικών δεδομένων. Τρίτον, υπολογίζονται κύρια μεγέθη που αφορούν το φαινόμενο του ερπυσμού και κατά συνέπεια τον σχεδιασμό του υλικού, όπως ο μέσος όρος του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης ή ο μέσος όρος του χρόνου θραύσης του υλικού, από τις προτεινόμενες μαθηματικές σχέσεις που έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παραπάνω τεχνική. Υπό αυτήν τη έννοια

λοιπόν η τεχνική προσέγγισης  $\theta$  μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές κατηγορίες υλικών τα οποία υπόκεινται είτε σε μηχανικές καταπονήσεις, είτε σε ιδιαίτερα επιβαρυνμένες περιβαλλοντικές επιδράσεις. [31]

### 3.2 Μαθηματική διατύπωση της τεχνικής $\theta$ .

Μια ενιαία καμπύλη ερπυσμού η οποία προκύπτει από σταθερή μονοαξονική τάση  $\sigma$  και θερμοκρασία  $T$  μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας μια γενική λειτουργική εξίσωση της μορφής:

$$\varepsilon_c = f(t, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_j), \quad (3.1)$$

όπου  $f$  είναι κάποια μη γραμμική συνάρτηση,  $\varepsilon_c$  είναι η συνολική ερπυστική παραμόρφωση του υλικού μέσα στο χρόνο  $t$  και  $\theta_j$  είναι αριθμητικές παράμετροι οι οποίοι καθορίζονται από τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη τεχνική εκτίμησης. Ποικίλες διαφορετικές εξισώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για να περιγράψουν τη μορφή της συνάρτησης στην εξίσωση (3.1). Μια πρώτη προσέγγιση που έγινε και η οποία ονομάζεται τεχνική 4- $\theta$ , περιγράφει το πρώτο και το τρίτο στάδιο του ερπυσμού, χρησιμοποιώντας 4 παραμέτρους, ως εξής:

$$\varepsilon_c = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3(e^{\theta_4 t} - 1), \quad (3.2)$$

όπου, η παράμετρος  $\theta_1$  ποσολογεί τη συνολική αρχική παραμόρφωση  $\varepsilon_c$ , η  $\theta_2$  δείχνει την κλίση-κυρτότητα της καμπύλης κατά τη διάρκεια του πρωτογενούς ερπυσμού. Αντίστοιχες είναι οι φυσικές ερμηνείες για τις παραμέτρους  $\theta_3$  και  $\theta_4$  με την διαφορά ότι αυτές αναφέρονται στο τρίτο στάδιο του ερπυσμού.

Η ακρίβεια και η αξιοπιστία της μεθόδου 4-θ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Για παράδειγμα ένας από αυτούς είναι η ικανότητα της εξίσωσης να συνδυάσει τη καμπύλη ερπυσμού με τα πειραματικά δεδομένα και τις συνθήκες του πειράματος. Είναι πιθανό η συσχέτιση των παραμέτρων  $\theta$  με την τάση και την θερμοκρασία να είναι μια πιο σύνθετη μη γραμμική σχέση. Επίσης είναι γνωστό ότι αν και η εξίσωση 3.2 είναι μια πολύ καλή αντιπροσώπευση των καμπύλων ερπυσμού για τα υλικά από μέτρια έως υψηλή ολκιμότητα, παρόλα αυτά η προσέγγιση που κάνει σε χαμηλές τάσεις δεν είναι και ιδιαίτερα σημαντική. Αυτό το συμπέρασμα οδηγεί αναπόφευκτα σε δυσκολίες όσον αφορά την πρόβλεψη και τον προσδιορισμό, ιδιοτήτων των υλικών, όπως για παράδειγμα ο χρόνος που απαιτείται για 0,5% παραμόρφωση του υλικού. Επειδή όμως αυτή η δυσκολία προσδιορισμού διαρκεί πολύ λίγο αναμένεται ότι αυτό δεν έχει και τόσο μεγάλη επίδραση για τον υπολογισμό κύριων μεγεθών του ερπυσμού όπως είναι ο ρυθμός μεταβολής ή ο χρόνος θραύσης του υλικού.[32]

Ο Μ. Evans, μεταγενέστερα, στη προσπάθεια του να αντιμετωπίσει τη παραπάνω δυσκολία στον προσδιορισμό ορισμένων μεγεθών του φαινομένου του ερπυσμού που παρατηρείται στις χαμηλές κυρίως τάσεις έχει προτείνει την τεχνική προσέγγισης 6-θ στην οποία χρησιμοποιεί 6 παραμέτρους. Η μαθηματική διατύπωση που προτείνει είναι η εξής:

$$\varepsilon_c = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 \dot{\varepsilon}}) + \theta_3(e^{\theta_4 \dot{\varepsilon}} - 1) + \theta_5(1 - e^{-\theta_6 \dot{\varepsilon}}) , \quad (3.3)$$

Παρατηρείται ότι η μόνη διαφορά με την εξίσωση 3.2 είναι ότι έχει εισάγει έναν επιπλέον όρο, τον  $\theta_5(1 - e^{-\theta_6 \dot{\varepsilon}})$ . Οι  $\theta_5$  και  $\theta_6$  λοιπόν είναι δύο πρόσθετες παράμετροι οι οποίες εισάγονται για να βελτιωθεί η προσέγγιση της καμπύλης ερπυσμού στα πειραματικά δεδομένα όσον αφορά το αρχικό στάδιο του φαινομένου για μικρές τιμές τάσεων.

Η δυσκολία αυτής της κατηγορίας των τεχνικών προσέγγισης του ερπυσμού έγκειται στο γεγονός ότι είναι γενικά δύσκολος ο αξιόπιστος προσδιορισμός των παραμέτρων. Όπως λοιπόν γίνεται εύκολα αντιληπτό, όσες περισσότερες παραμέτρους χρησιμοποιούνται στη προσπάθεια προσέγγισης του φαινομένου, τόσο περισσότερο περιπλοκή και δύσκολη γίνεται η εφαρμογή της μεθόδου αυτής. Για αυτό το λόγο λοιπόν οι προσπάθειες που γίνονται προς αυτή τη κατεύθυνση θα πρέπει να έχουν ως αντικειμενικό στόχο την χρησιμοποίηση τέτοιου αριθμού παραμέτρων έτσι ώστε η υψηλή προσέγγιση που θα πρέπει να επιτυγχάνεται μεταξύ της καμπύλης και των πειραματικών δεδομένων να μην μειώνεται από την περιπλοκότητα και την δυσκολία του προσδιορισμού των παραμέτρων.

Μια αρκετά δημοφιλής μορφή της συνάρτησης  $f$  η οποία αντιπροσωπεύει σε αρκετά μεγάλο βαθμό την πειραματική καμπύλη ερπυσμού [33] είναι:

$$\varepsilon_c(t) = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_5 t + (\theta_3/\theta_4)(e^{\theta_4 t} - 1) \quad , \quad (3.4)$$

$$\dot{\varepsilon}_c(t) = \theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 t} + \theta_5 + \theta_3 e^{\theta_4 t} \quad , \quad (3.5)$$

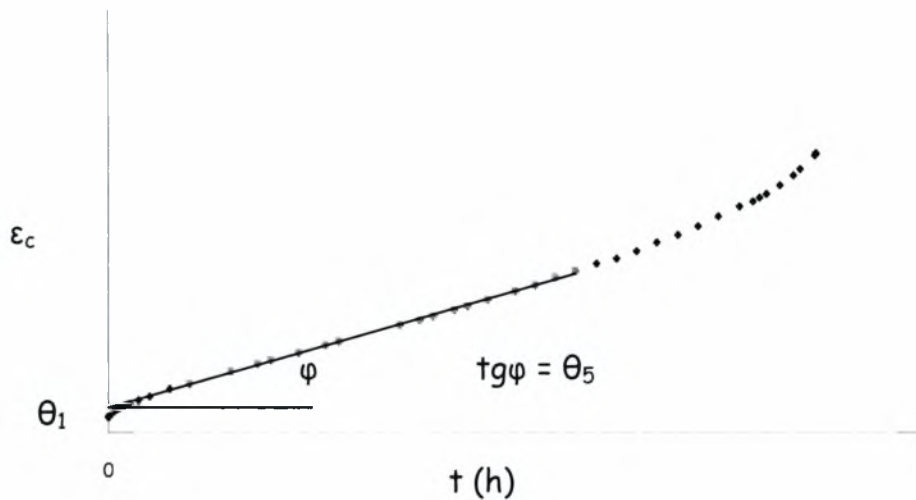
Οι παραπάνω εξισώσεις οι οποίες εισάγουν 5 παραμέτρους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν όλα τα στάδια και οποιαδήποτε διαδικασία συμβαίνει στα πλαίσια του φαινομένου του ερπυσμού όπως ο ρυθμός μεταβολής των ρωγμών ή ακόμη να υπολογίσει μεγέθη όπως τάση, μέγεθος ρωγμής, παραμόρφωση αλλά και να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την εξέλιξη αυτών των μεγεθών στη διάρκεια του χρόνου.

### 3.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων 5-θ.

Γενικά οι τρεις οροί των εξισώσεων 3.4 και 3.5 εκφράζουν τα τρία στάδια του φαινομένου του ερπυσμού με την σειρά που αυτά εμφανίζονται. Ειδικότερα οι παράμετροι  $\theta_1$  και  $\theta_2$  εκφράζουν την παραμόρφωση που συσσωρεύεται κατά το πρώτο στάδιο του ερπυσμού (πρωτογενής ερπυσμός), καθώς και την ταχύτητα με την οποία το υλικό τείνει προς το δεύτερο στάδιο αντίστοιχα. Το μέγεθος  $\theta_5$  είναι η παράμετρος που εκφράζει το ρυθμό παραμόρφωσης σταθερής κατάστασης του ερπυσμού (δευτερογενής ερπυσμός). Η παράμετρος  $\theta_3$  εκφράζει την ταχύτητα εκκίνησης της παραμόρφωσης του ερπυσμού, εάν το υλικό μετά την εφαρμογή του φορτίου έμπαινε κατευθείαν στο τρίτο στάδιο (τριτογενής ερπυσμός). Τέλος η παράμετρος  $\theta_4$  είναι ένα μέτρο για την αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης του ερπυσμού στο τρίτο στάδιο.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων 5-θ, που είναι απαραίτητες για την περιγραφή της συμπεριφοράς του φαινομένου του ερπυσμού, σύμφωνα με τις σχέσεις 3.4 και 3.5, προτείνεται η παρακάτω μεθοδολογία, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια υπολογιστικού προγράμματος EXCELL και χρήση Η/Υ και η οποία βασίζεται στη φυσική ερμηνεία της κάθε μιας από τις παραπάνω πέντε παραμέτρους.[33]

Η παράμετρος  $\theta_5$  προσδιορίζεται από το διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου και είναι η κλίση της ευθείας στην περιοχή του ερπυσμού σταθερής ταχύτητας (δευτερογενής ερπυσμός). Η τομή της ευθείας αυτής με τον άξονα των παραμορφώσεων για  $t = 0$  δίνει την αριθμητική τιμή της παραμέτρου  $\theta_1$  και είναι ίση με την παραμόρφωση που έχει το υλικό την στιγμή της έναρξης του φαινομένου (Σχ. 3.1).



Σχ. 3.1 Ποιοτική γραφική παράσταση προσδιορισμού των παραμέτρων  $\theta_1$  και  $\theta_5$ .

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ , και  $\theta_4$  κατασκευάζεται το διάγραμμα  $\ln(\dot{\epsilon}_c - \theta_5)$  vs.  $t$ , (Σχ. 3.2). Για την περιοχή του πρώτου σταδίου όπου ο χρόνος είναι σημαντικά μικρός σε σχέση με την χρονική διάρκεια που διαρκεί το φαινόμενο, ο τρίτος όρος της εξίσωσης 3.4 θεωρείται αμελητέος και μπορεί να μη ληφθεί υπόψη. Έτσι η εξίσωση 3.5 παίρνει τη μορφή:

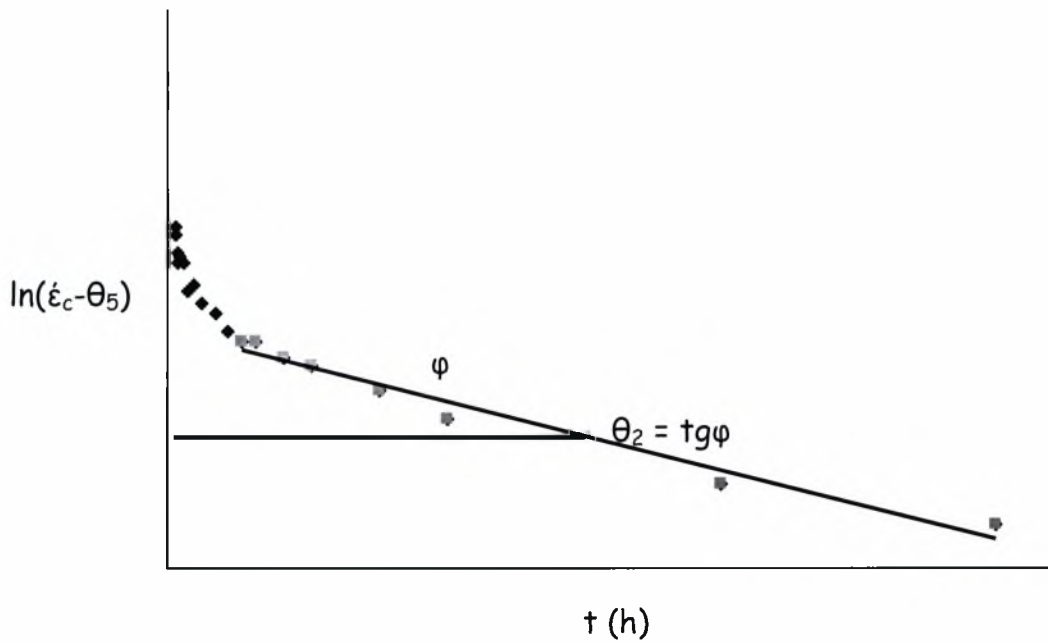
$$\dot{\epsilon}_c(t) = \theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 t} + \theta_5 \quad , \quad (3.6)$$

όπου λογαριθμίζοντας την παίρνει την μορφή:

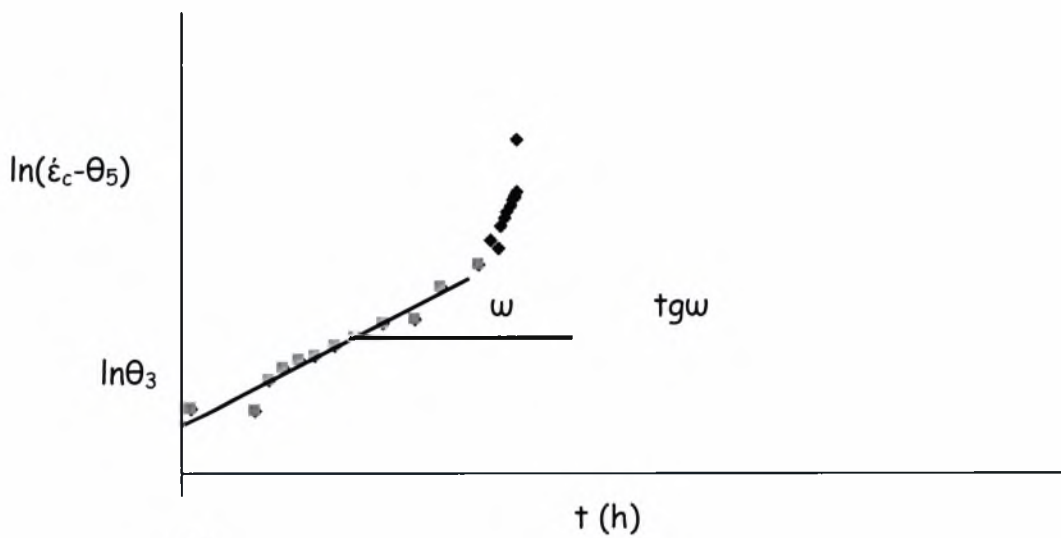
$$\ln(\dot{\epsilon}_c - \theta_5) = \ln(\theta_1 \theta_2) + \theta_2 t \quad , \quad (3.7)$$

Παρατηρώντας την εξίσωση 3.7 γίνεται αντιληπτό ότι αυτή είναι της μορφής  $y = \beta + a x$  οπότε αν παρασταθούν τα πειραματικά στοιχεία σ' ένα διάγραμμα  $\ln(\dot{\epsilon}_c - \theta_5)$  vs.  $t$ , αυτά θα βρίσκονται σε μια ευθεία γραμμή.

Πράγματι όπως φαίνεται και από το Σχ. 3.2α η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά ρεαλιστική με εξαίρεση τα πολύ αρχικά στάδια του πρώτης φάσης του ερπυσμού.



(α)



(β)

Σχ3.2α,β) Ποιοτική και γραφική παράσταση προσδιορισμού των παραμέτρων  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  και  $\theta_4$ .



Η εξομοίωση της καμπύλης ερπυσμού με την σχέση 3.7, για την περιοχή του πρώτου σταδίου αναμένεται να οδηγήσει σε υποτίμηση της παραμόρφωσης ερπυσμού κατά τα πρώτα στάδια του φαινομένου. Για το λόγο αυτό ο παραπάνω τρόπος προσδιορισμού των παραμέτρων  $\theta_1$ ,  $\theta_5$  και  $\theta_2$  αναμένεται να είναι πολύ κοντά στη πραγματικότητα όσον αφορά την απεικόνιση της συμπεριφοράς του ερπυσμού για υλικά, τα οποία η μεταβολή του ρυθμού παραμόρφωσης δεν είναι πάνω από δυο τάξεις μεγέθους.

Για την περιοχή του τρίτου σταδίου του ερπυσμού όπου έχει περάσει αρκετός χρόνος από την έναρξη του φαινομένου ( $t \gg \tau$ ) ο πρώτος όρος της εξίσωσης 3.5 μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ίσος με μηδέν και να μη ληφθεί υπόψη. Δηλαδή:

$$\theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 t} \rightarrow 0 \Rightarrow \dot{\epsilon}_c(t) = \theta_5 + \theta_3 e^{\theta_4 t} \quad , \quad (3.8)$$

Λογαριθμίζοντας την παραπάνω σχέση έχουμε την μορφή:

$$\ln(\dot{\epsilon}_c - \theta_5) = \ln \theta_3 + \theta_4 t \quad , \quad (3.9)$$

Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη ανάλυση, η εξίσωση 3.9 δηλώνει ότι τα πειραματικά στοιχεία της περιοχής του τρίτου σταδίου, αν παρασταθούν σε ένα διάγραμμα  $\ln(\dot{\epsilon}_c - \theta_5)$  vs.  $t$  θα βρίσκονται σε μια ευθεία. Η προσέγγιση αυτή βρίσκεται πολύ κοντά στη πραγματικότητα όταν στο φαινόμενο κυριαρχούν οι μηχανισμοί του τρίτου σταδίου, δηλαδή όταν το πρώτο και δεύτερο στάδιο του ερπυσμού συγκριτικά με το τρίτο, ολοκληρώνονται σε μικρό χρονικό διάστημα και ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης αυξάνεται σχεδόν αμέσως με την έναρξη του φαινομένου. Έτσι λοιπόν η παράμετρος  $\theta_4$  μπορεί να υπολογισθεί αριθμητικά ή γραφικά από την κλίση της ευθείας που σχηματίζουν τα πειραματικά στοιχεία του τρίτου σταδίου με τον οριζόντιο άξονα όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο

Σχ. 3.2 β), ενώ η παράμετρος  $\theta_3$  προκύπτει από την τομή της προέκτασης της ευθείας εξομοίωσης με τον άξονα  $\ln(\dot{\epsilon}_c - \theta_5)$  την χρονική στιγμή  $t = 0$ .

Η προσέγγιση της καμπύλης ερπυσμού για το δεύτερο και το τρίτο στάδιο με την σχέση 3.9 αναμένεται να οδηγήσει σε μια σχετική υπερεκτίμηση της παραμόρφωσης ερπυσμού  $\epsilon_c$ . Η υπερεκτίμηση αυτή βελτιώνει αριθμητικά την υστέρηση στην παραμόρφωση του υλικού η οποία προβλέπεται σύμφωνα με την επιλεγείσα προσομοίωση του πρώτου σταδίου για τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $\theta_1$  και  $\theta_5$ . [33]

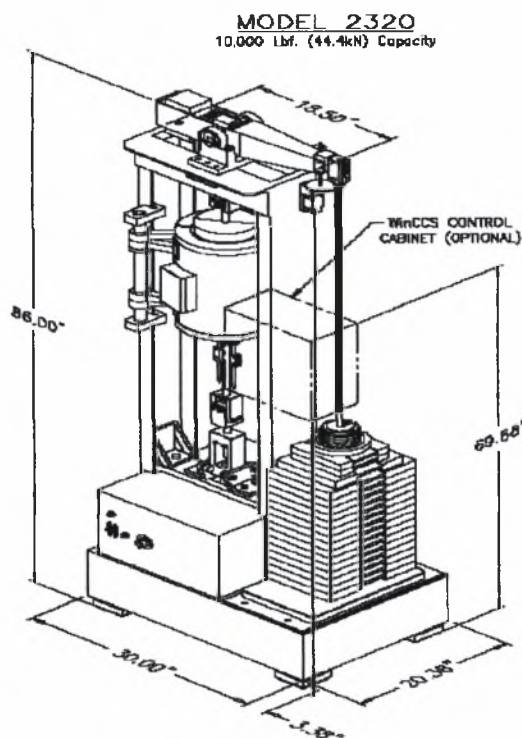
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### 4.1 Πειραματική διαδικασία.

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο LFW του πανεπιστημίου RWTH του Aachen της Γερμανίας.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα ήταν ο υψηλά κεκραμένος χάλυβας με τύπο X6 CrNi 1811. Η χημική σύσταση του υλικού καθορίστηκε σε ποσοστό % κατά βάρος και ήταν: 0.072% C, 0.65% Si, 1.78% Mn, 0.010% S, 0.014% P, 17.4% Cr, 11.5% Ni, 0.03% Mo, 68.544% Fe.

Εξήντα πέντε δοκίμια, με ενεργό μήκος 50 mm και διάμετρο 10 mm εξετάστηκαν σε μια σειρά από τάσεις στις θερμοκρασίες 650 °C, 700 °C και 750°C χρησιμοποιώντας μηχανές σταθερού φορτίου υψηλής ακρίβειας όπως σχηματικά φαίνονται παρακάτω.



Σχ. 4.1 Σχηματική απεικόνιση μηχανής ερπυσμού.



Σχ. 4.2 Μηχανή δοκιμής ερπυσμού

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται μια μηχανή δοκιμής ερπυσμού που συμπεριλαμβάνει τους βραχίονες, βαθμολογημένα βάρη φορτίων, σύστημα ευθυγράμμισης ,κλίβανο με δυνατότητα απόσπασης, επιμηκυνσιόμετρα που υπολογίζουν τον μέσο όρο παραμόρφωσης, και σύνδεση με κατάλληλο λογισμικό που αποθηκεύει και επεξεργάζεται τα στοιχεία σε ηλεκτρονική μορφή.

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δοκίμια στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες και τάσεις:

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
110	3	650°C
120	1	650°C
90	5	700°C
100	7	700°C
110	12	700°C
120	13	700°C
130	4	700°C
140	2	700°C
150	5	700°C
160	3	700°C
180	2	700°C
190	3	700°C
110	4	750°C

Πίνακας 4.1 Κατηγοριοποίηση των δοκιμών.

Η θερμοκρασία διατηρήθηκε σε όλο το ενεργό μήκος του δοκιμίου και για όλη την χρονική διάρκεια του πειράματος σταθερή με απόκλιση  $\pm 0,2$  °C. Τα επιμηκυνσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ακρίβεια μέτρησης μήκους μεγαλύτερη από  $10^{-5}$  και οι μετρήσεις που παρήχθησαν ήταν αρκετές για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Οι αναγνώσεις των αποτελεσμάτων της παραμόρφωσης και του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου λήφθηκαν κατά τη διάρκεια κάθε μιας από αυτές τις δοκιμές και παρατηρήθηκαν οι καμπύλες ερπυσμού οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου.

## 4.2 Αποτελέσματα.

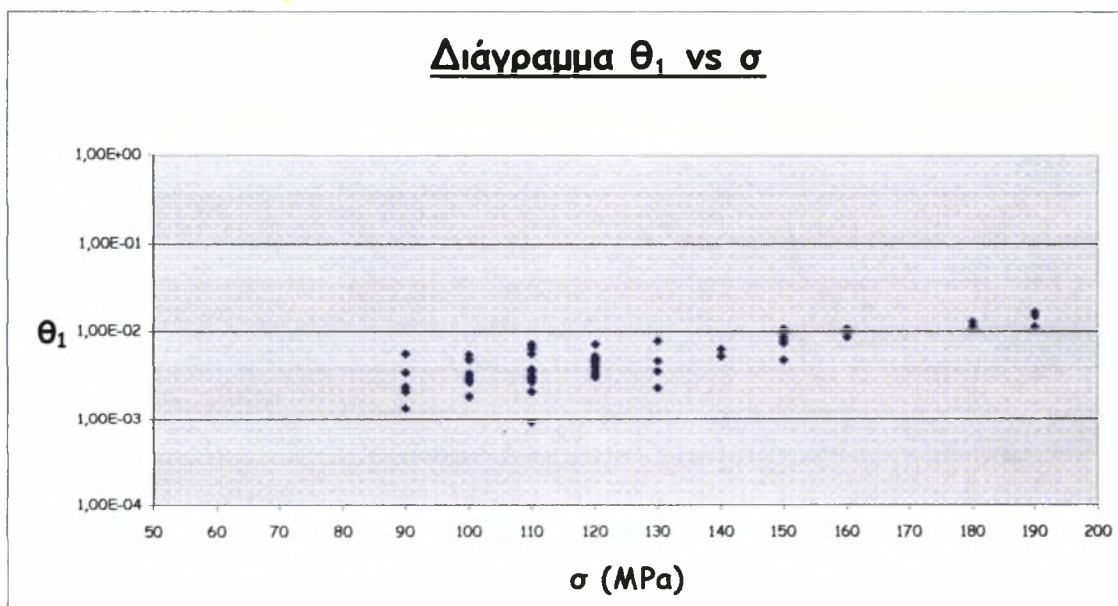
Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται όλα τα πειράματα που έγιναν.

Κωδικός Πειράματος	Ονομαστική Τάση (MPa)	Θερμοκρασία (C°)
60238	90	700
60245	90	700
60267	90	700
60275	90	700
60283	90	700
60269	100	700
60271	100	700
60284	100	700
60290	100	700
60291	100	700
60292	100	700
60293	100	700
60241	110	700
60256	110	700
60266	110	700
60289	110	700
60303	110	700
60304	110	700
60306	110	700
60307	110	700
60309	110	700
60311	110	700
603111	110	700
603121	110	700
60250	120	700
60251	120	700
60252	120	700
60253	120	700
60263	120	700
60286	120	700
60288	120	700
60299	120	700

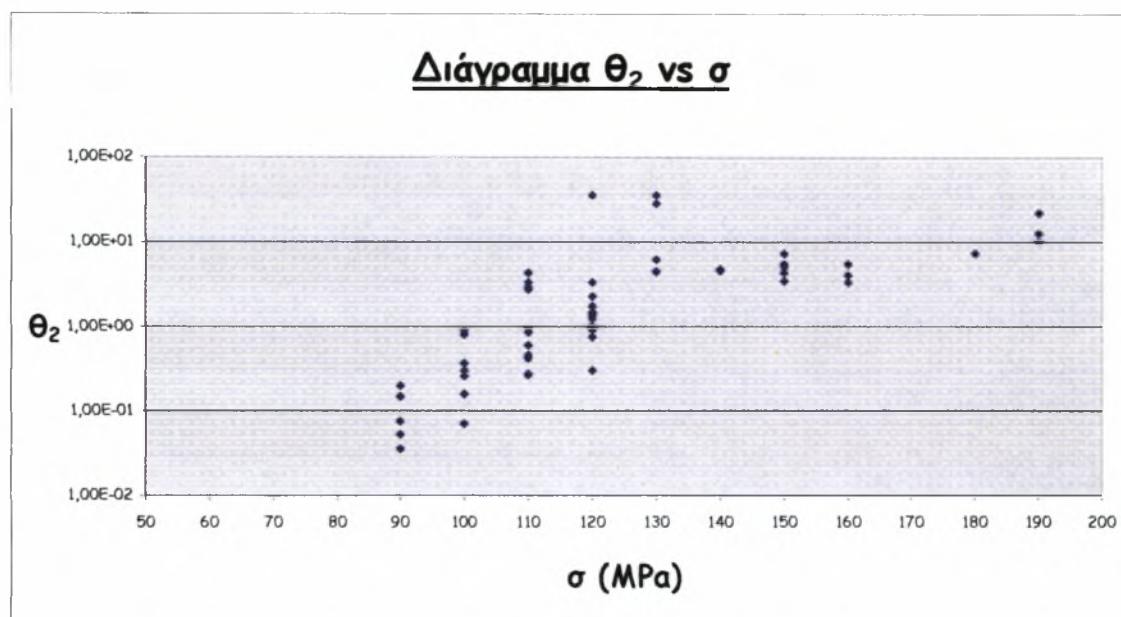
Κωδικός Πειράματος	Ονομαστική Τάση (MPa)	Θερμοκρασία (C°)
60300	120	700
60301	120	700
60302	120	700
602861	120	700
603001	120	700
60242	130	700
60265	130	700
60287	130	700
60285	130	700
60255	140	700
60259	140	700
60235	150	700
60246	150	700
60247	150	700
60264	150	700
60244	150	700
60237	160	700
60239	160	700
60254	160	700
60261	180	700
60262	180	700
60257	190	700
60258	190	700
60260	190	700
60274	110	650
60277	110	650
60278	110	650
60234	120	650
60279	110	750
60280	110	750
60281	110	750
60282	110	750

Πίνακας 4.2 Κατηγοριοποίηση των πειραμάτων.

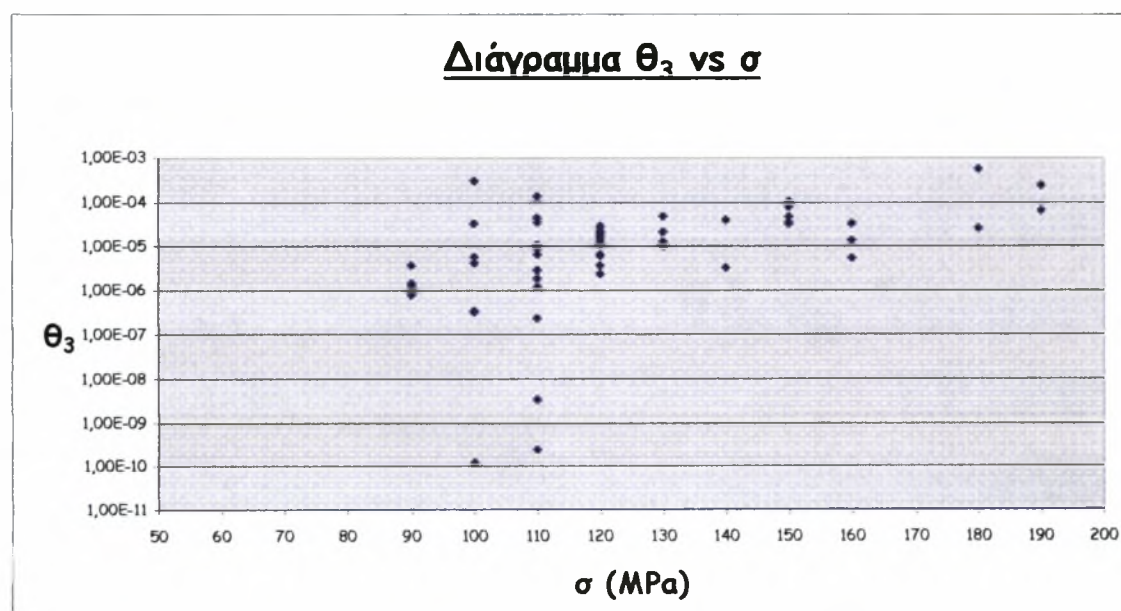
Παρακάτω παρουσιάζονται τα τελικά διαγράμματα των συντελεστών  $\theta$  συναρτήσει των τάσεων στη θερμοκρασία  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Για τον προσδιορισμό των τελικών τιμών των παραμέτρων  $\theta$  ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: καταρχήν έγινε μια πρώτη εκτίμηση της τάξης μεγέθους, σύμφωνα με την διαδικασία που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, με χρήση κατάλληλου υπολογιστικού προγράμματος. Στη συνέχεια με βάση τα δεδομένα αυτά έγινε ο ακριβής προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων  $\theta$  με υπολογισμούς που έγιναν με χρήση του μαθηματικού προγράμματος MATLAB. Συγκεκριμένα η επίλυση έγινε με την χρήση αλγόριθμου Trust-Region. Όλη αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε διότι το παραμετρικό μοντέλο 5- $\theta$  είναι μια «ευαίσθητη» μη γραμμική εξίσωση για την επίλυση της οποίας είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της τάξης μεγέθους των συντελεστών  $\theta$  προκειμένου να εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα.



Σχ. 4.3 Διάγραμμα  $\sigma - \theta_1$  για θερμοκρασία  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

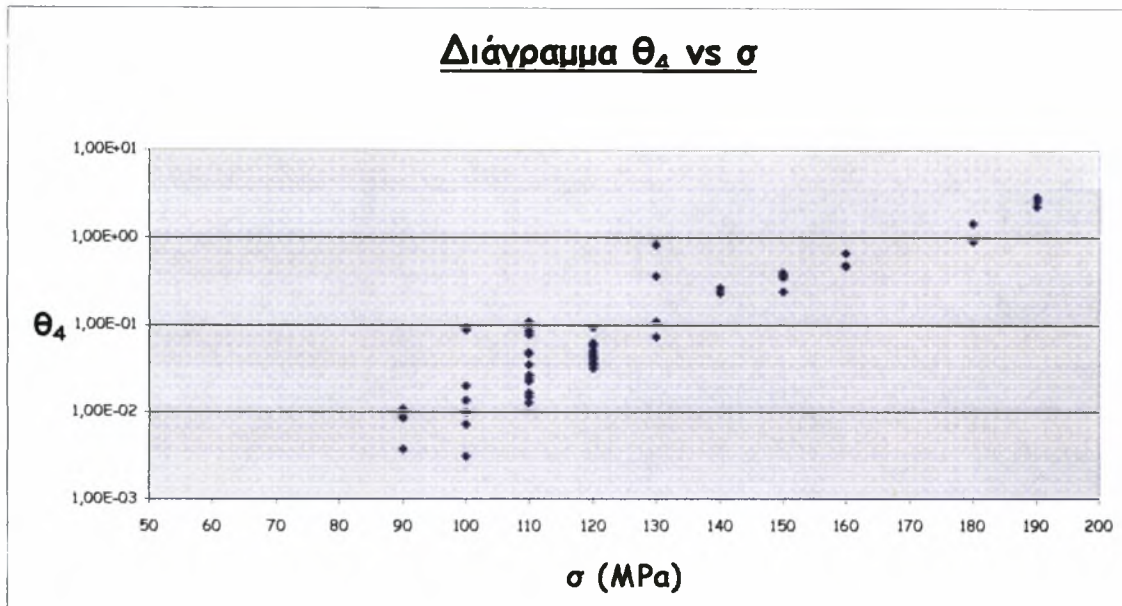


Σχ. 4.4 Διάγραμμα  $\sigma - \theta_2$  για θερμοκρασία  $T = 700$  °C.

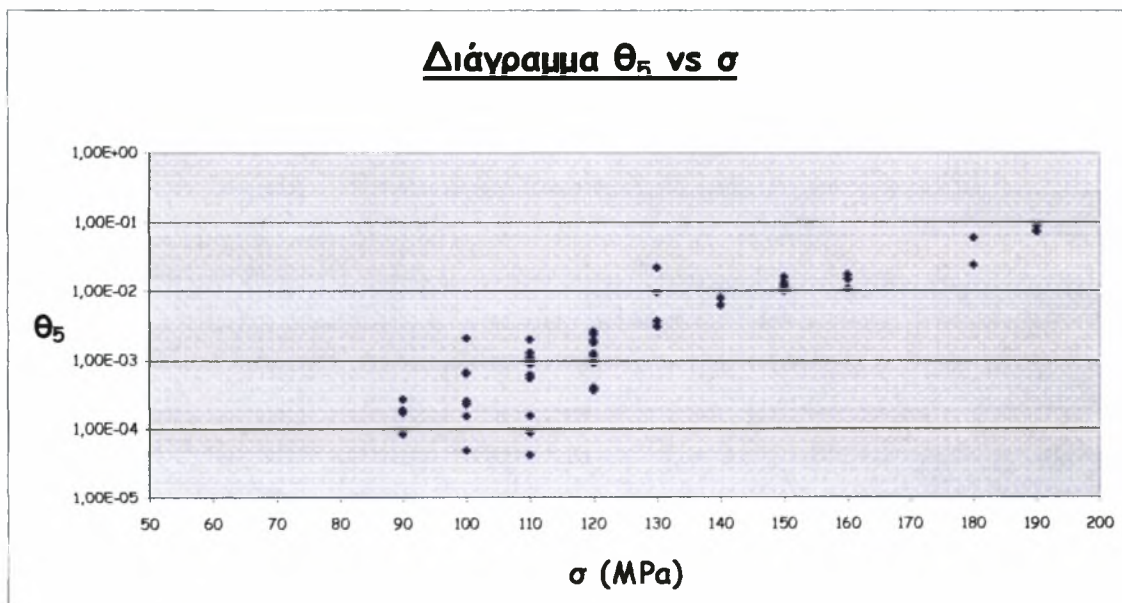


Σχ. 4.5 Διάγραμμα  $\sigma - \theta_3$  για θερμοκρασία  $T = 700$  °C.





Σχ. 4.6 Διάγραμμα  $\sigma$  -  $\theta_4$  για θερμοκρασία  $T = 700$  °C.



Σχ. 4.7 Διάγραμμα Τάση -  $\theta_5$  για θερμοκρασία  $T = 700$  °C.

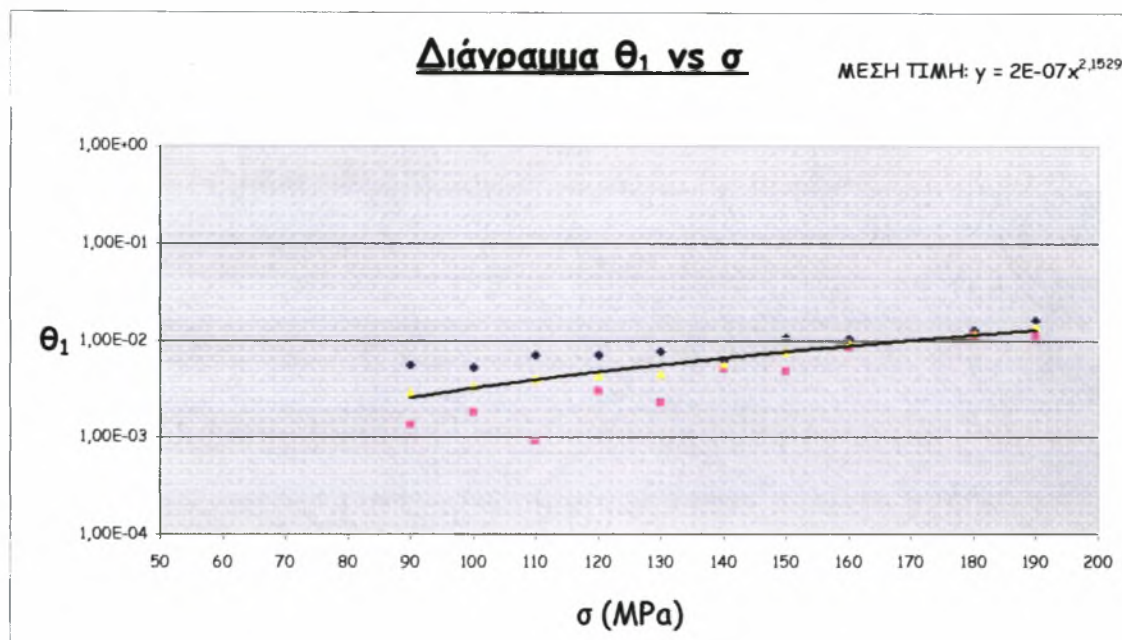
Από τα διαγράμματα γίνεται φανερό ότι η διασπορά των τιμών των παραμέτρων  $\theta$  είναι μεγαλύτερη για τις μικρές τάσεις των πειραμάτων μας, ενώ όσο αυξάνεται η τάση, η απόσταση μεταξύ άνω και κάτω ορίου των τιμών των παραμέτρων μειώνεται. Επίσης αυτή η διασπορά δεν είναι η ίδια για όλες τις παραμέτρους. Περισσότερη ευαισθησία πάνω σ' αυτό το θέμα δείχνουν οι παράμετροι  $\theta_2$  και κυρίως  $\theta_3$ , ενώ οι παράμετροι  $\theta_1$ ,  $\theta_4$  και  $\theta_5$  εμφανίζουν ομοιόμορφη συμπεριφορά σε όλο το εύρος των τάσεων.

Πιο αναλυτικά όσον αφορά την παράμετρο  $\theta_1$ , η οποία υποδηλώνει την παραμόρφωση που συσσωρεύεται στο πρώτο στάδιο του ερπυσμού, παρατηρείται ότι, η διακύμανση της τιμής της είναι μικρή για κάθε τάση και ιδιαίτερα μετά την τάση 140 MPa. Επίσης η μεταβολή της μέσης τιμής για όλες τις τάσεις είναι μικρή. Η παράμετρος  $\theta_3$ , η οποία εκφράζει την ταχύτητα εκκίνησης της παραμόρφωσης ερπυσμού εάν το υλικό έμπαινε κατευθείαν στο τρίτο στάδιο μετά την άσκηση του φορτίου, έχει παρόμοια συμπεριφορά με την  $\theta_1$  ως προς τη μεταβολή της μέσης τιμής της. Αντίθετα η διακύμανση της τιμής είναι μεγαλύτερη ακολουθώντας όμως και αυτή πτωτική πορεία όσο μεγαλώνει η τάση κυρίως μετά τα 120 MPa. Η παράμετρος  $\theta_2$  η οποία εκφράζει την ταχύτητα με την οποία το υλικό τείνει προς το ομοιόμορφο στάδιο του ερπυσμού, η μεταβολή της μέσης τιμής είναι απότομη μέχρι την τάση 130 MPa και στη συνέχεια με αύξηση της τάσης, διατηρείται σχεδόν σταθερή. Η διακύμανση της τιμής της παραμέτρου είναι μεγαλύτερη μέχρι την τάση 130 MPa και ελαττώνεται για μεγαλύτερες τάσεις. Η παράμετρος  $\theta_4$  έχει όμοια συμπεριφορά με την  $\theta_2$  με την μόνη διαφορά ότι η μέση τιμή συνεχίζει να μεταβάλλεται ομοιόμορφα σε όλο το εύρος των τάσεων. Τέλος η μεταβολή της παραμέτρου  $\theta_5$ , η οποία εκφράζει τον ρυθμό παραμόρφωσης της σταθερής κατάστασης ερπυσμού, είναι ομοιόμορφη, ενώ η διακύμανση των τιμών είναι μεγαλύτερη σε τάσεις μέχρι 130 MPa και ελαττώνεται για μεγαλύτερες τάσεις.

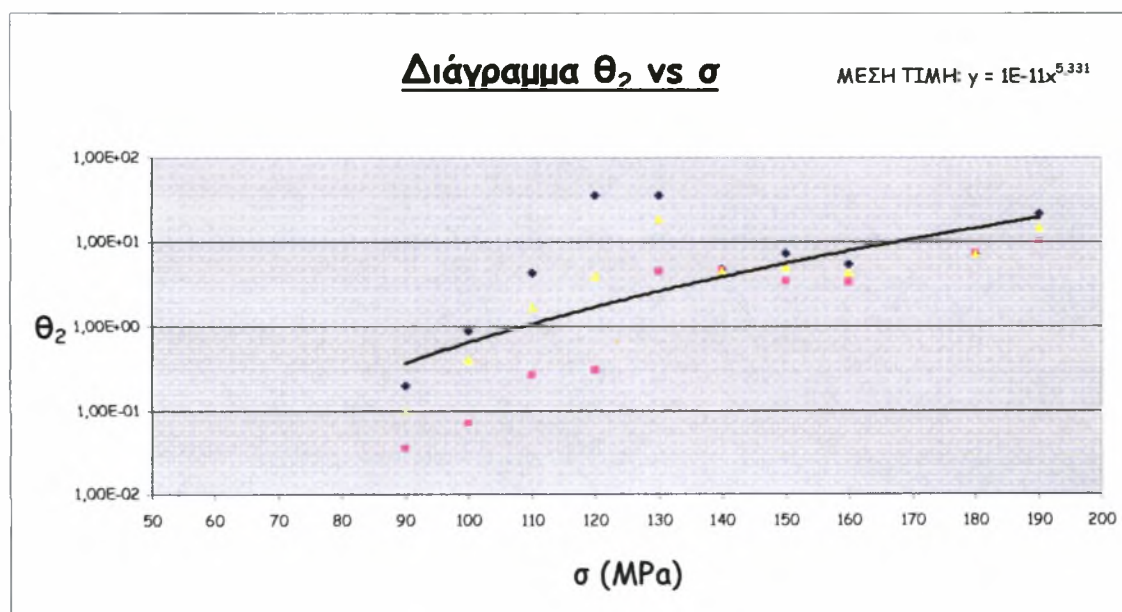
Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 4.3, ο οποίος περιέχει τη μέση τιμή των παραμέτρων  $\theta$  για κάθε τάση στην θερμοκρασία  $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Δίνονται επίσης τα διαγράμματα τάσης -  $\theta_i$  και παράλληλα προσδιορίζονται οι σχέσεις που συνδέουν τους συντελεστές  $\theta$  με την τάση. Από τα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται, όπως σχολιάστηκε προηγουμένως, ότι όσο η τάση που πραγματοποιείται το πείραμα μεγαλώνει, τόσο η διαφορά μεταξύ των τιμών του άνω και κάτω ορίου μειώνεται.

ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ					ΤΑΣΗ
$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	
2,97E-03	1,01E-01	1,58E-06	8,23E-03	2,01E-04	90
3,38E-03	4,03E-01	5,04E-05	3,37E-02	5,90E-04	100
4,02E-03	1,69E+00	2,09E-05	4,34E-02	8,09E-04	110
4,46E-03	3,95E+00	1,43E-05	4,90E-02	1,41E-03	120
4,52E-03	1,84E+01	2,28E-05	3,42E-01	9,66E-03	130
5,73E-03	4,67E+00	2,07E-05	2,51E-01	7,12E-03	140
7,79E-03	5,03E+00	5,94E-05	3,53E-01	1,27E-02	150
9,78E-03	4,27E+00	1,75E-05	5,39E-01	1,44E-02	160
1,21E-02	7,17E+00	3,02E-04	1,18E+00	4,13E-02	180
1,41E-02	1,48E+01	1,25E-04	2,62E+00	7,78E-02	190

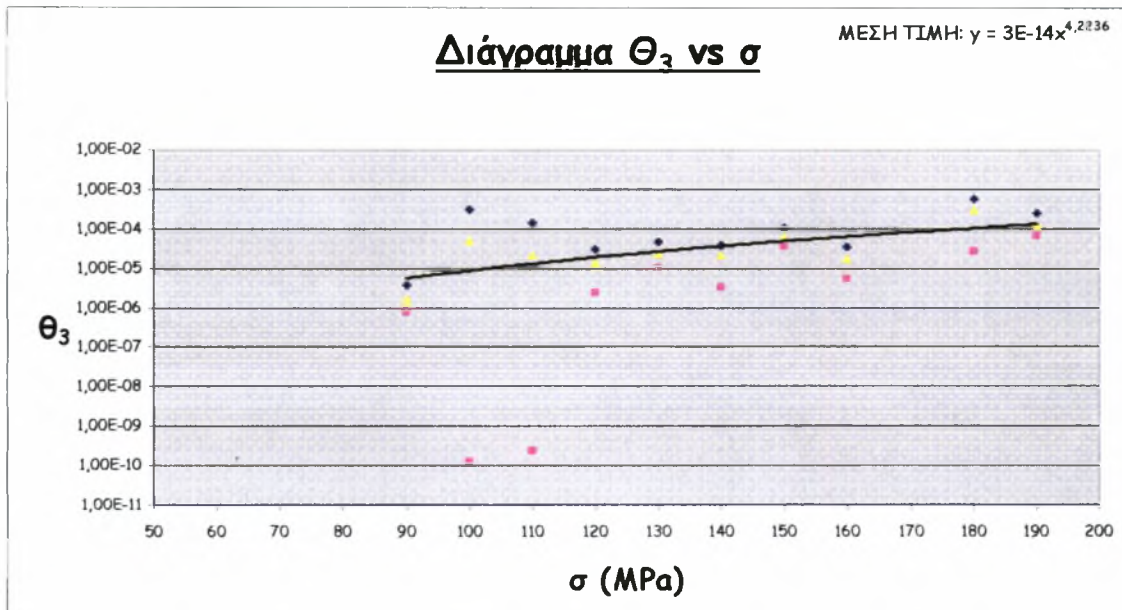
Πίνακας 4.3 Μέση τιμή των παραμέτρων  $\theta$  για κάθε τάση.



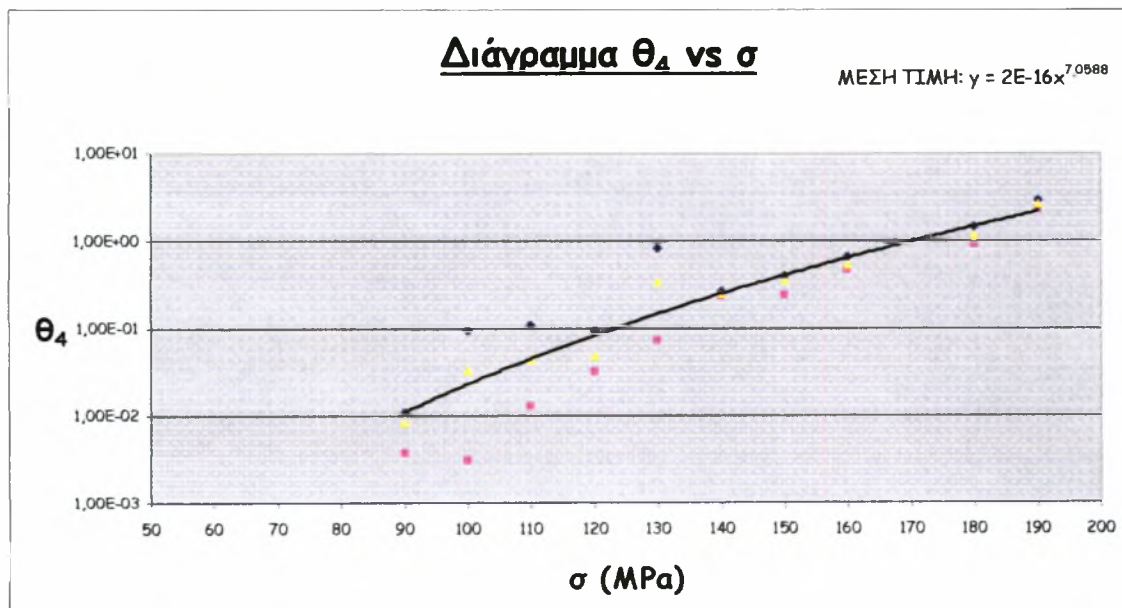
Σχ. 4.8 Διάγραμμα του άνω ορίου, της μέσης τιμής και του κάτω ορίου της παραμέτρου  $\theta_1$  για θερμοκρασία  $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ .



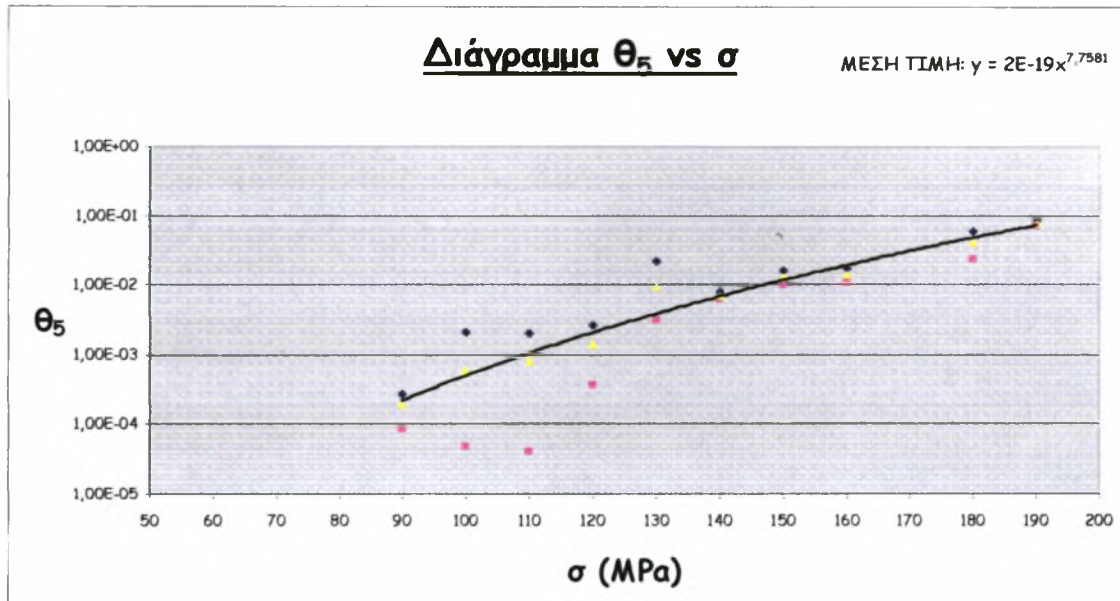
Σχ. 4.9 Διάγραμμα του άνω ορίου, της μέσης τιμής και του κάτω ορίου της παραμέτρου  $\theta_2$  για θερμοκρασία  $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Σχ. 4.10 Διάγραμμα του άνω ορίου, της μέσης τιμής και του κάτω ορίου της παραμέτρου  $\theta_3$  για θερμοκρασία  $T = 700^\circ\text{C}$ .



Σχ. 4.11 Διάγραμμα του άνω ορίου, της μέσης τιμής και του κάτω ορίου της παραμέτρου  $\theta_4$  για θερμοκρασία  $T = 700^\circ\text{C}$ .



Σχ. 4.12 Διάγραμμα του άνω ορίου, της μέσης τιμής και του κάτω ορίου της παραμέτρου  $\theta_5$  για θερμοκρασία  $T = 700^\circ\text{C}$ .

Στα παραπάνω διαγράμματα εμφανίζονται επίσης, οι σχέσεις οι οποίες συνδέουν την τάση με τις παραμέτρους  $\theta$ . Πράγματι η σχέση αυτή μπορεί να περιγραφεί πολύ καλά με μια δυναμική συνάρτηση της μορφής:

$$y = a x^b, \quad (4.1)$$

όπου η τεταγμένη  $y$  ταυτίζεται με τις παραμέτρους  $\theta$  ως εξής:  $y = \ln(\theta_i)$ , ενώ η τετμημένη  $x$  ταυτίζεται με την τάση. Έτσι έχοντας γνωστές τις τιμές των παραμέτρων  $\theta$  από την επεξεργασία των δεδομένων που προηγήθηκε και τις τάσεις στις οποίες αντιστοιχούν οι παράμετροι αυτοί, μπορούμε να προσεγγίσουμε τους συντελεστές  $a$  και  $b$  της παραπάνω εξίσωσης. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 4.4, ο οποίος περιέχει συγκεντρωτικά τις τιμές των συντελεστών  $a$  και  $b$  της μέσης τιμής, για κάθε παράμετρο  $\theta$ .

Έχοντας γνωστές λοιπόν τις τιμές των συντελεστών  $a$  και  $b$ , είναι εφικτό για μια γνωστή τάση λειτουργίας ενός υλικού, να υπολογιστούν πρώτα οι τιμές των συντελεστών  $\theta$  από την σχέση (4.1) και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$\varepsilon_c(t) = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_5 t (\theta_3/\theta_4)(e^{\theta_4 t} - 1) \quad , \quad (3.4)$$

$$\dot{\varepsilon}_c(t) = \theta_1\theta_2 e^{-\theta_2 t} + \theta_5 + \theta_3 e^{\theta_4 t} \quad , \quad (3.5)$$

να υπολογιστούν κύρια μεγέθη του φαινομένου του ερπυσμού, όπως η παραμόρφωση του υλικού σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης, το όριο θραύσης κ.λπ.

Έτσι λοιπόν καθίσταται δυνατή η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και η χρησιμοποίησή τους προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος για τον οποίο αυτά πραγματοποιήθηκαν που δεν είναι άλλος από την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υλικού σε συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες δεν έχουμε πειραματικά δεδομένα. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υλικού κρίνεται απαραίτητη, προκειμένου ο σχεδιασμός αυτού να ανταποκρίνεται στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας.

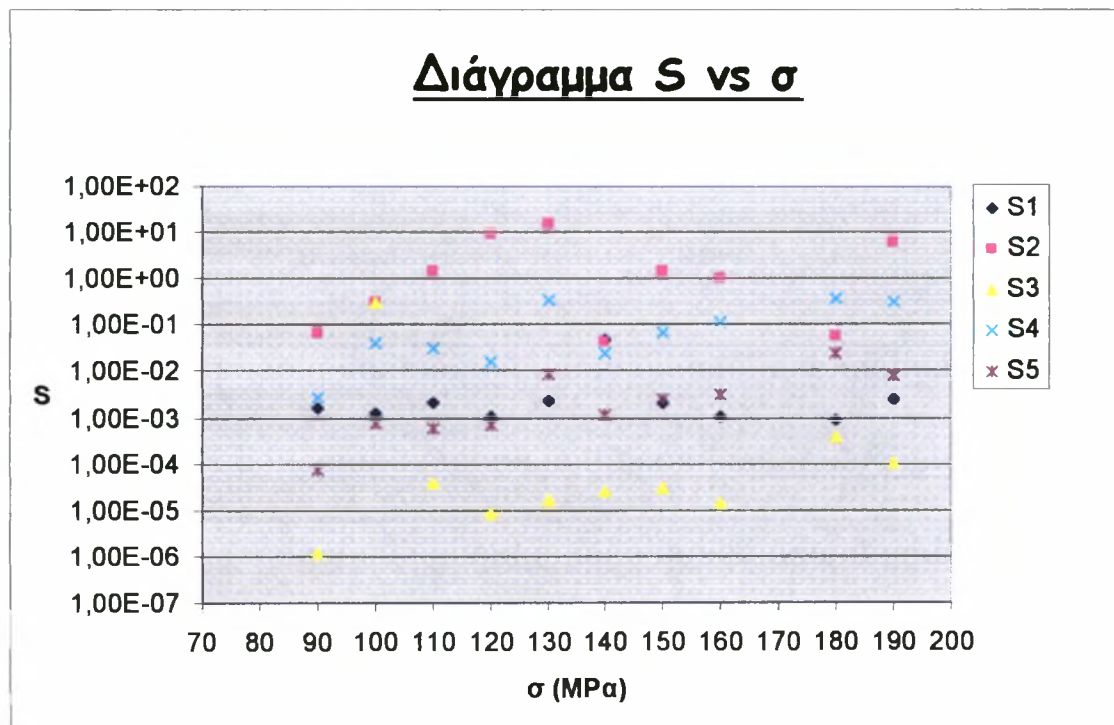
#### Τιμές συντελεστών α, β

Μέση τιμή	
α	β
2,00E-07	2,153
1,00E-11	5,331
3,00E-14	4,224
2,00E-16	7,059
2,00E-19	7,758

Πίνακας 4.4 Συντελεστές εξίσωσης θ-σ.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης  $S$  από τη μέση τιμή κάθε παραμέτρου  $\theta$  για κάθε τάση στη θερμοκρασία  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  όπου:

$$\text{Μέση Τιμή: } \theta = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{n}, \quad \text{Τυπική Απόκλιση: } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

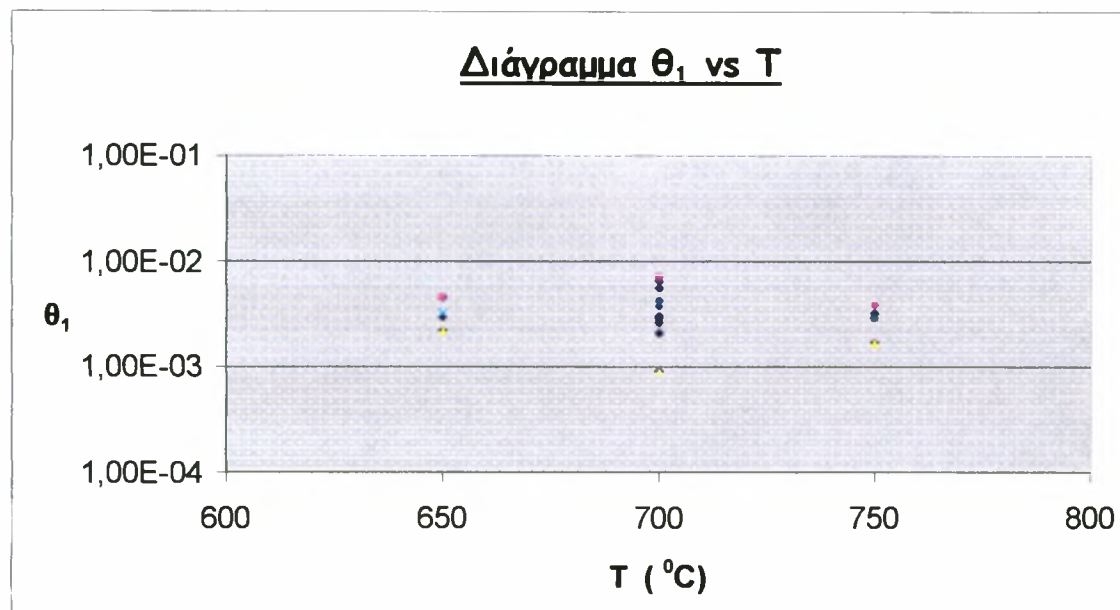


Σχ. 4.13 Διάγραμμα της τυπικής απόκλισης της μέσης τιμής για κάθε τάση.

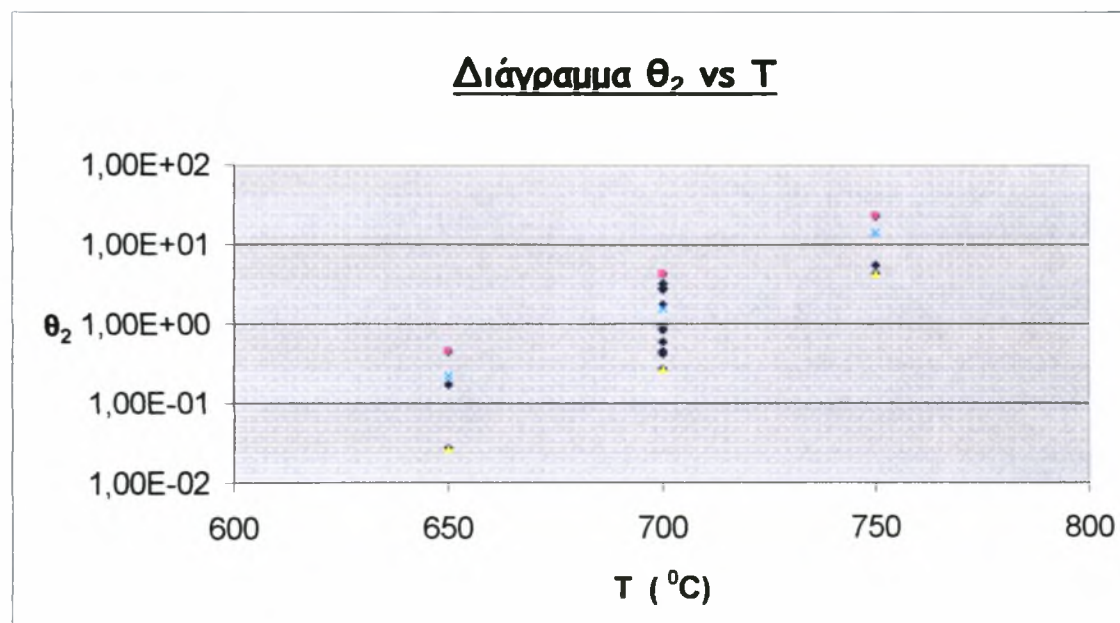
Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα  $\sigma - S$  τη μεγαλύτερη διακύμανση παρουσιάζουν οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων  $\theta_2$  και  $\theta_4$ .



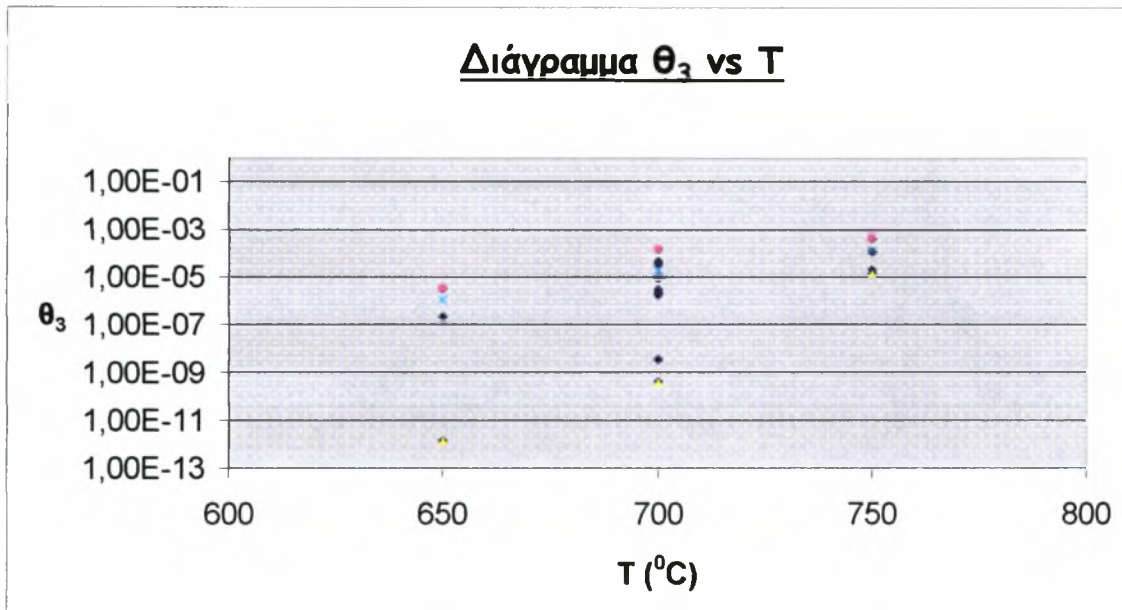
Σε τάση 110 ΜΡα πραγματοποιηθήκαν πειράματα ερπυσμού σε θερμοκρασίες 650 °C, 700 °C και 750 °C. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συντελεστών  $\theta$  συναρτήσει της θερμοκρασίας σε σταθερή τάση 110 ΜΡα.



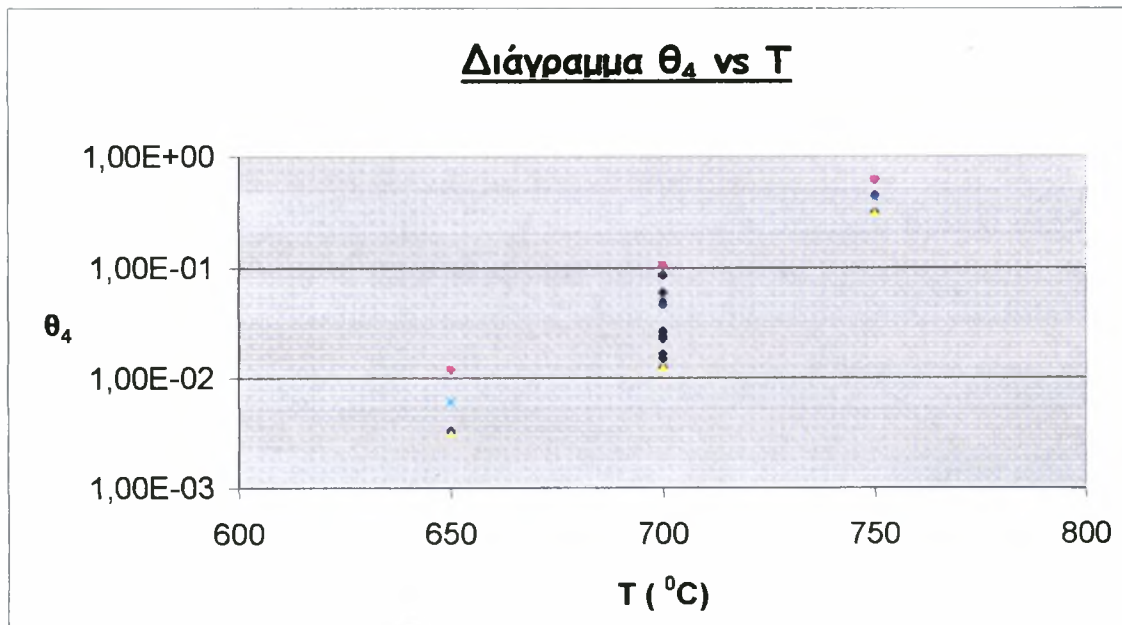
Σχ. 4.14 Διάγραμμα T -  $\theta_1$  για  $\sigma = 110$  ΜΡα.



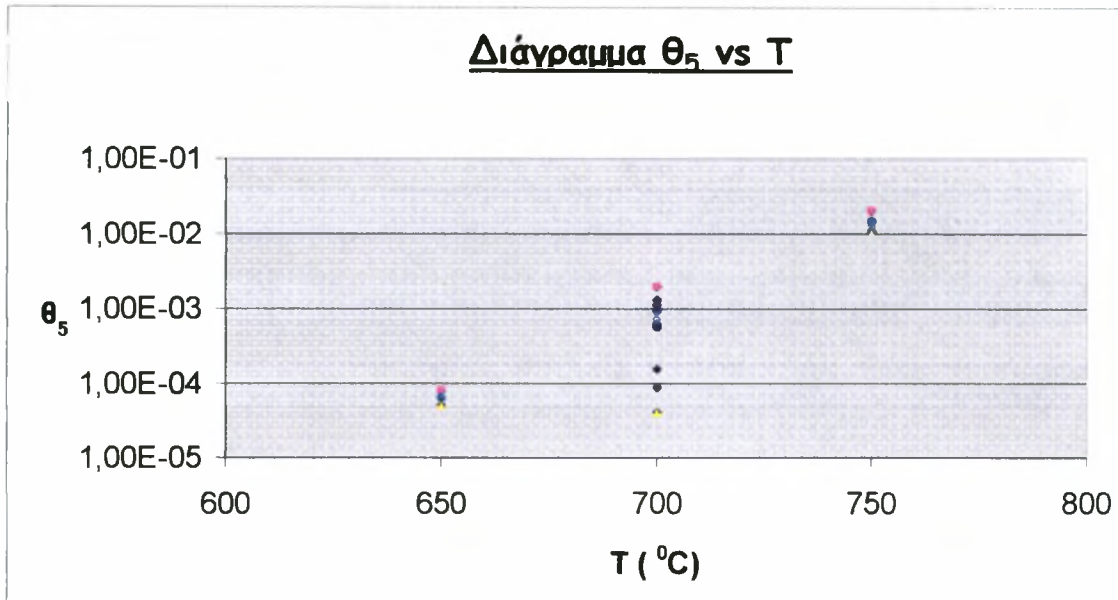
Σχ. 4.15 Διάγραμμα T -  $\theta_2$  για  $\sigma = 110$  ΜΡα.



Σχ. 4.16 Διάγραμμα T -  $\theta_3$  για  $\sigma = 110$  MPa.



Σχ. 4.17 Διάγραμμα T -  $\theta_4$  για  $\sigma = 110$  MPa.



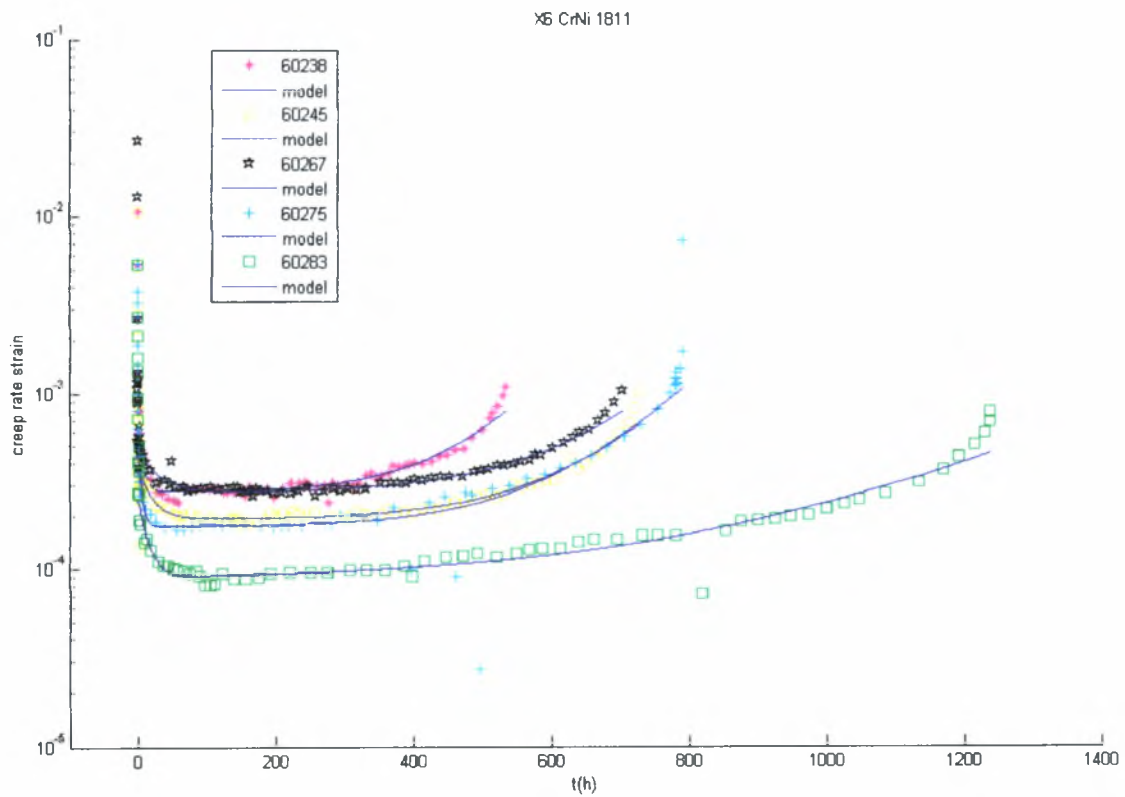
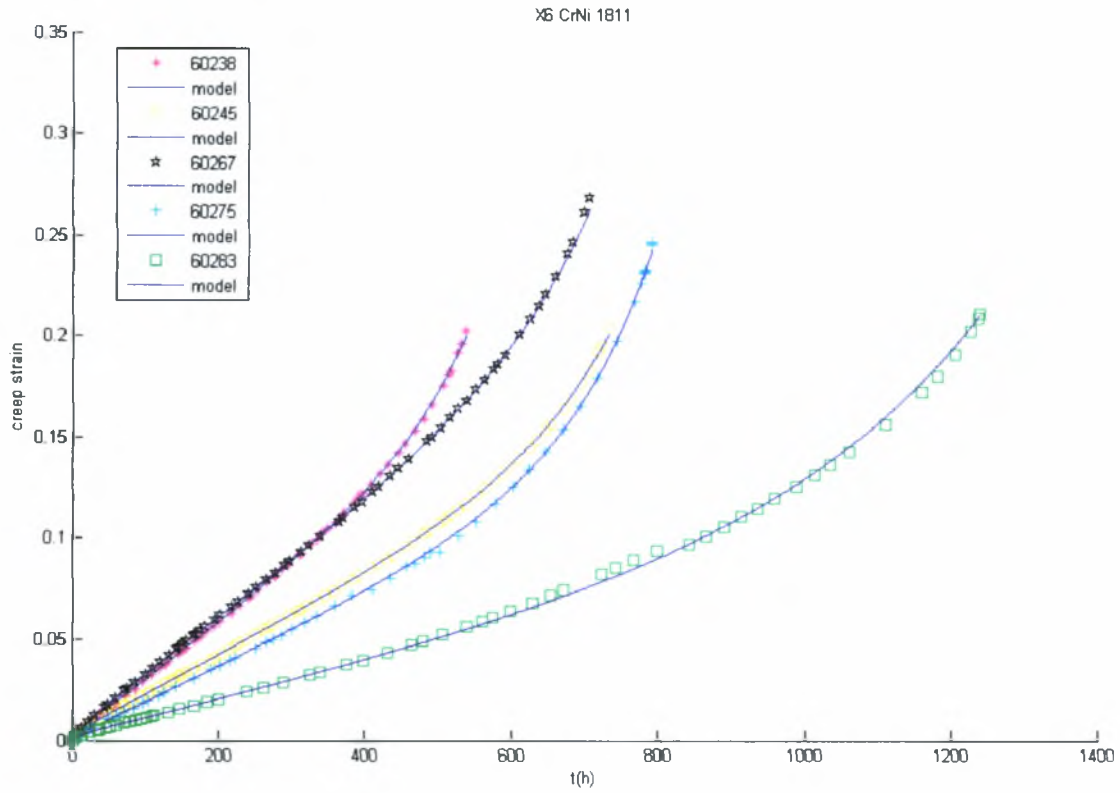
Σχ. 4.18 Διάγραμμα T -  $\theta_5$  για  $\sigma = 110$  MPa.

Όπως διαφαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα το μοντέλο 5- $\theta$  προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα σε θερμοκρασίες διαφορετικές των  $700$  °C για την τάση  $110$  MPa.

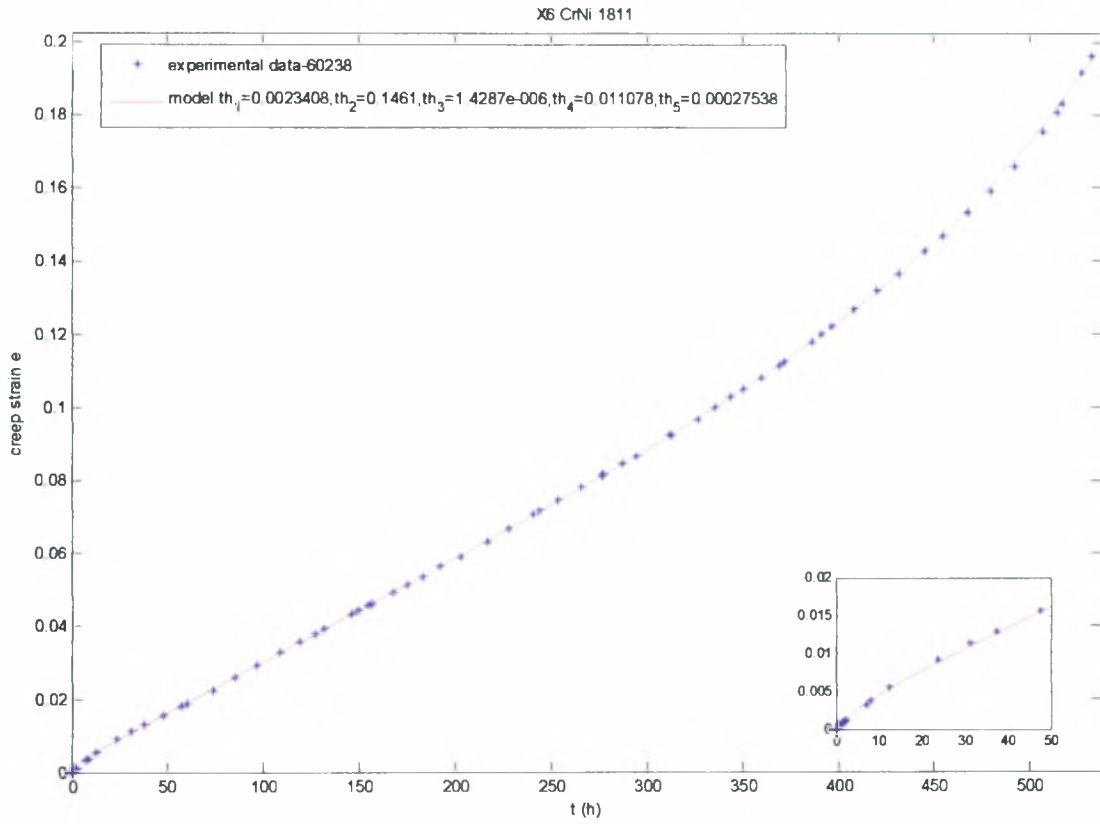
Ακολουθούν τα διαγράμματα παραμόρφωσης - χρόνου ( $\epsilon - t$ ) και ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης - χρόνου ( $d\epsilon/dt - t$ ) για κάθε πείραμα ξεχωριστά καθώς και συγκεντρωτικά διαγράμματα  $\epsilon - t$  και  $\dot{\epsilon} - t$  για κάθε τάση. Πιο αναλυτικά τα Σχ. 4.19 έως 4.24 απεικονίζουν την τάση  $90$  MPa, τα Σχ.4.25 έως Σχ.4.32 την τάση  $100$  MPa, τα Σχ.4.33 έως Σχ.4.46 την τάση  $110$  MPa, τα Σχ.4.47 έως Σχ.4.61 την τάση  $120$  MPa, τα Σχ.4.62 έως Σχ.4.66 την τάση  $130$  MPa, τα Σχ.4.67 έως Σχ.4.69 την τάση  $140$  MPa, τα Σχ.4.70 έως Σχ.4.75 την τάση  $150$  MPa, τα Σχ.4.76 έως Σχ.4.79 την τάση  $160$  MPa, τα Σχ.4.80 έως Σχ.4.82 την τάση  $180$  MPa, τα Σχ.4.83 έως Σχ.4.86 την τάση  $190$  MPa, τα Σχ.4.87 έως Σχ.4.91 την τάση  $120$  MPa σε θερμοκρασία  $T=650$  °C, τα Σχ.4.92 έως Σχ.4.96 την τάση  $120$  MPa σε θερμοκρασία  $T=750$  °C.

Εξετάζοντας τα διαγράμματα παρατηρείται ότι ο χρόνος θραύσης και η συνολική παραμόρφωση για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην ίδια

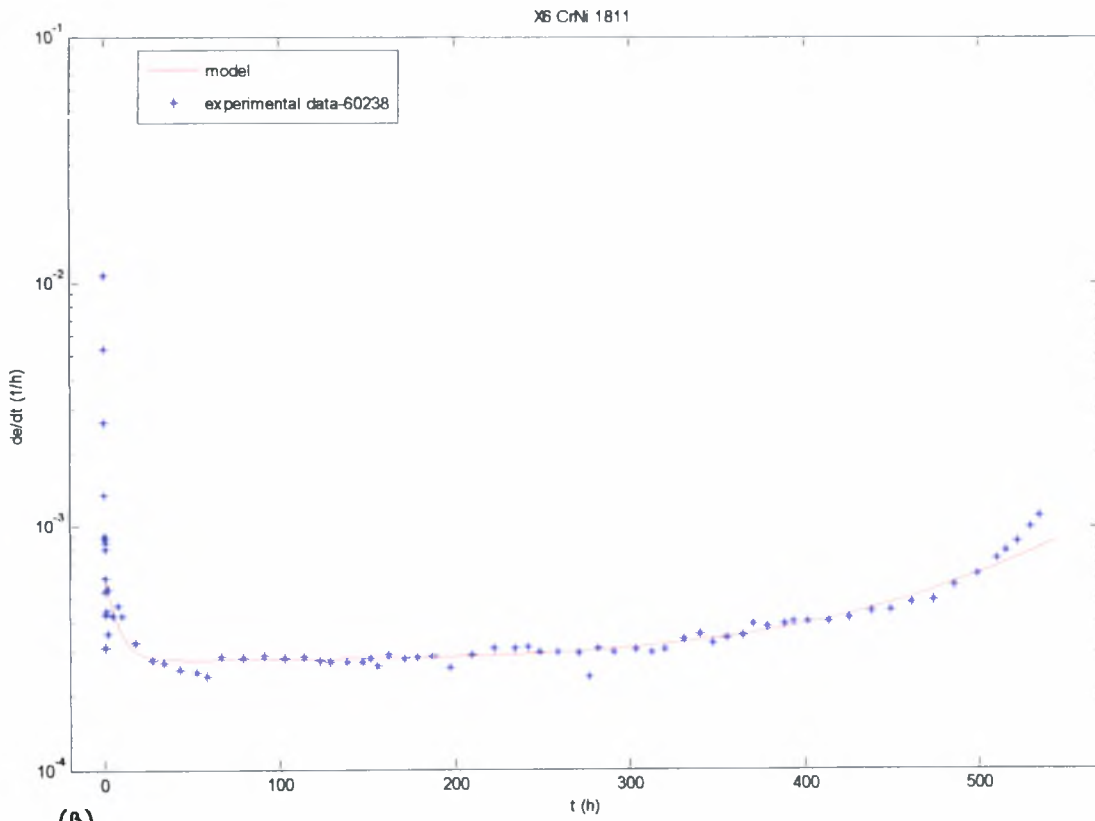
τάση διαφέρουν. Αυτό οφείλεται είτε σε ασυνέχεια στη μικροδομή του υλικού είτε σε διαφοροποίηση της πειραματικής διαδικασίας λόγω μη εσκεμμένου ανθρώπινου λάθους.



Σχ. 4.19 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 90Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.

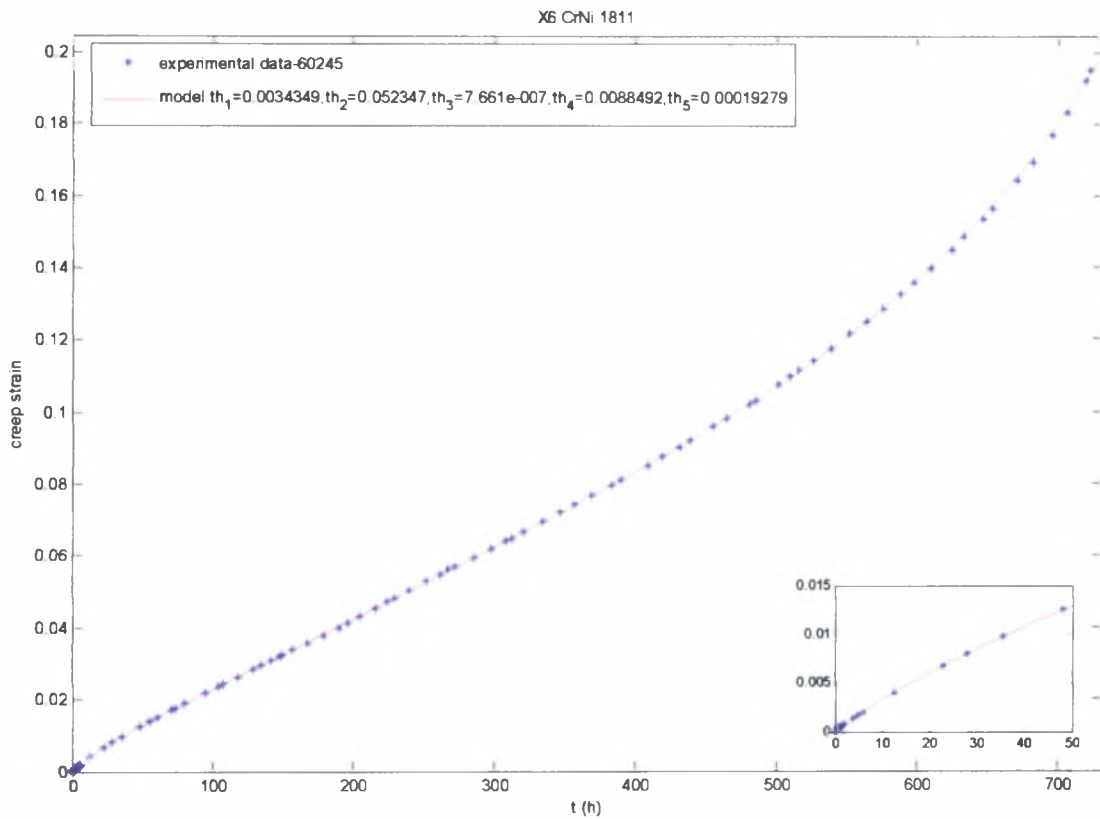


(α)

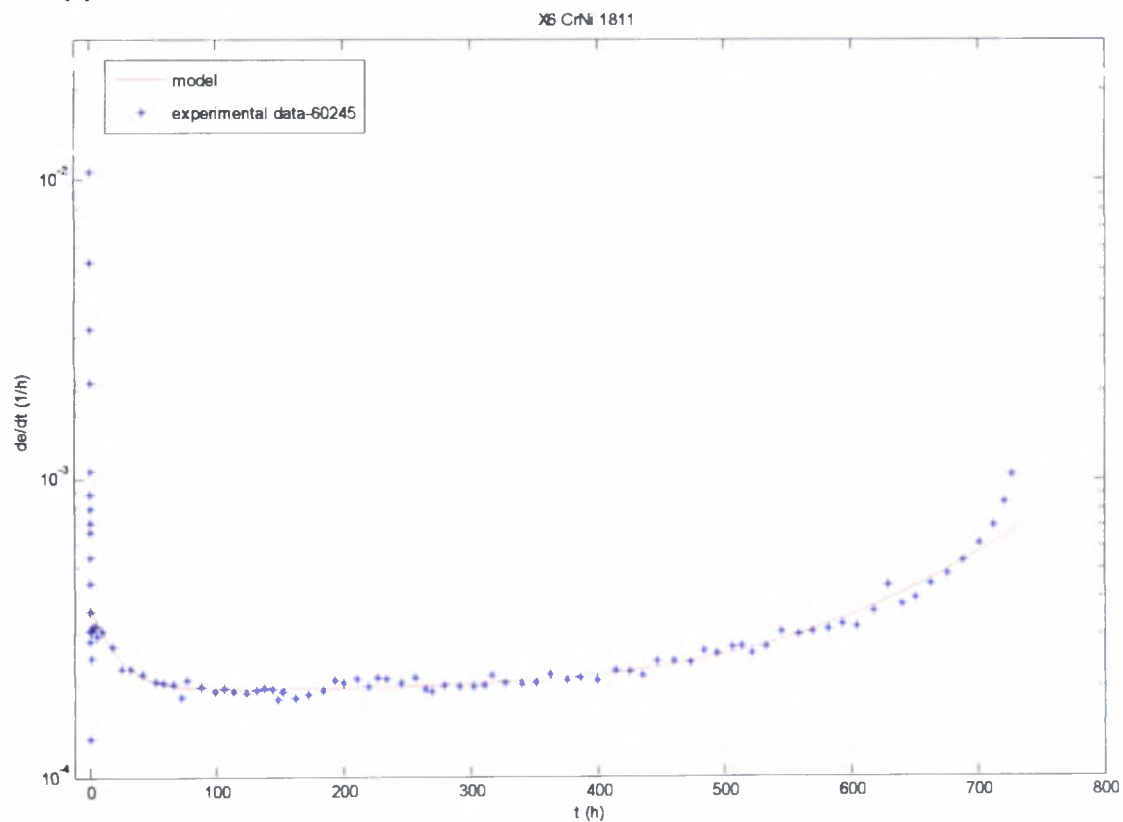


(β)

Σχ 4.20 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 90Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



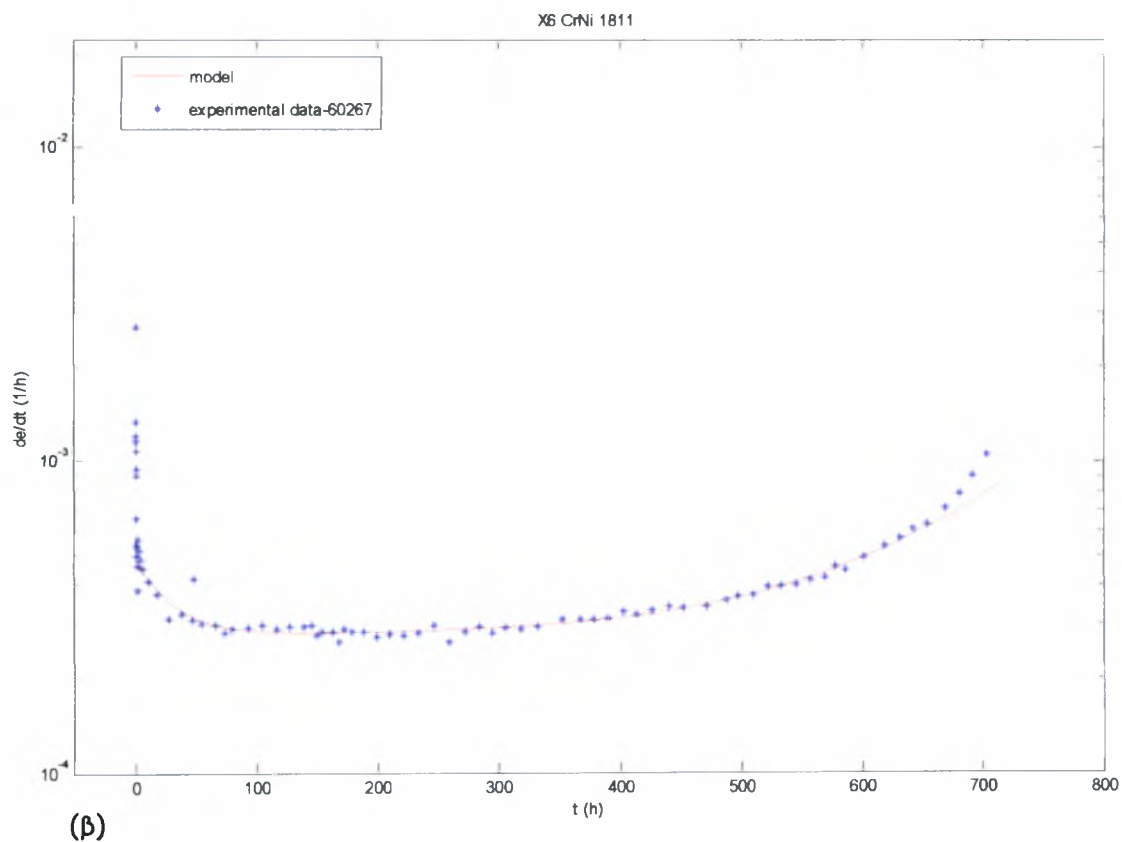
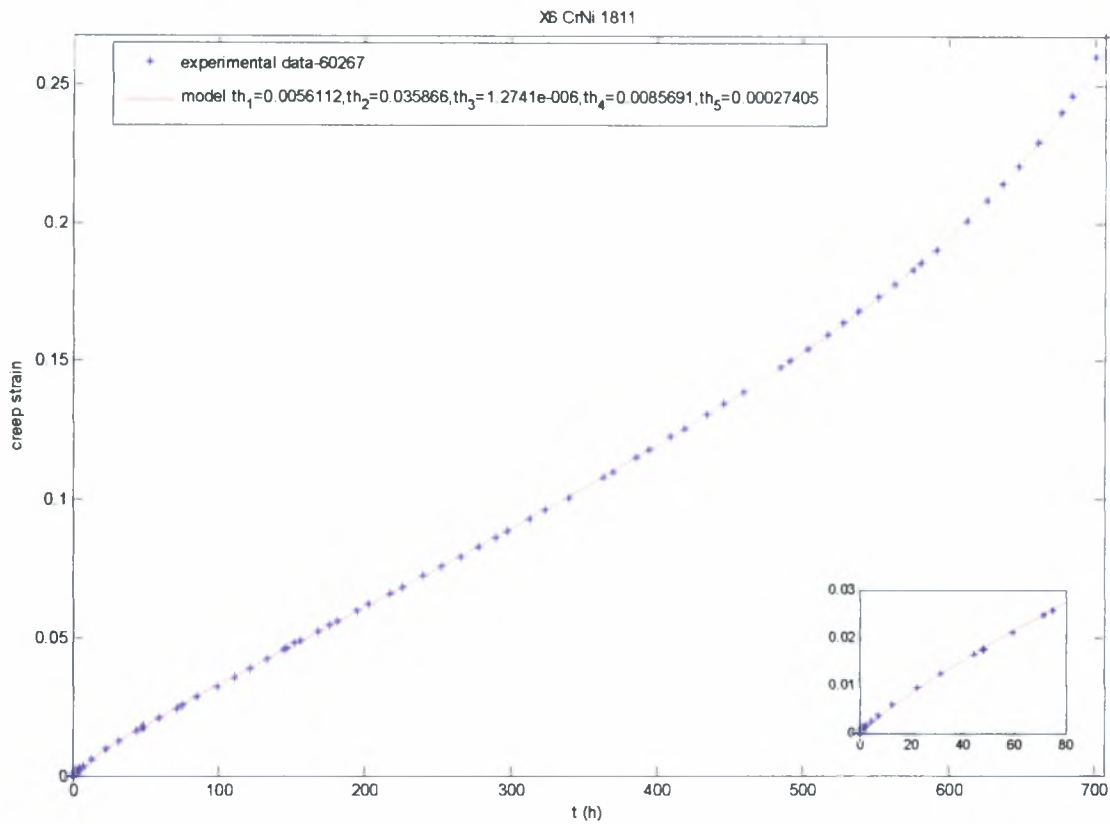
(a)



(β)

Σχ 4.21 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 90Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

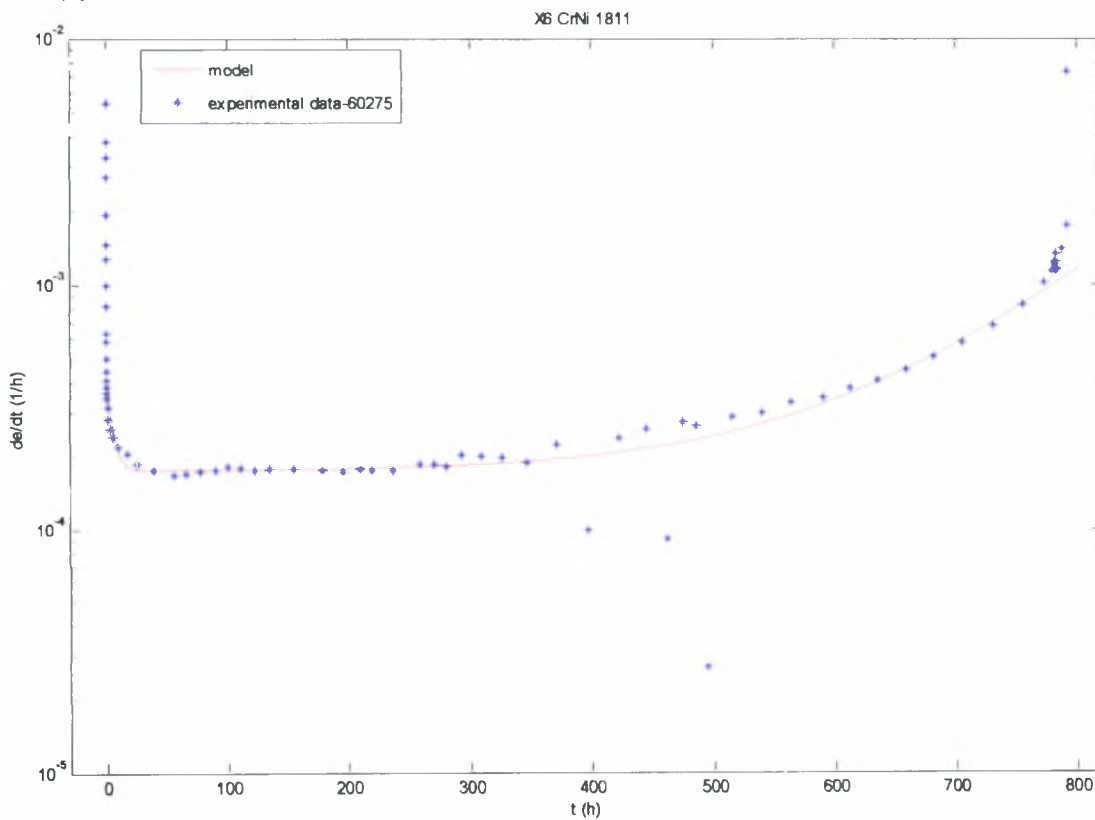
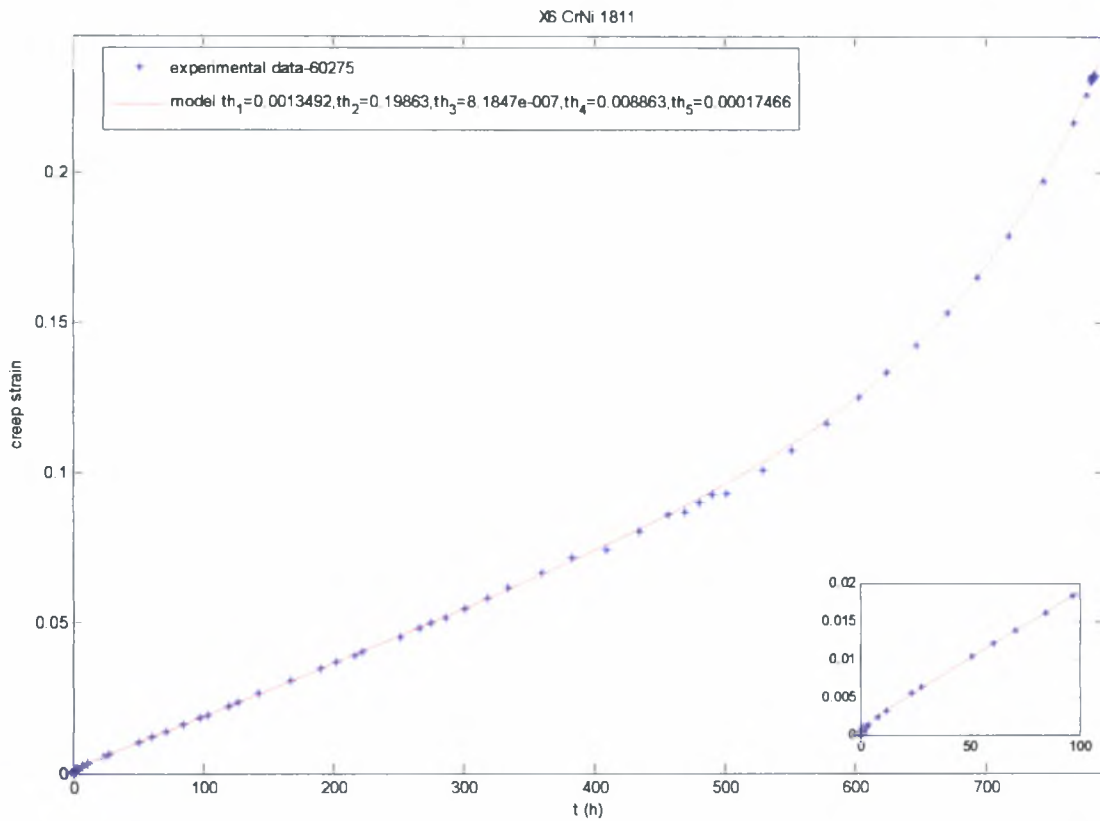
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



**Σχ 4.22** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 90Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

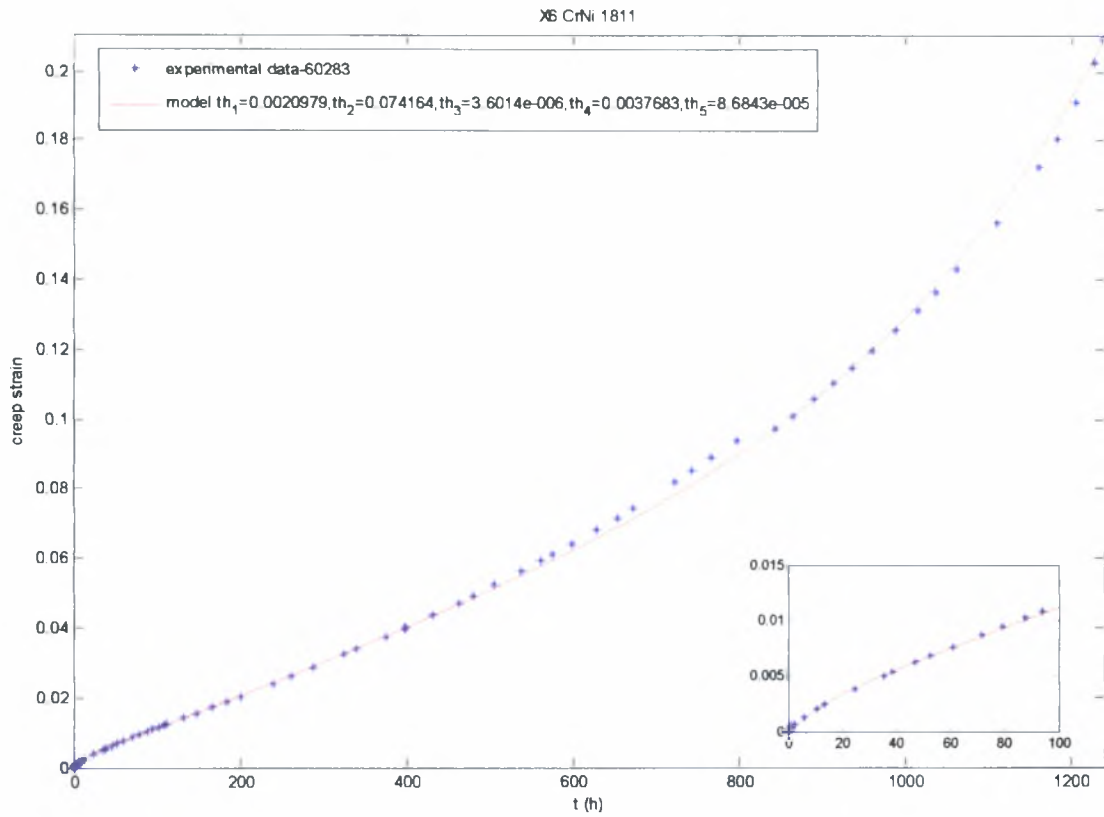
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



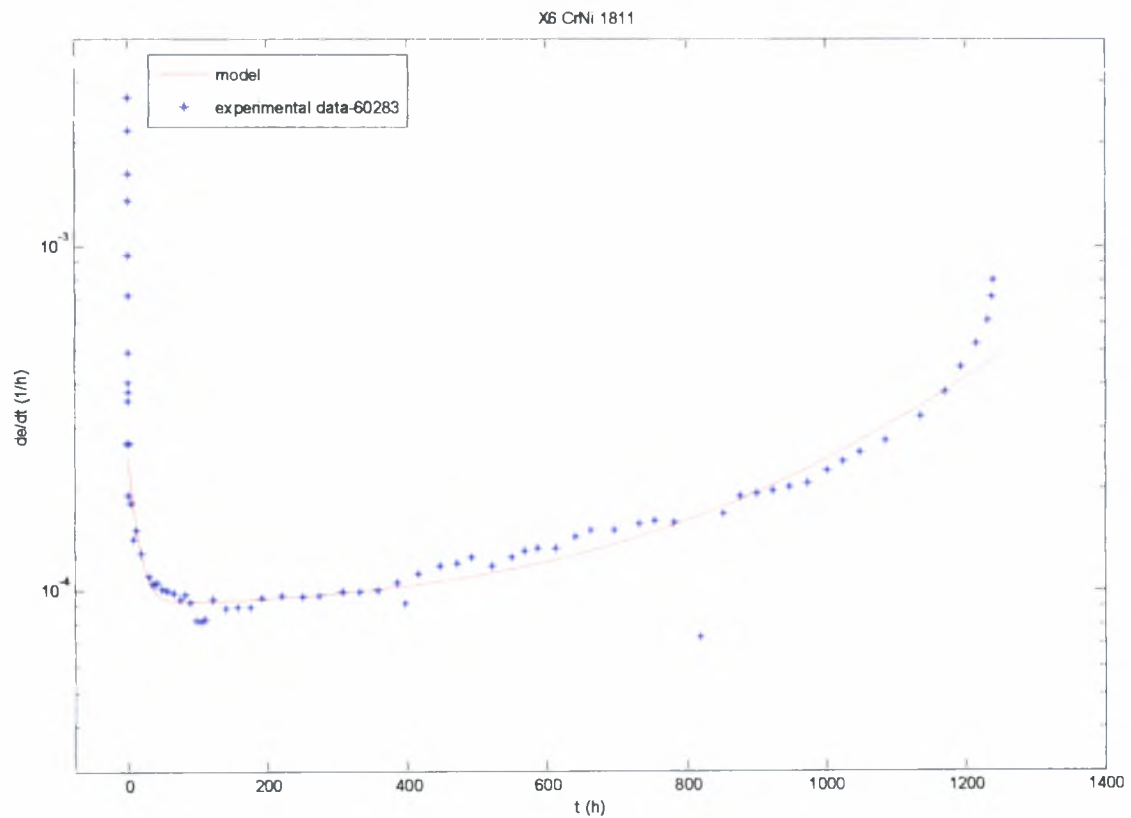


**Σχ 4.23** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συνάρτησε του χρόνου σε τάση 90Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συνάρτησε του χρόνου.



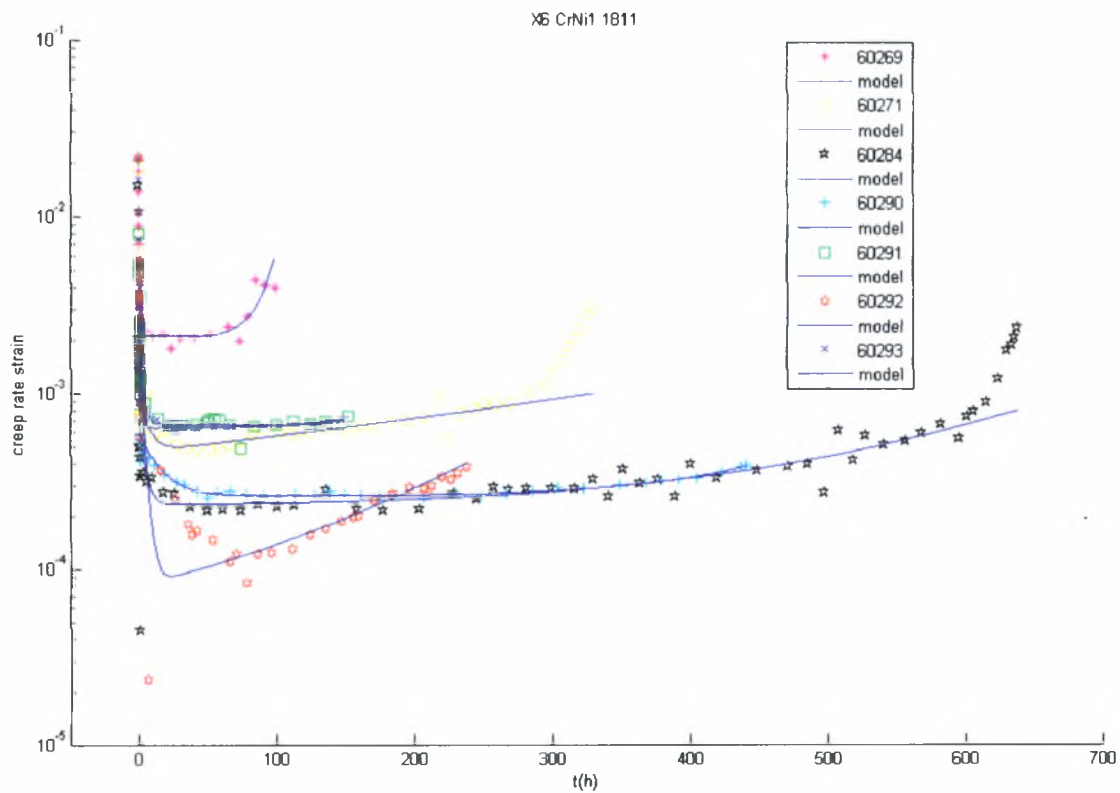
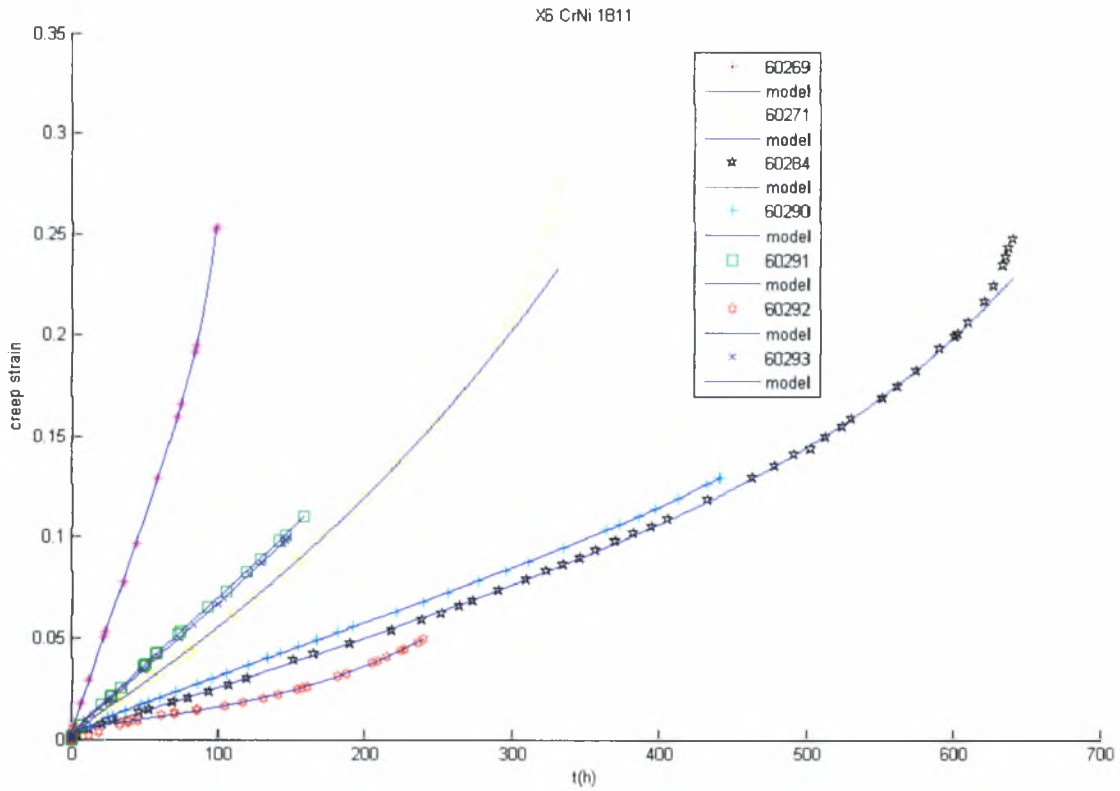
(α)



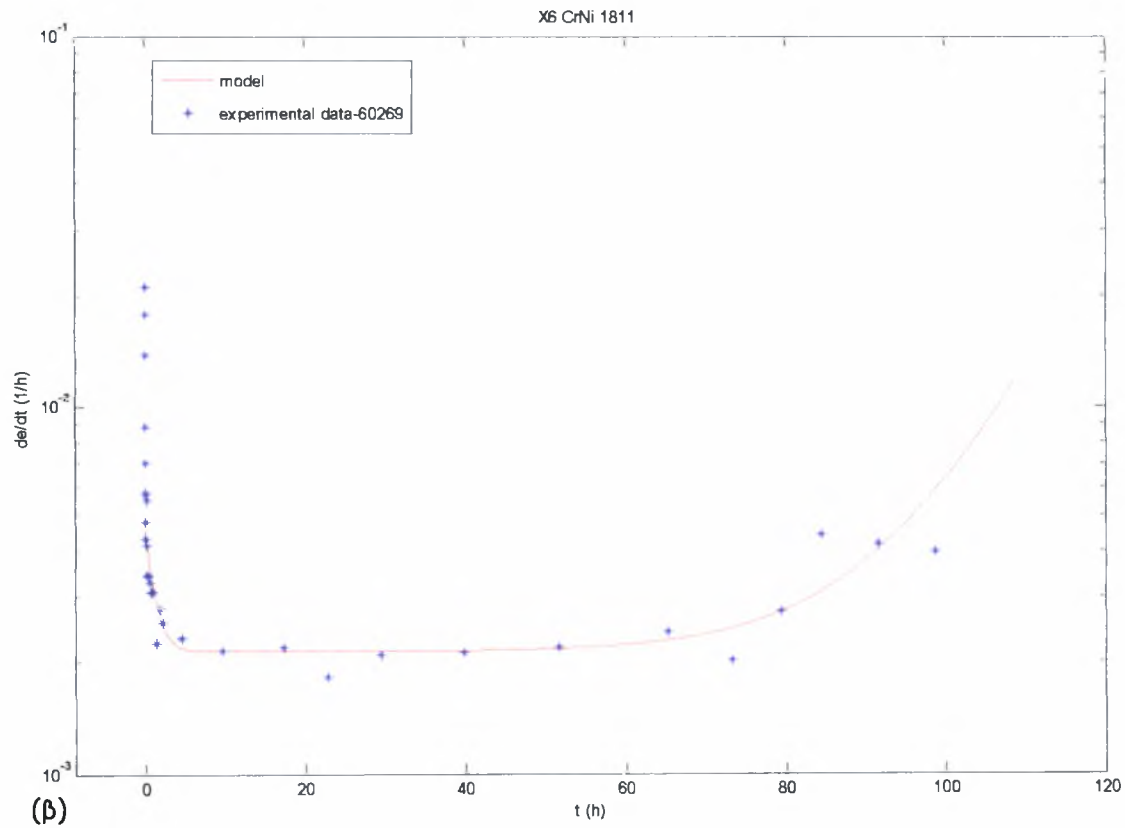
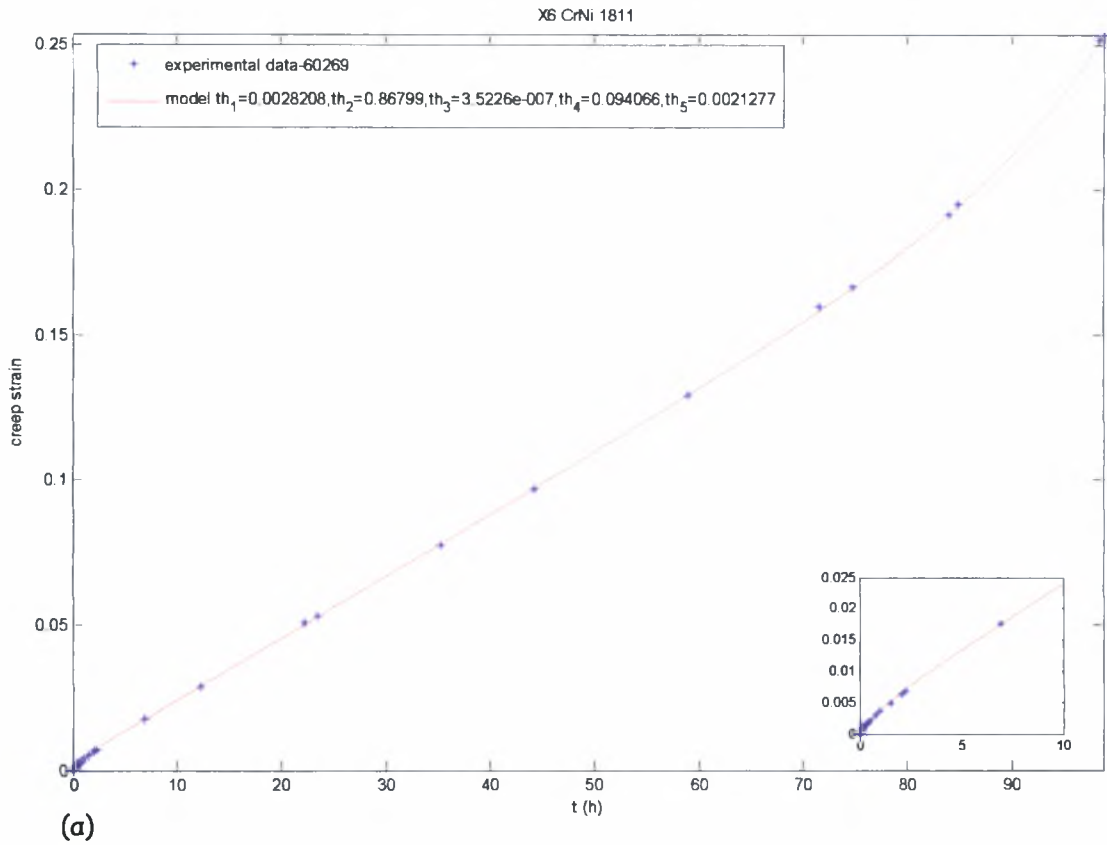
(β)

Σχ 4.24 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 90Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

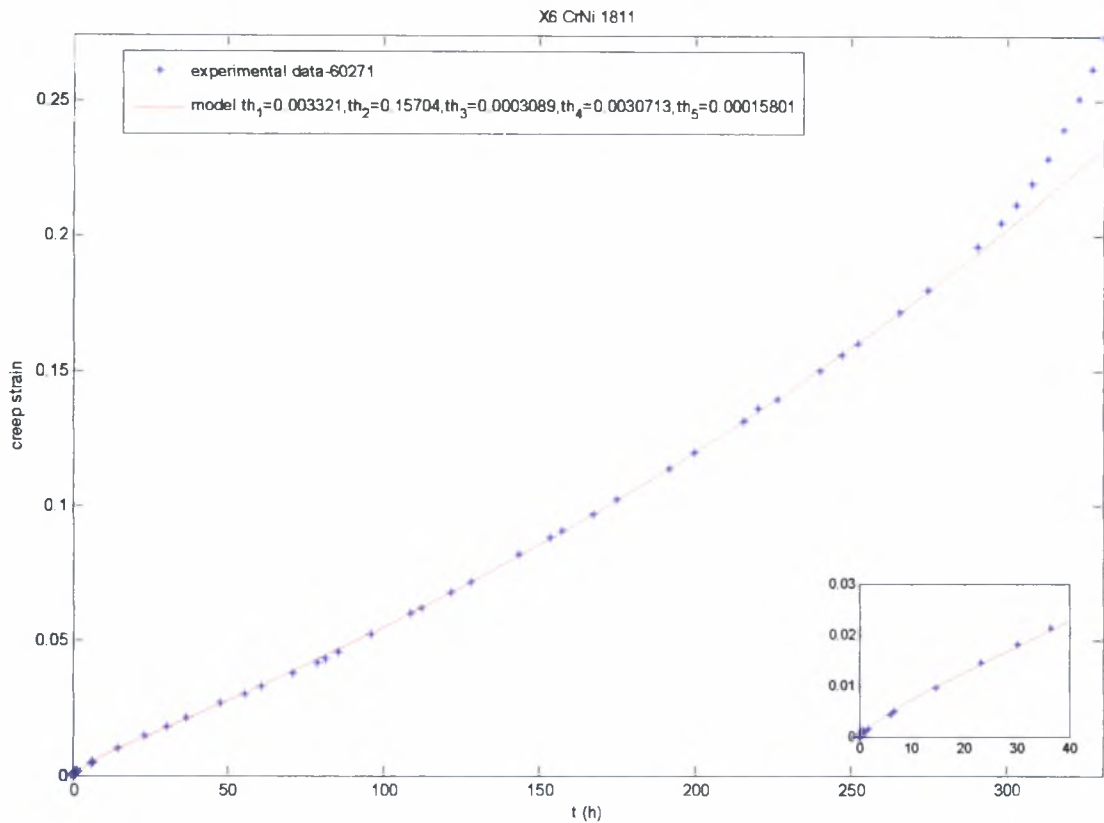
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



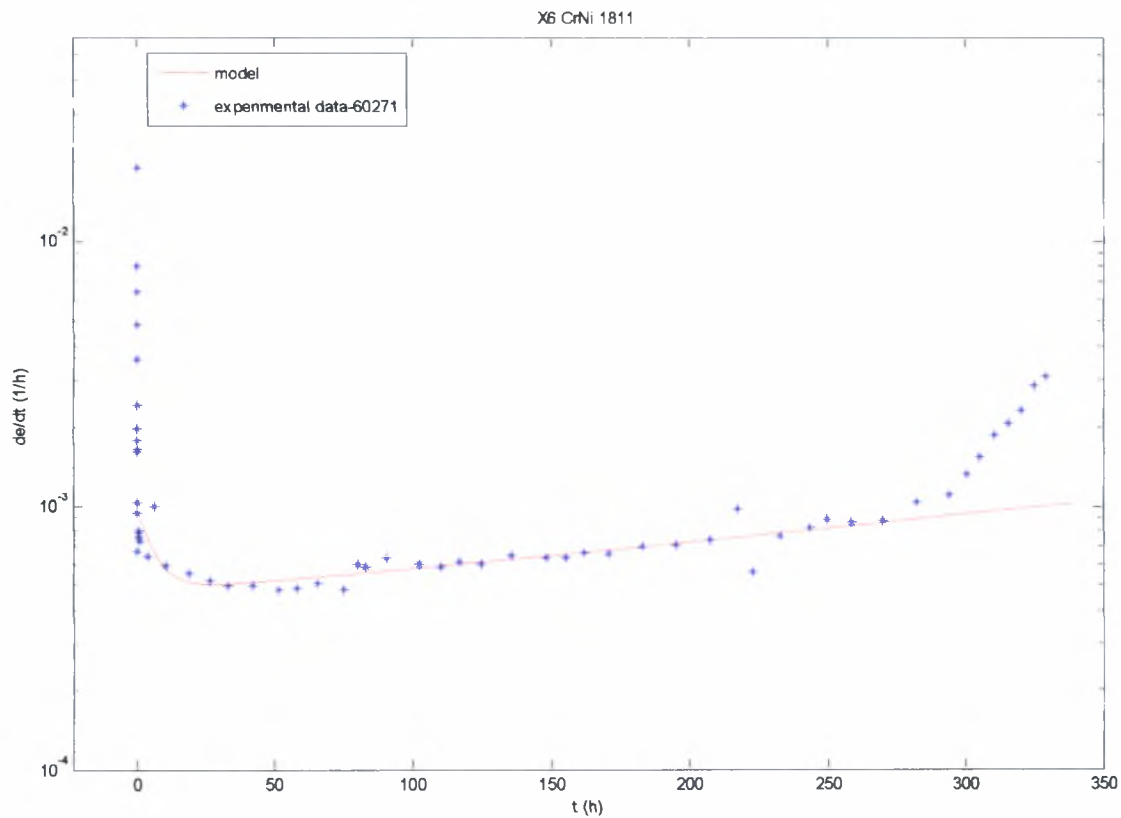
**Σχ 4.25** Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 100Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .



Σχ 4.26 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 100Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



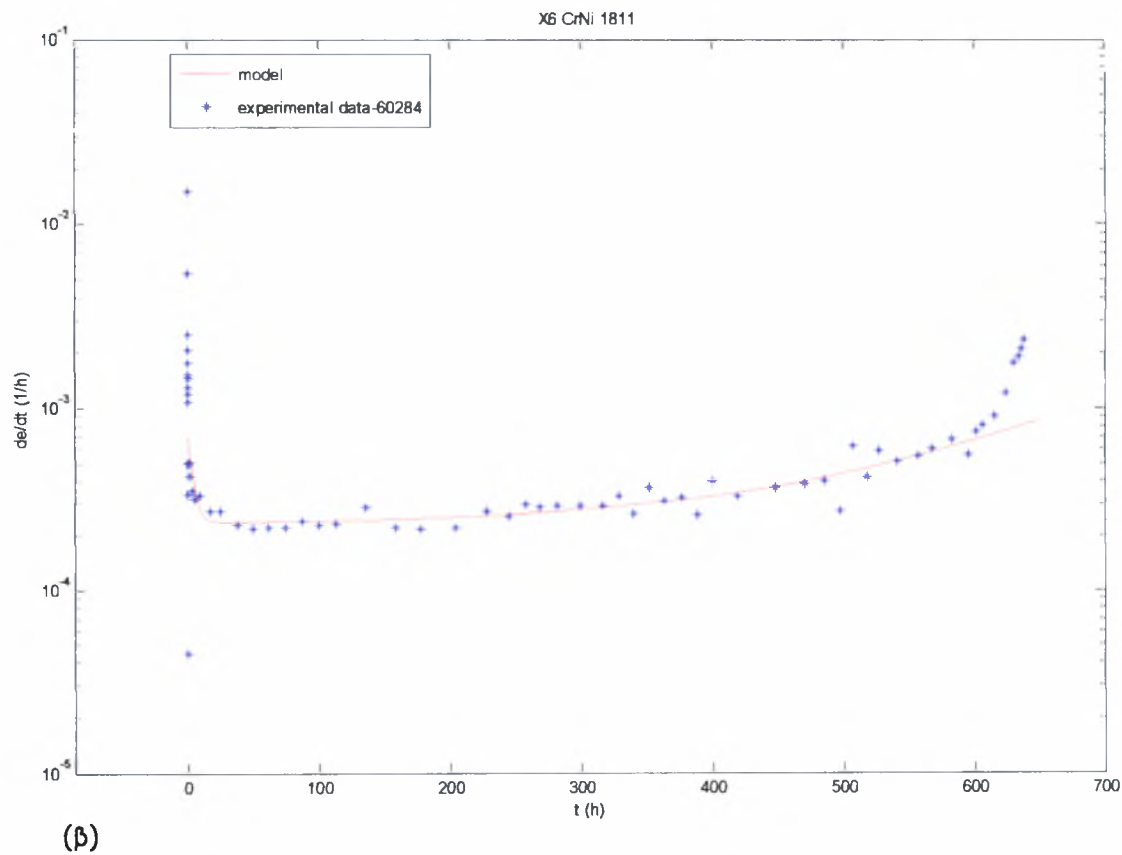
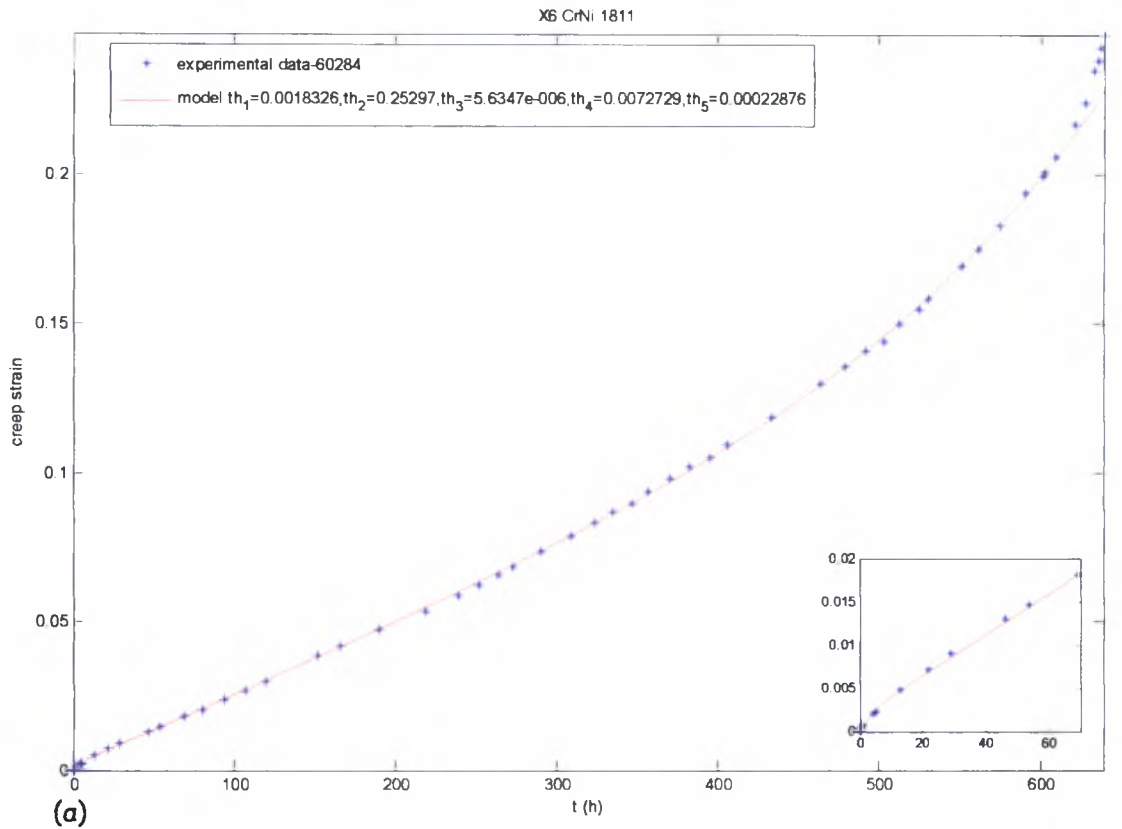
(a)



(β)

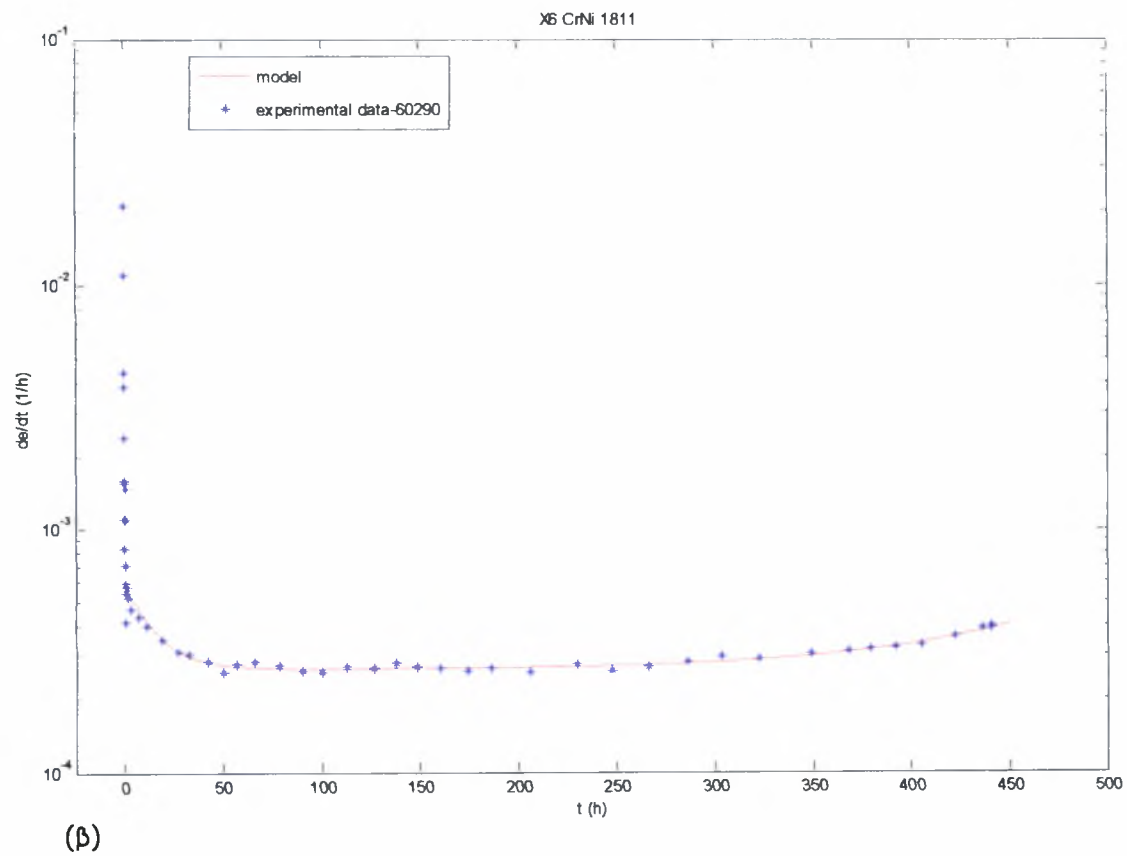
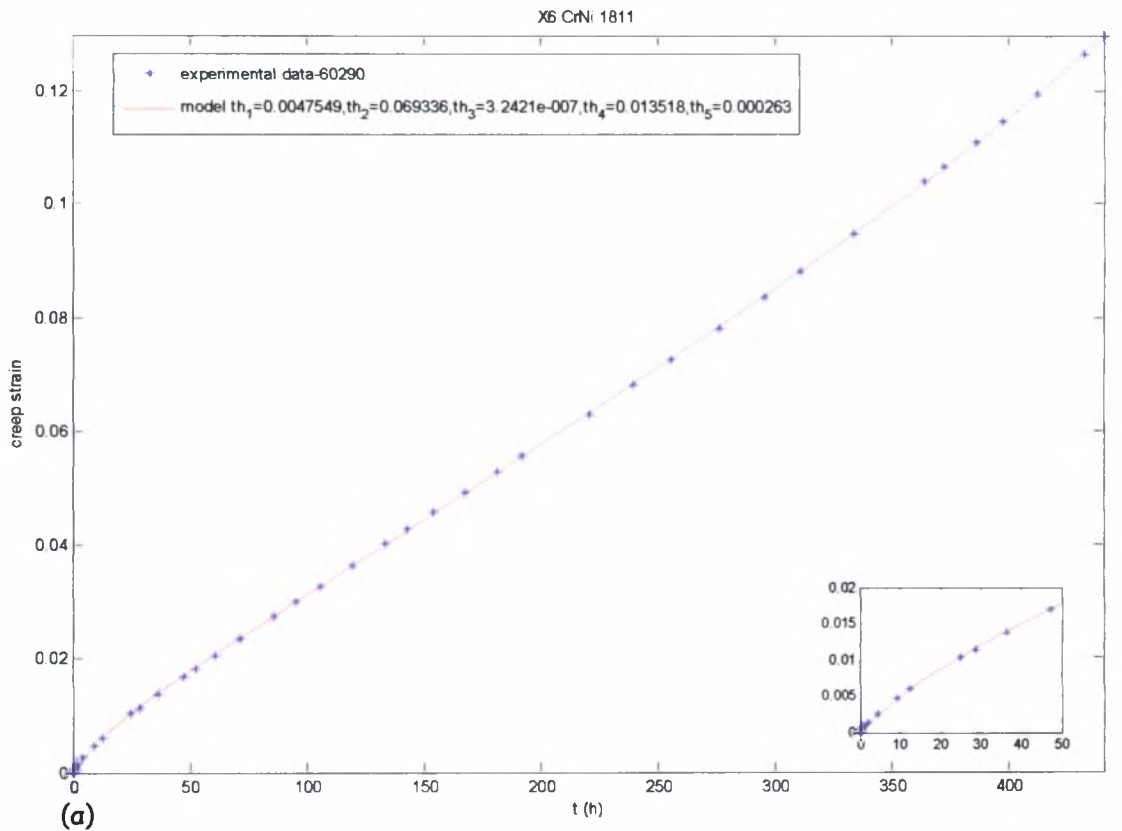
**Σχ 4.27** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 100Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

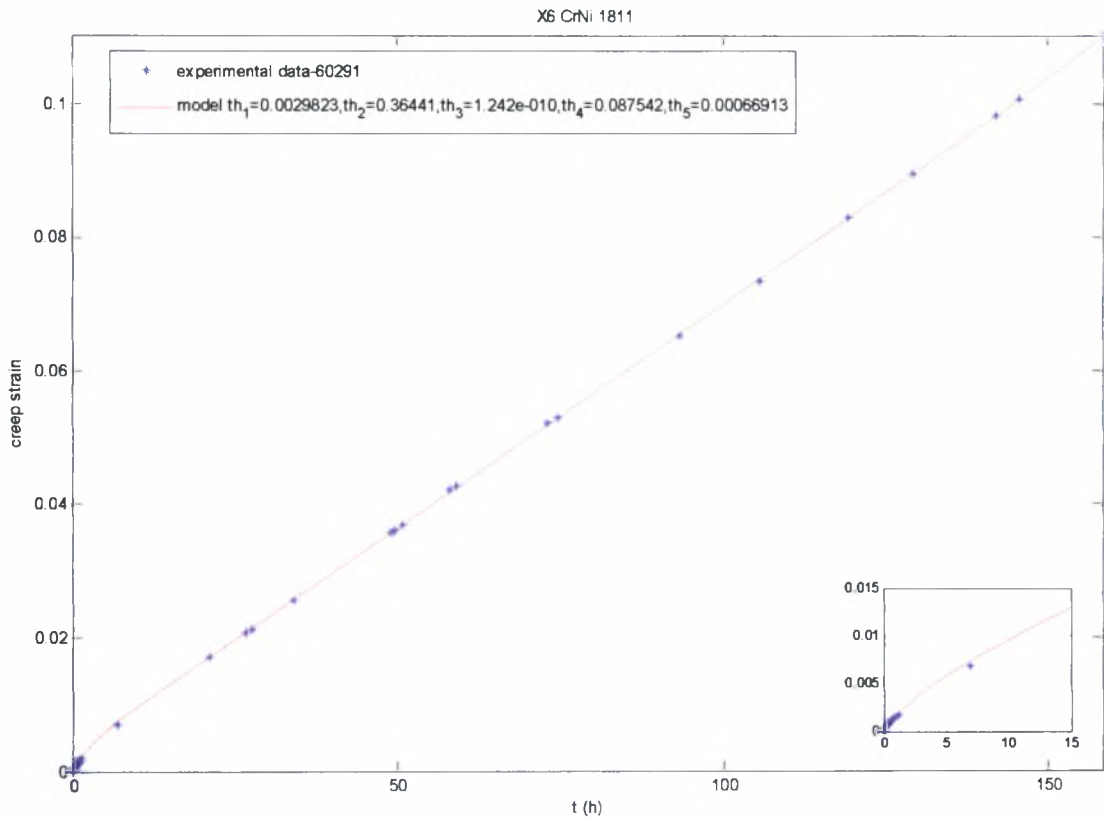


**Σχ 4.28** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 100Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

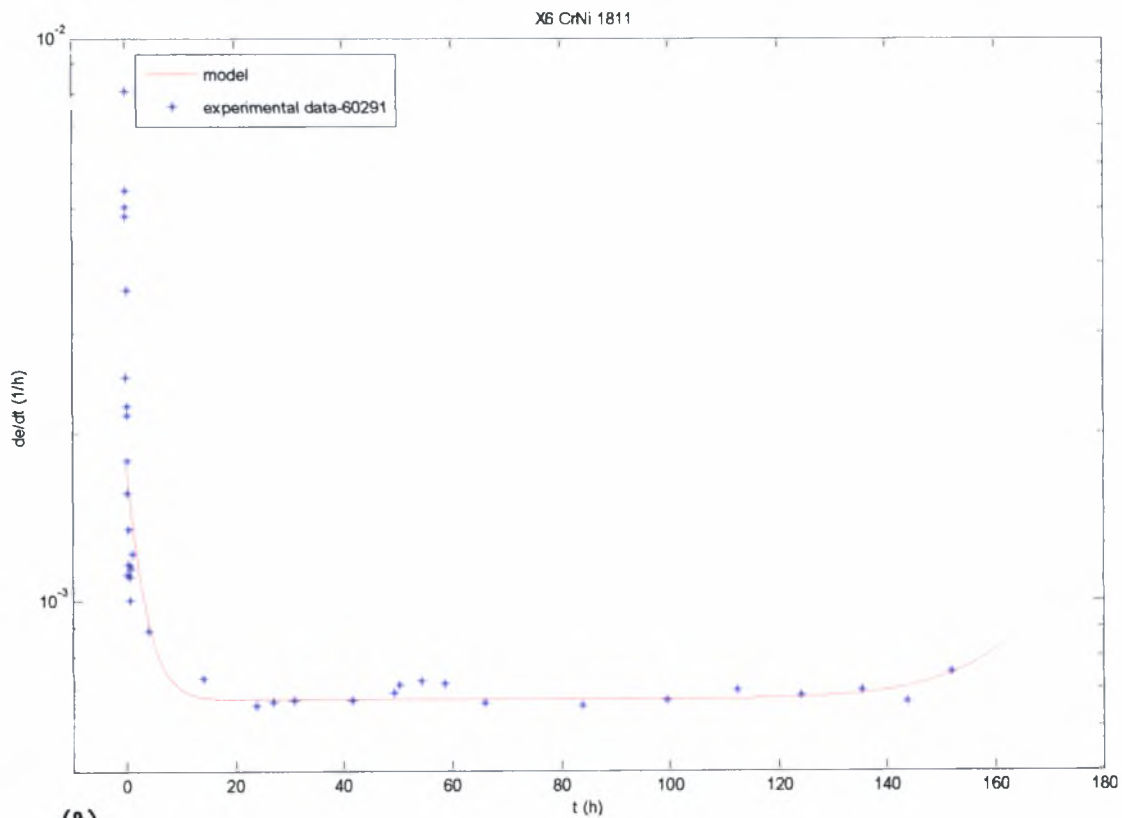
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



Σχ 4.29 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 100Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



(a)

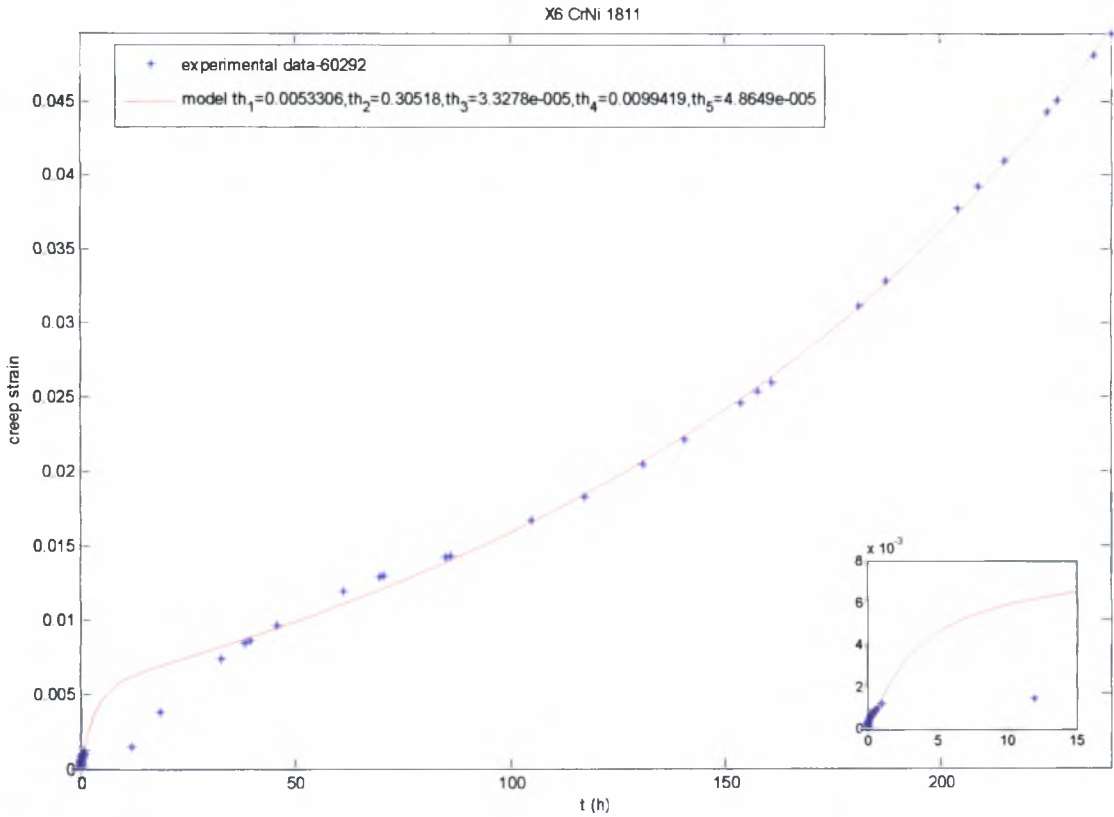


(b)

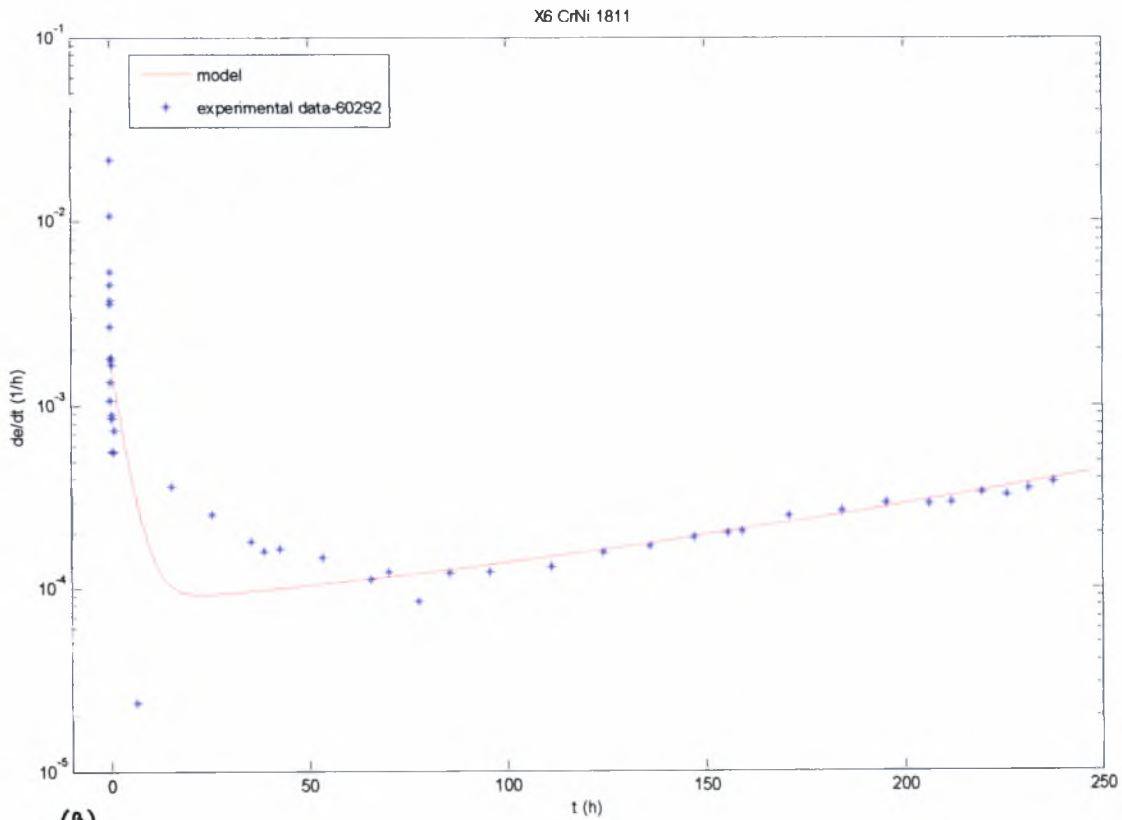
Σχ 4.30 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 100Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



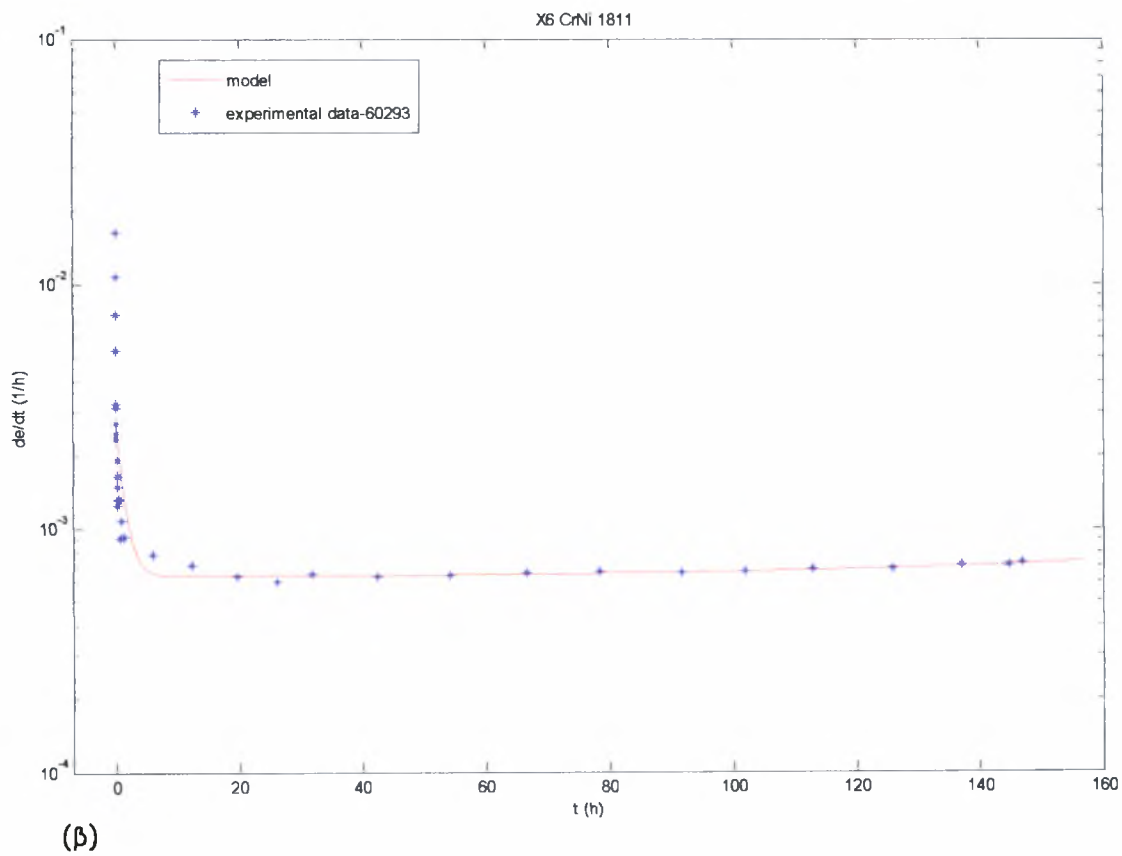
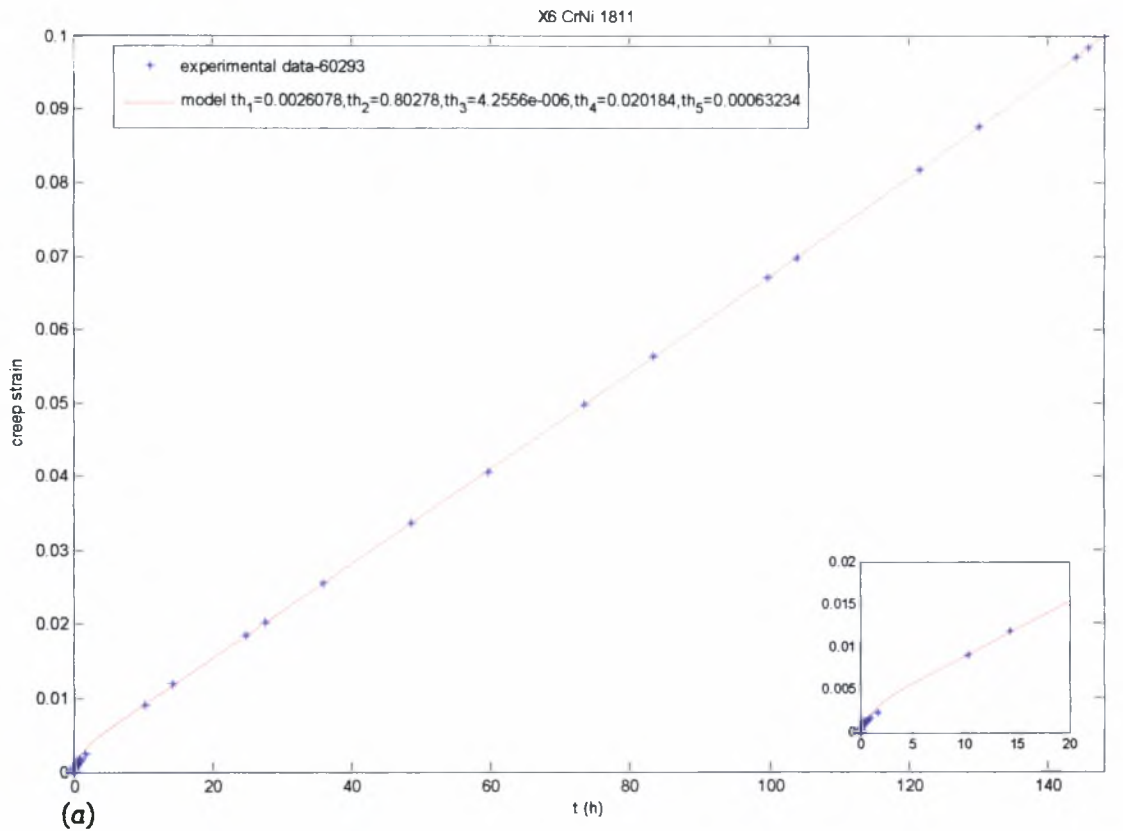


(a)

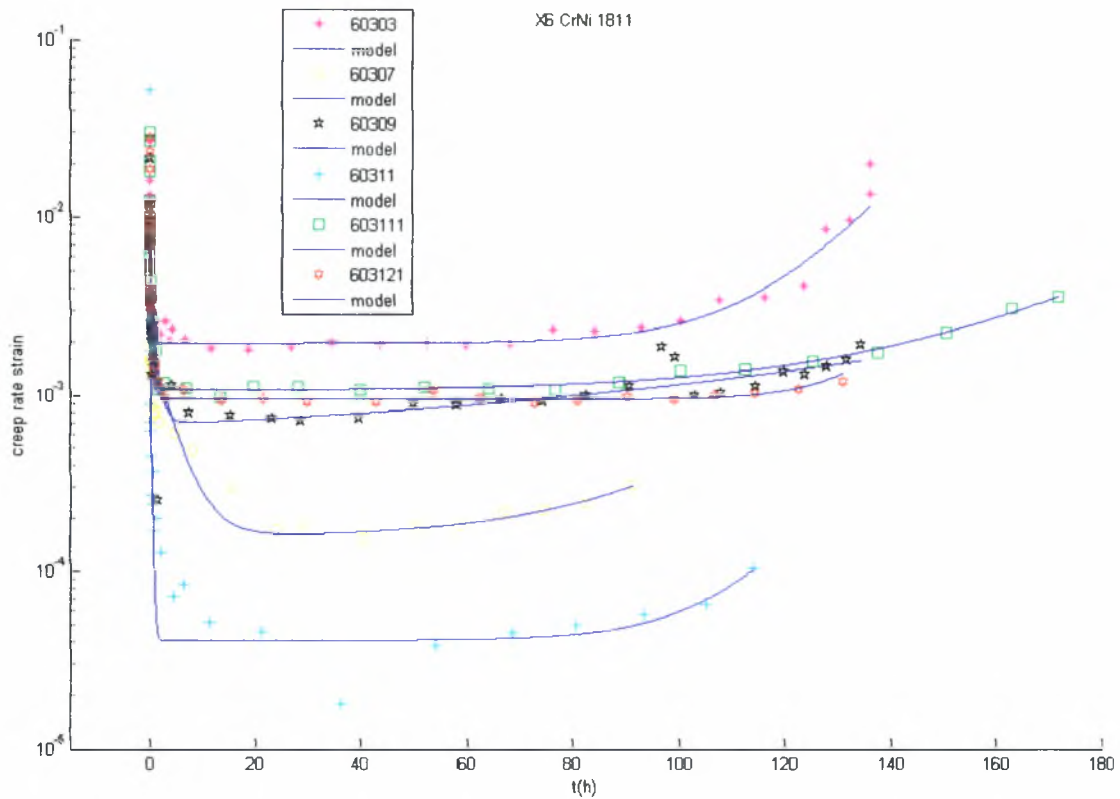
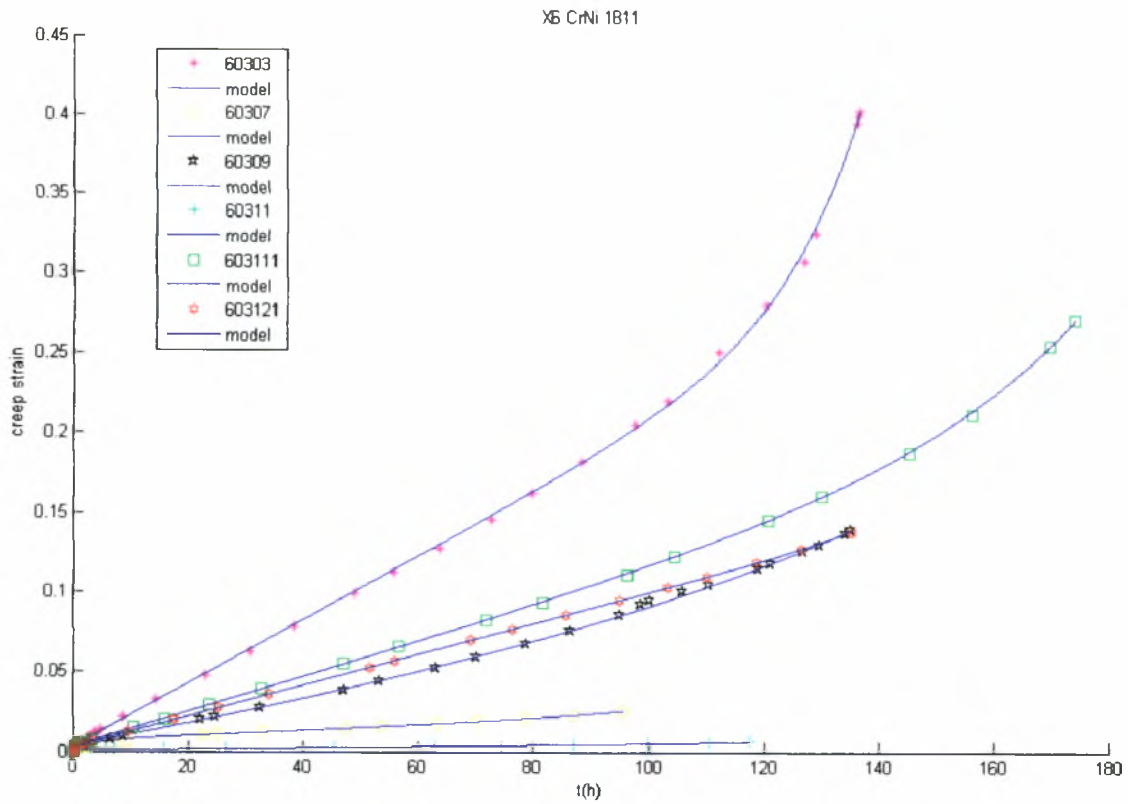


(β)

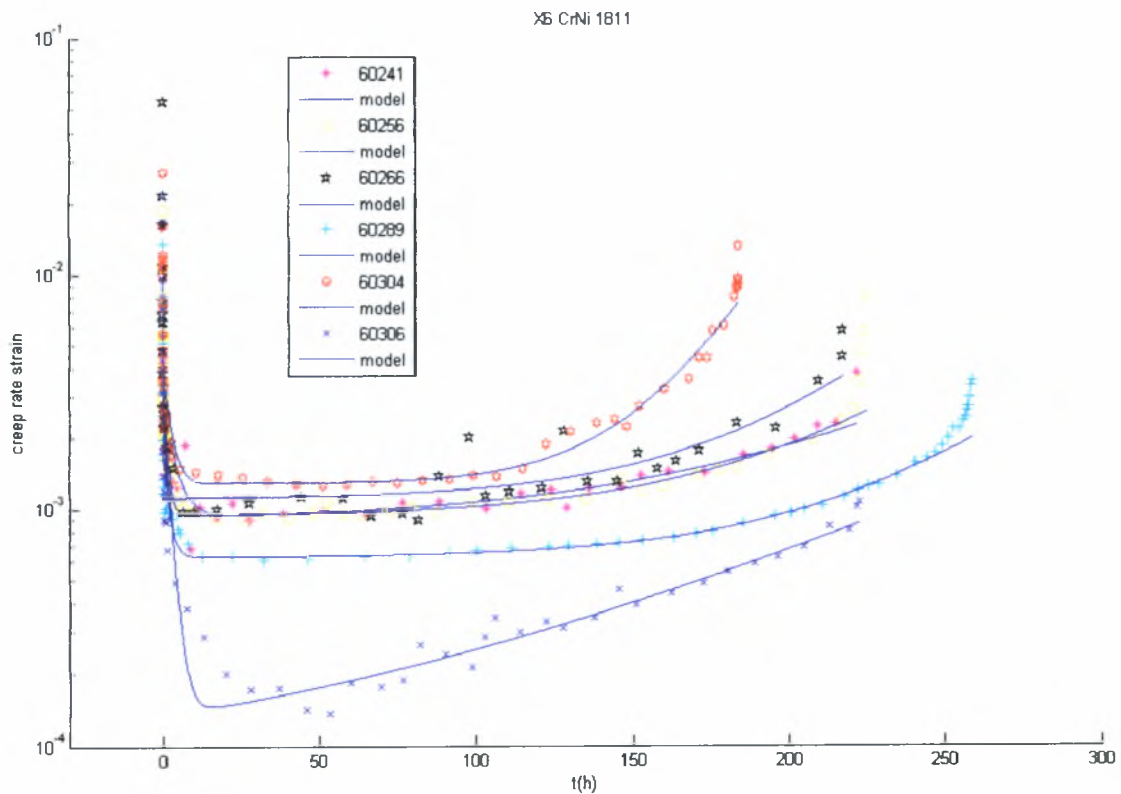
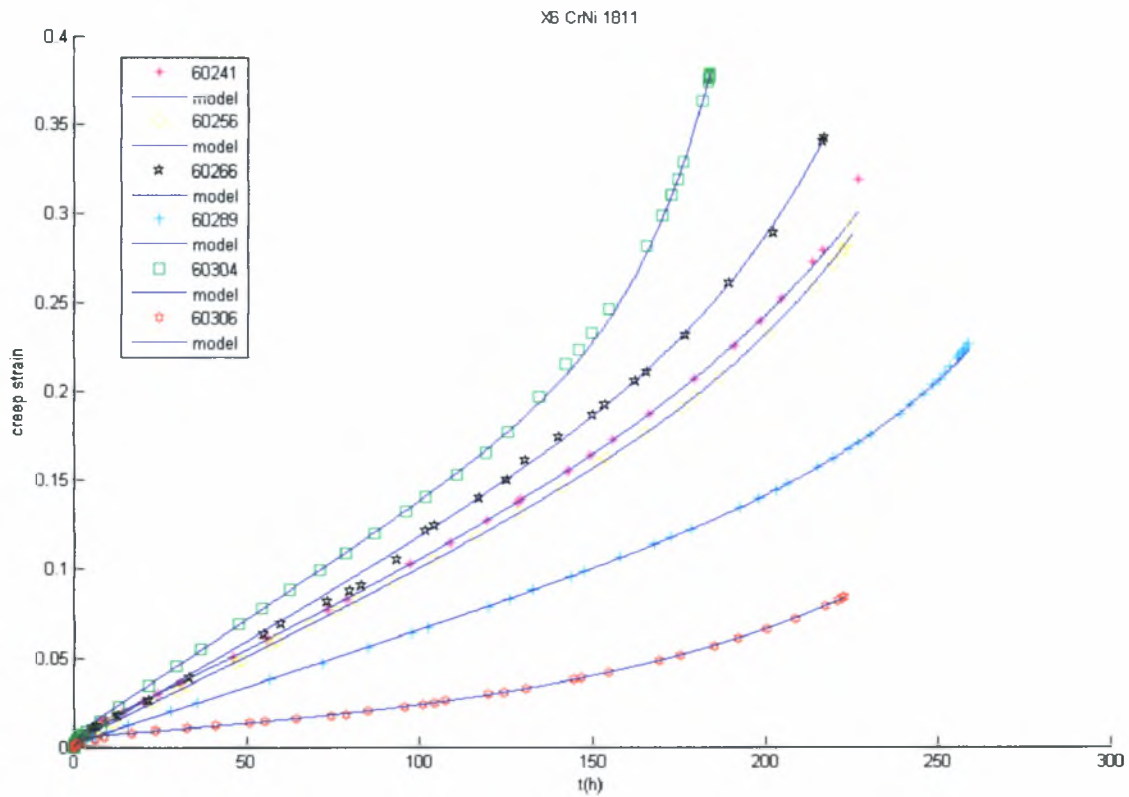
Σχ 4.31 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 100Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



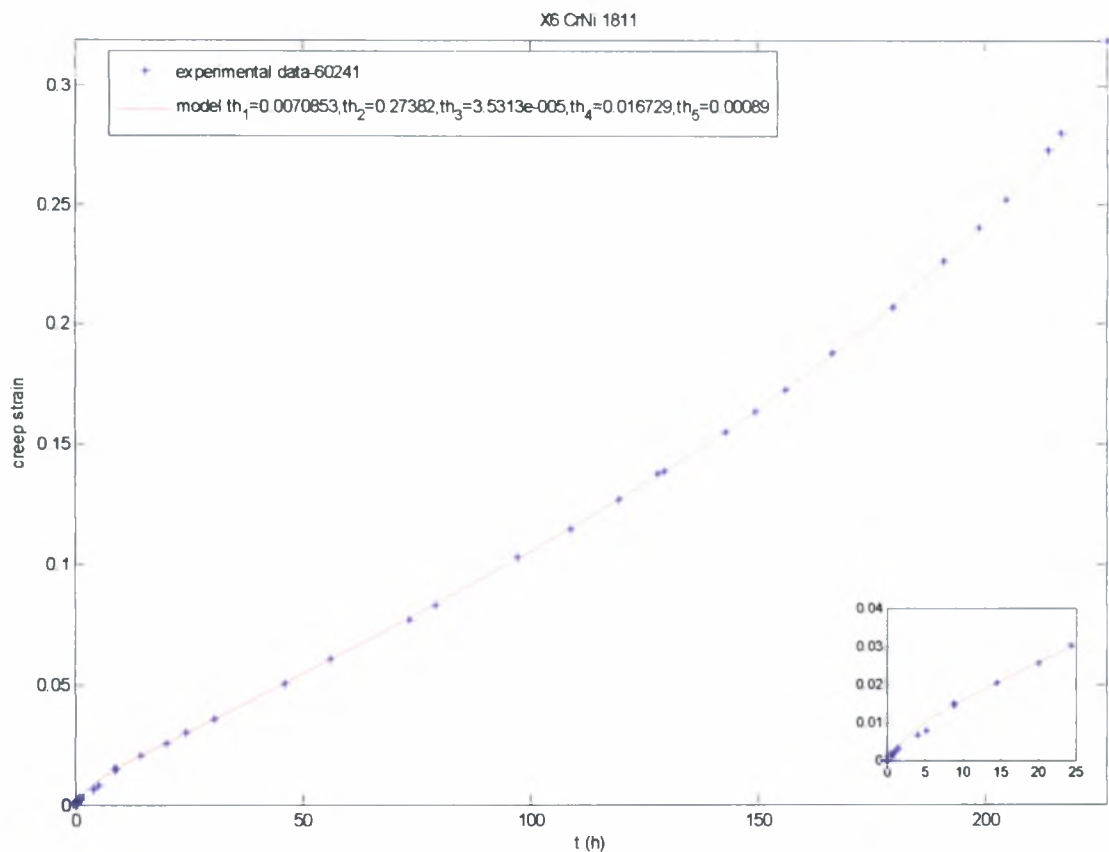
**Σχ 4.32** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 100Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



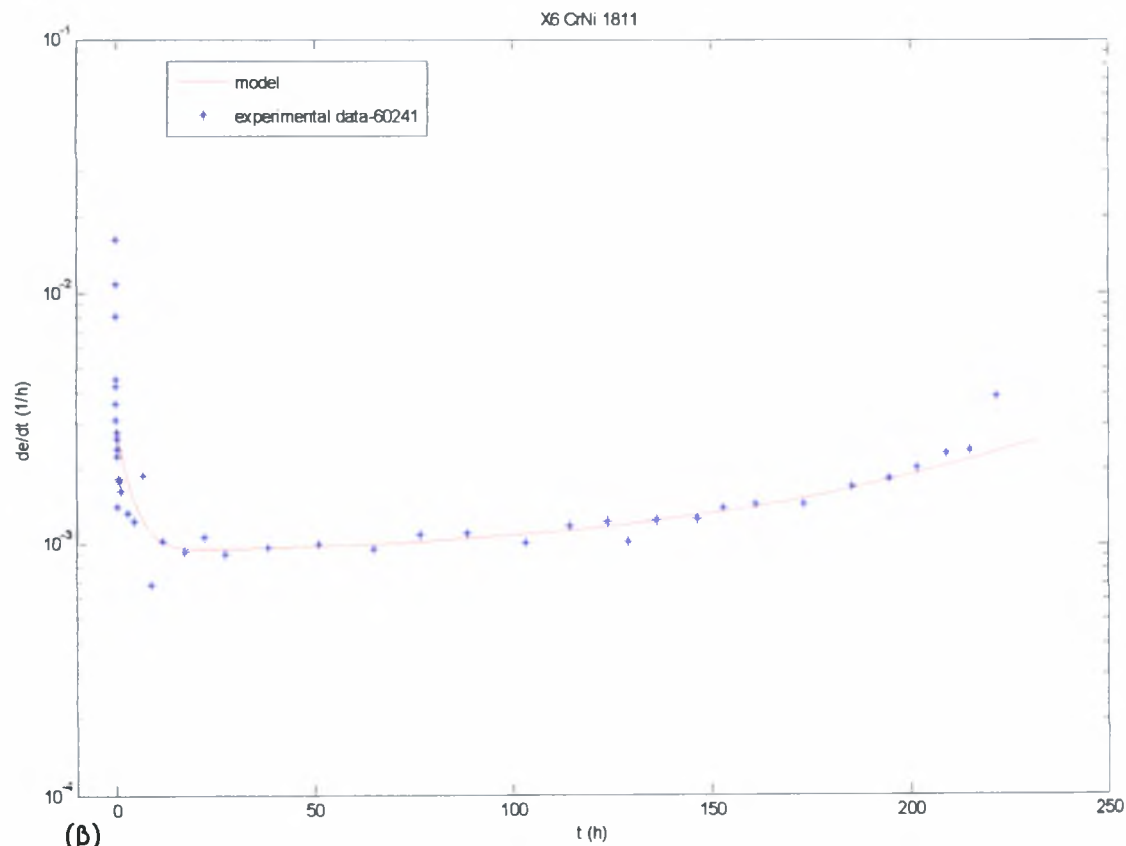
**Σχ 4.33** Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.



**Σχ 4.34** Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.



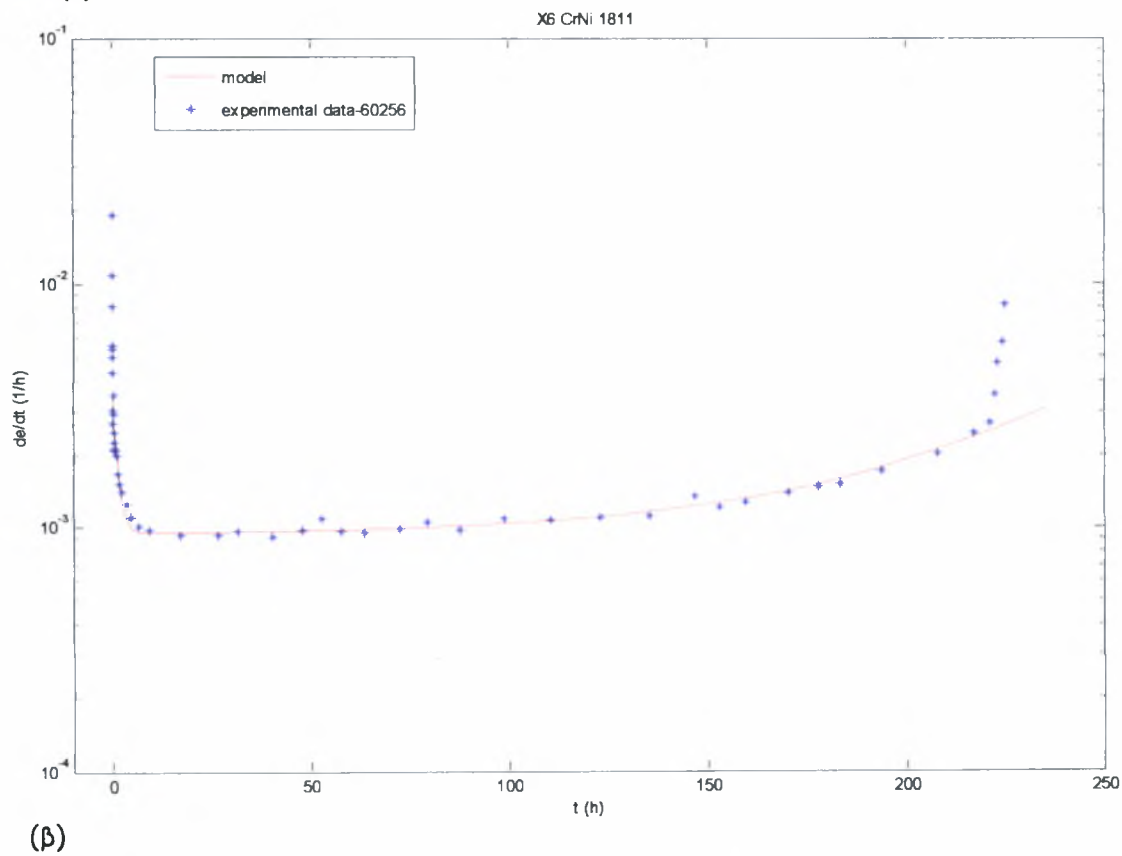
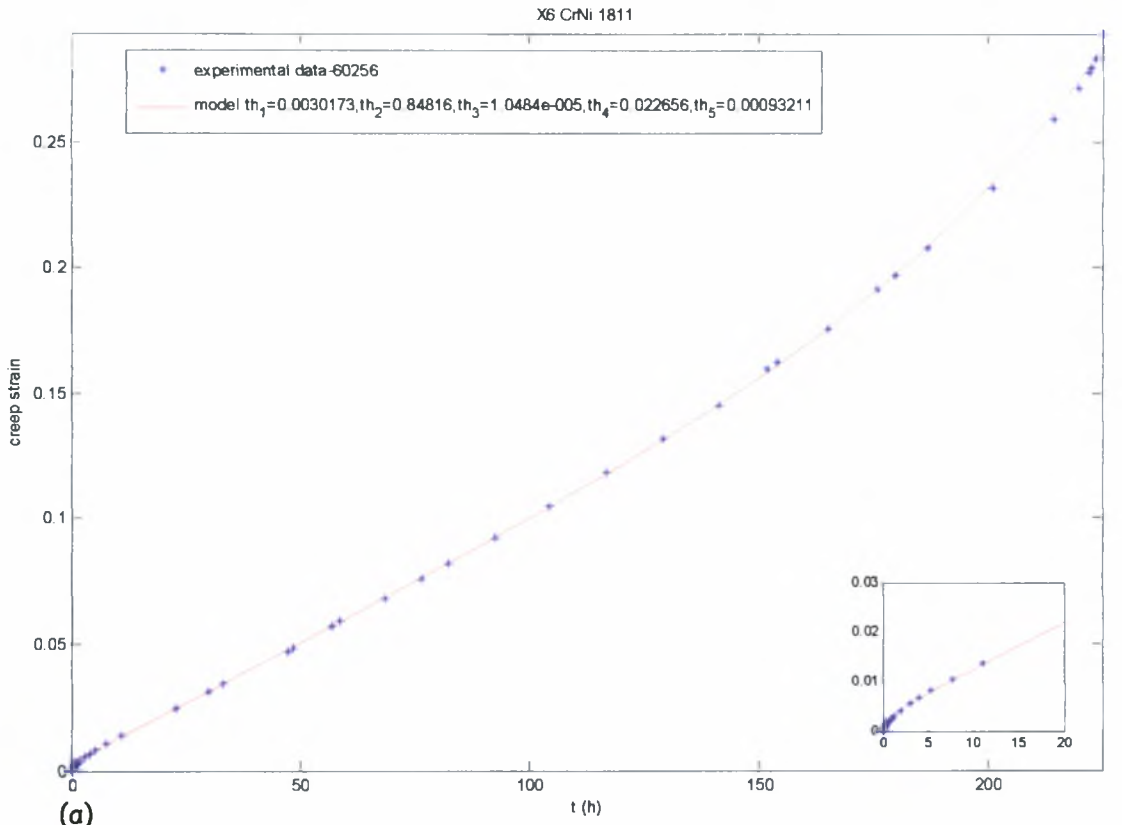
(α)



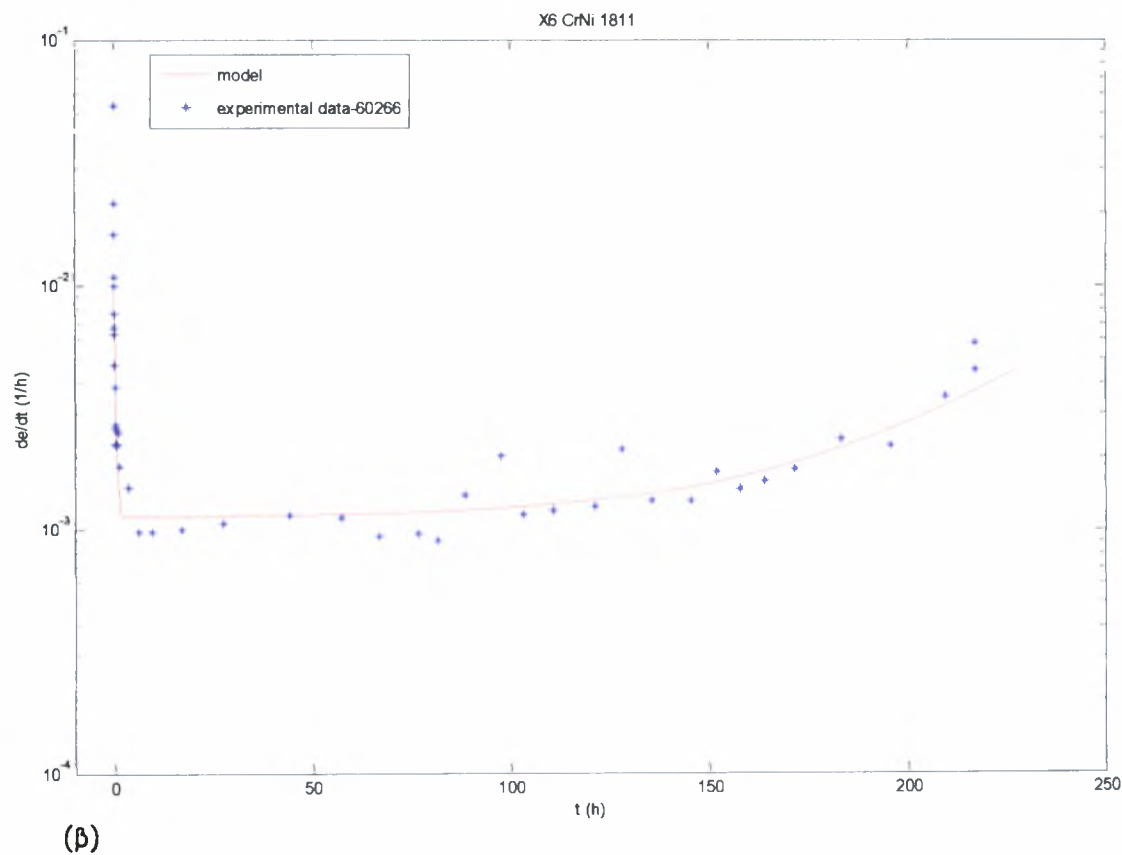
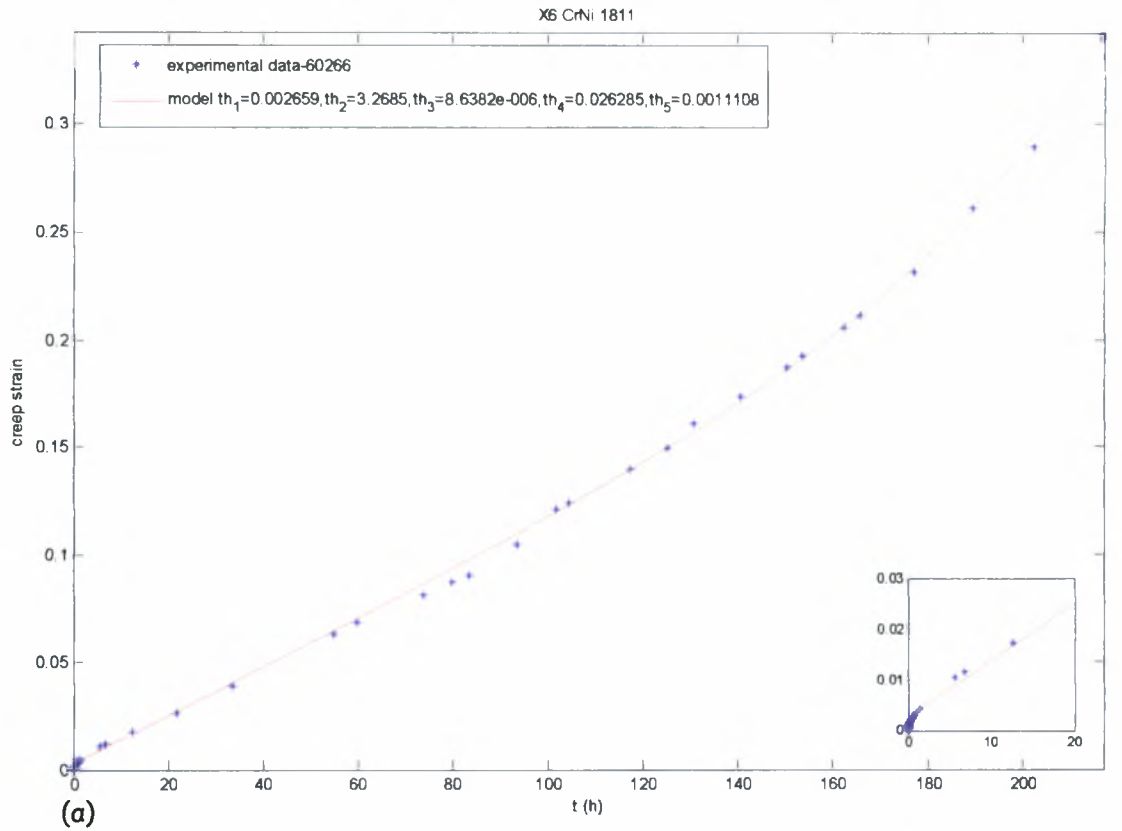
(β)

**Σχ 4.35** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

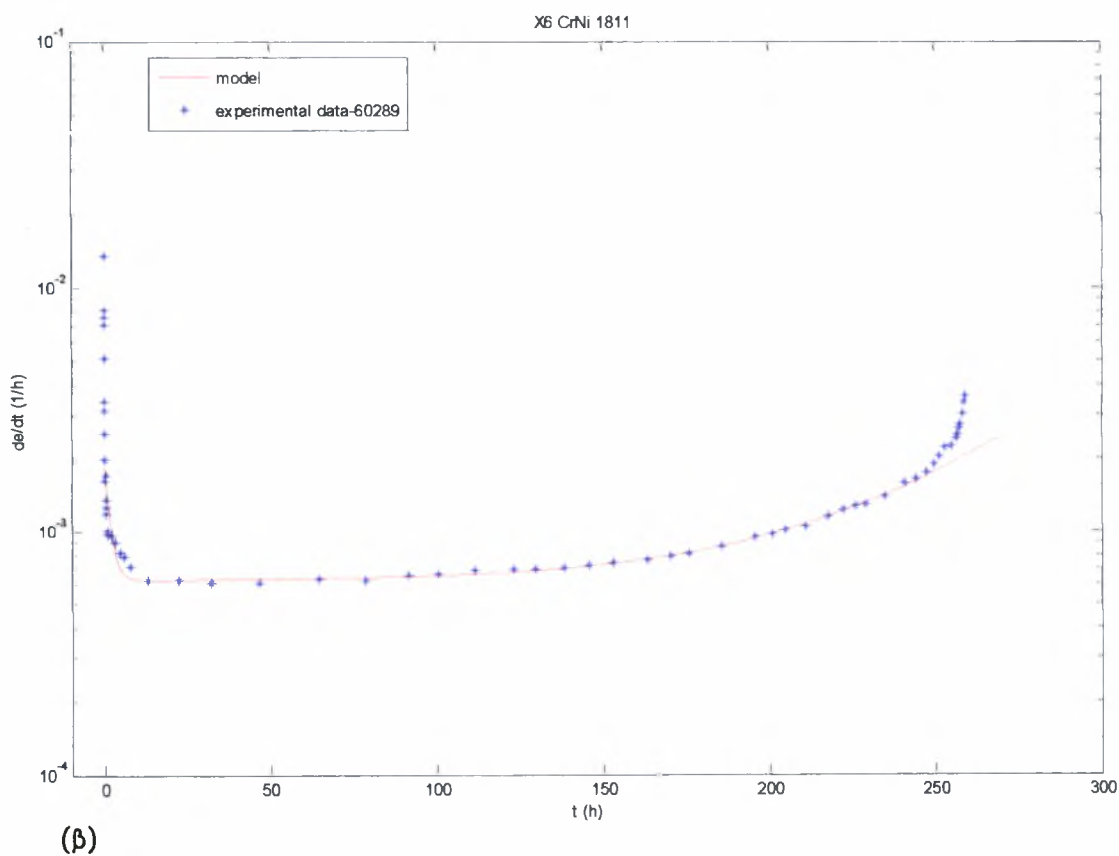
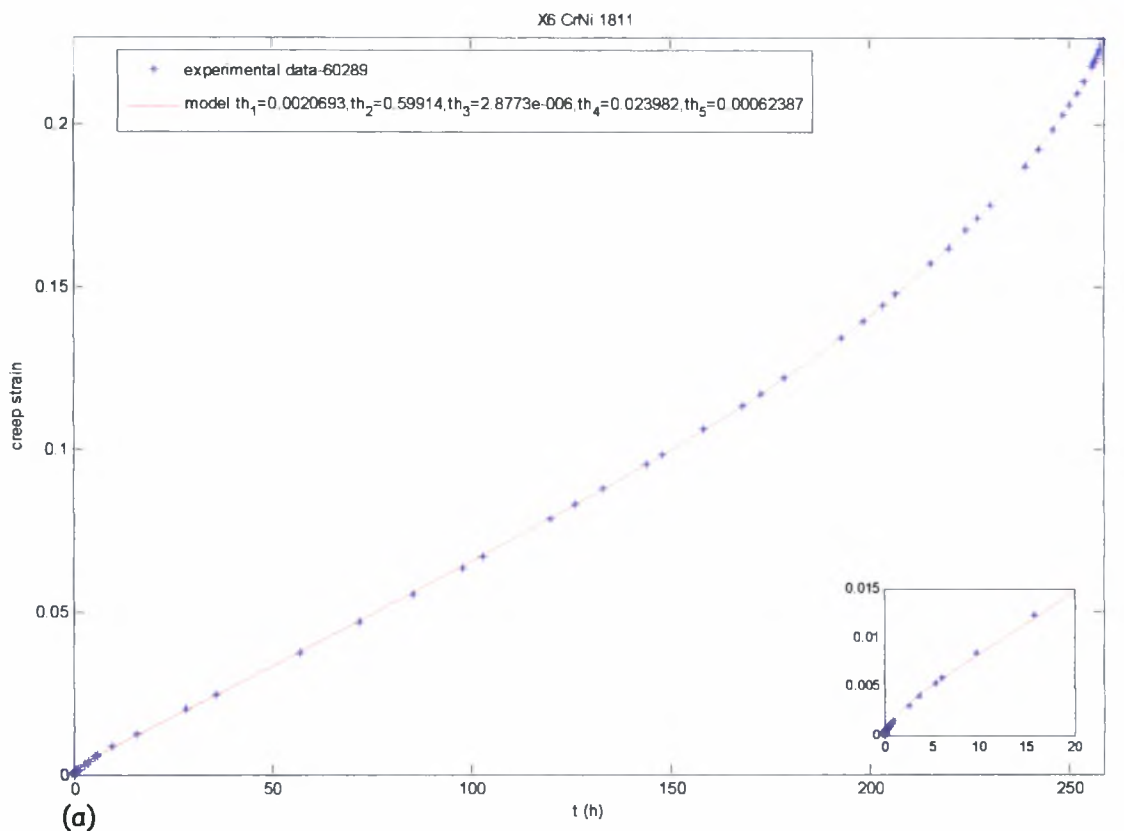
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



**Σχ 4.36** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

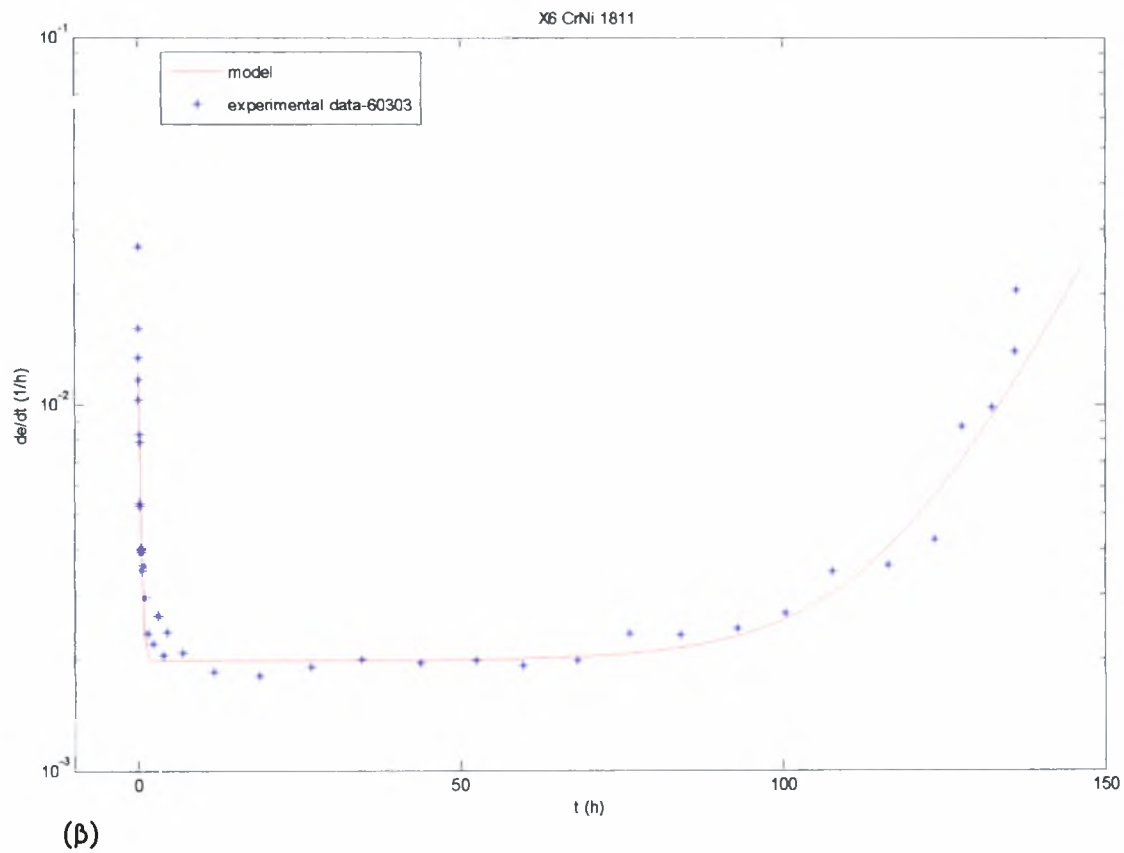
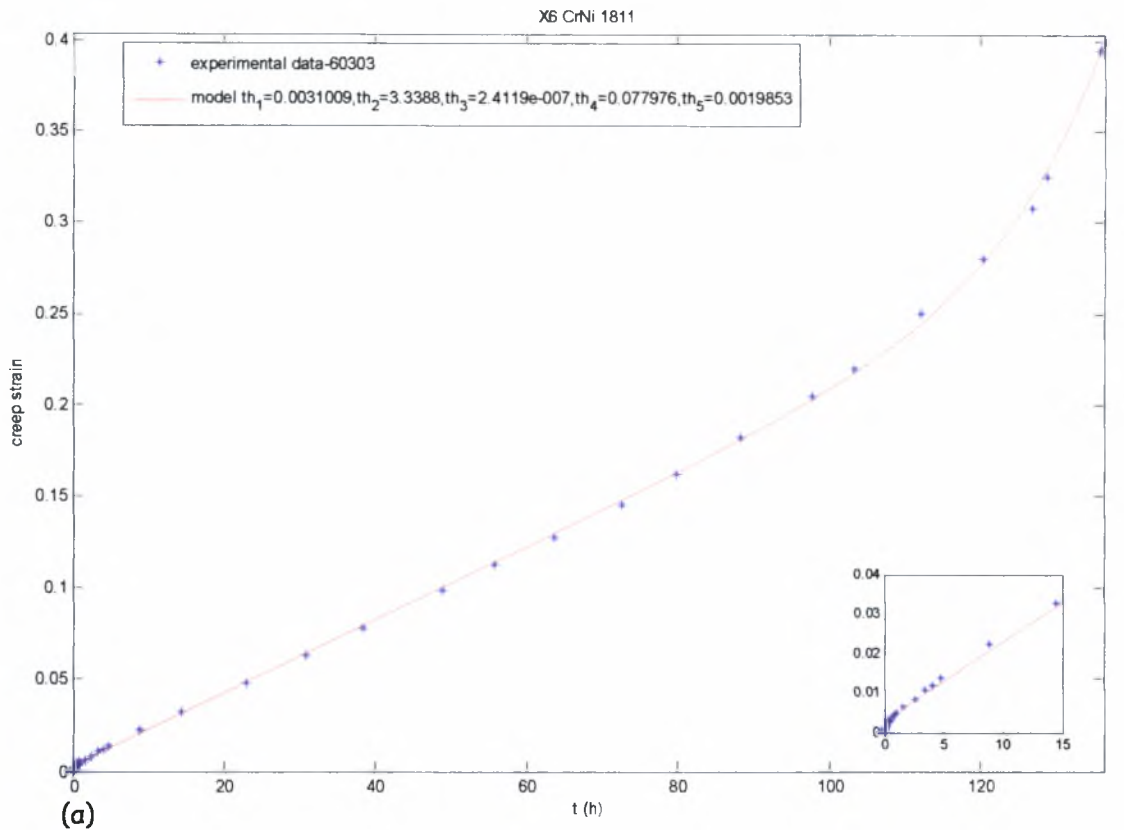


**Σχ 4.37** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

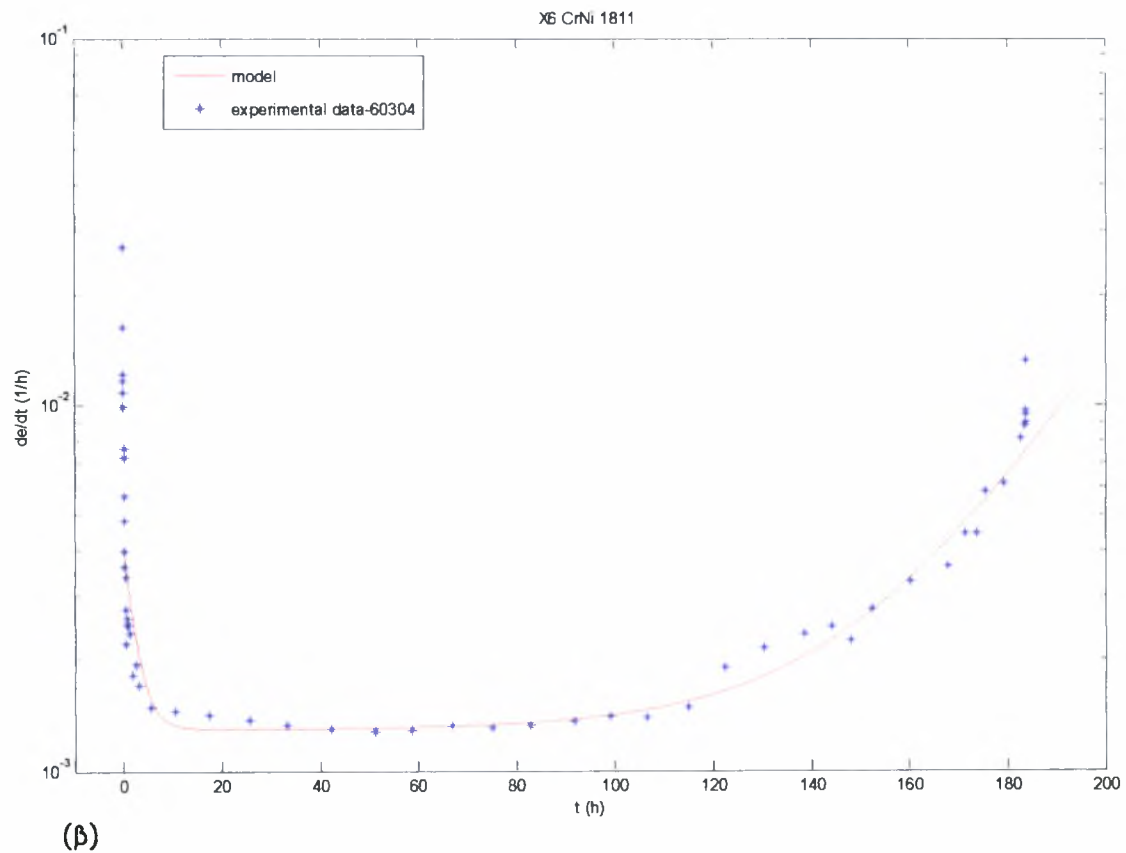
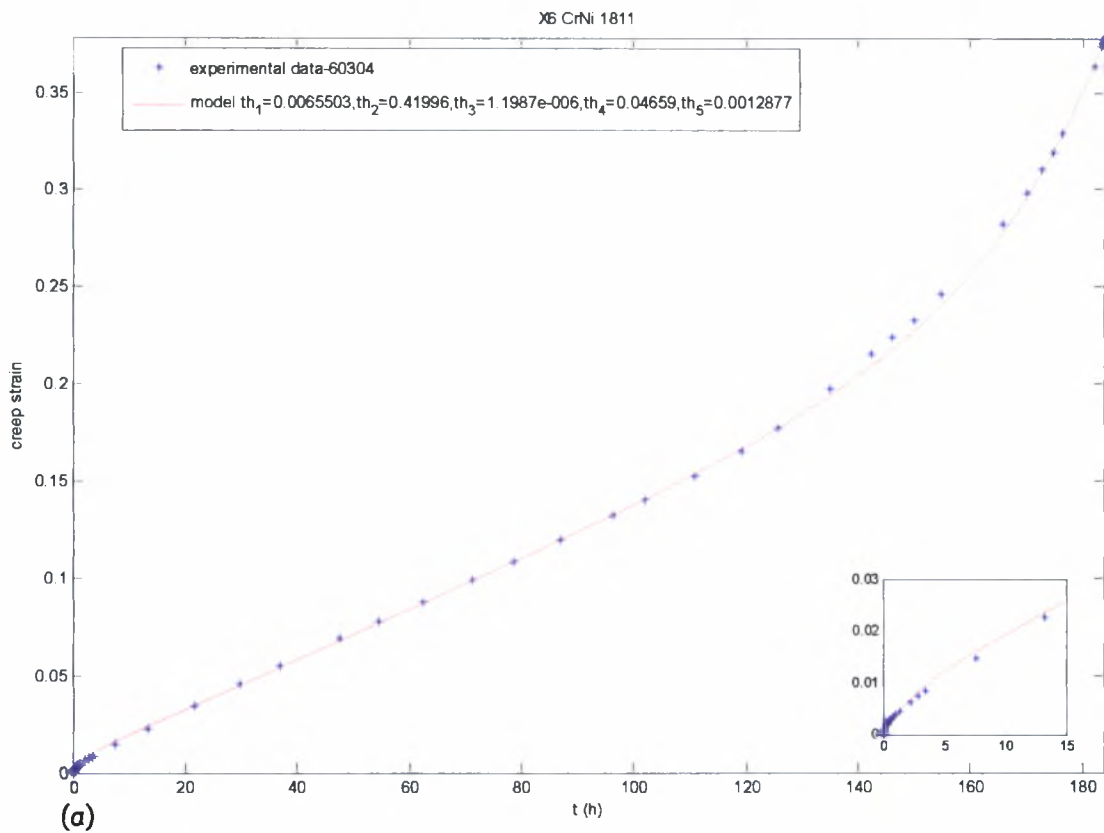


Σχ 4.38 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

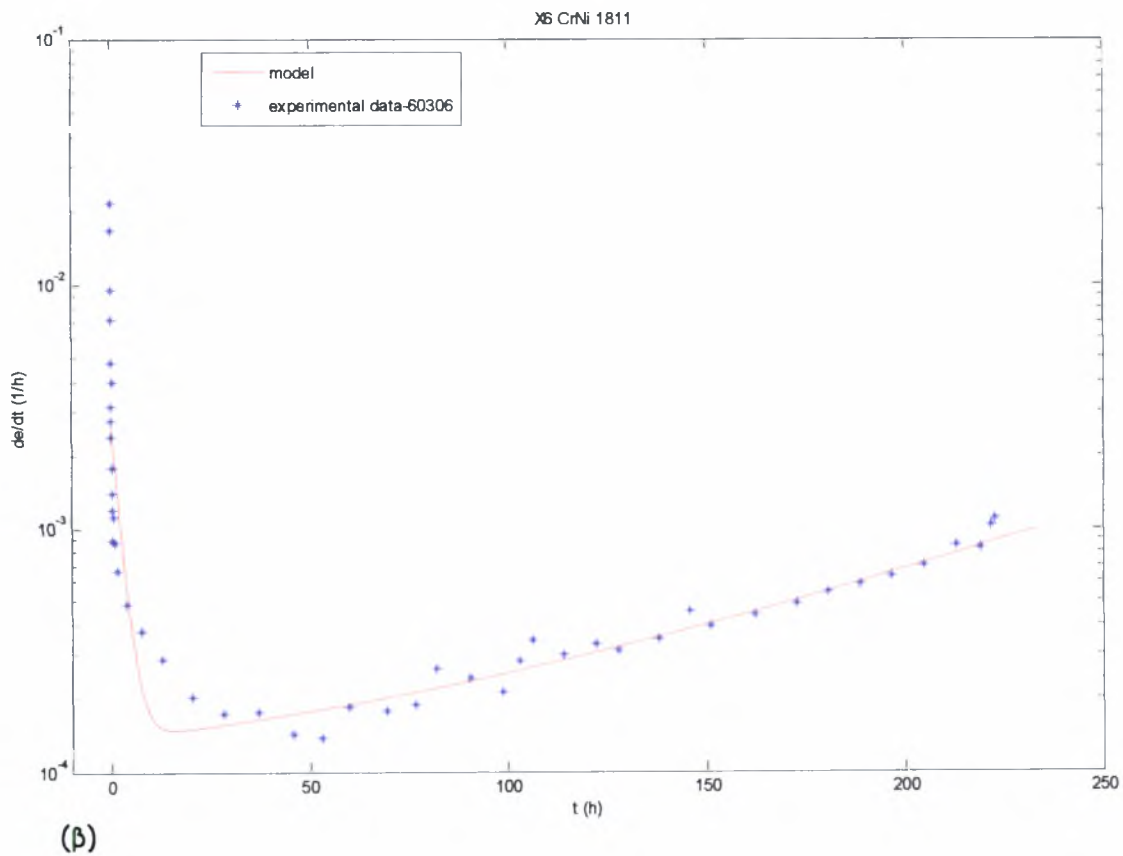
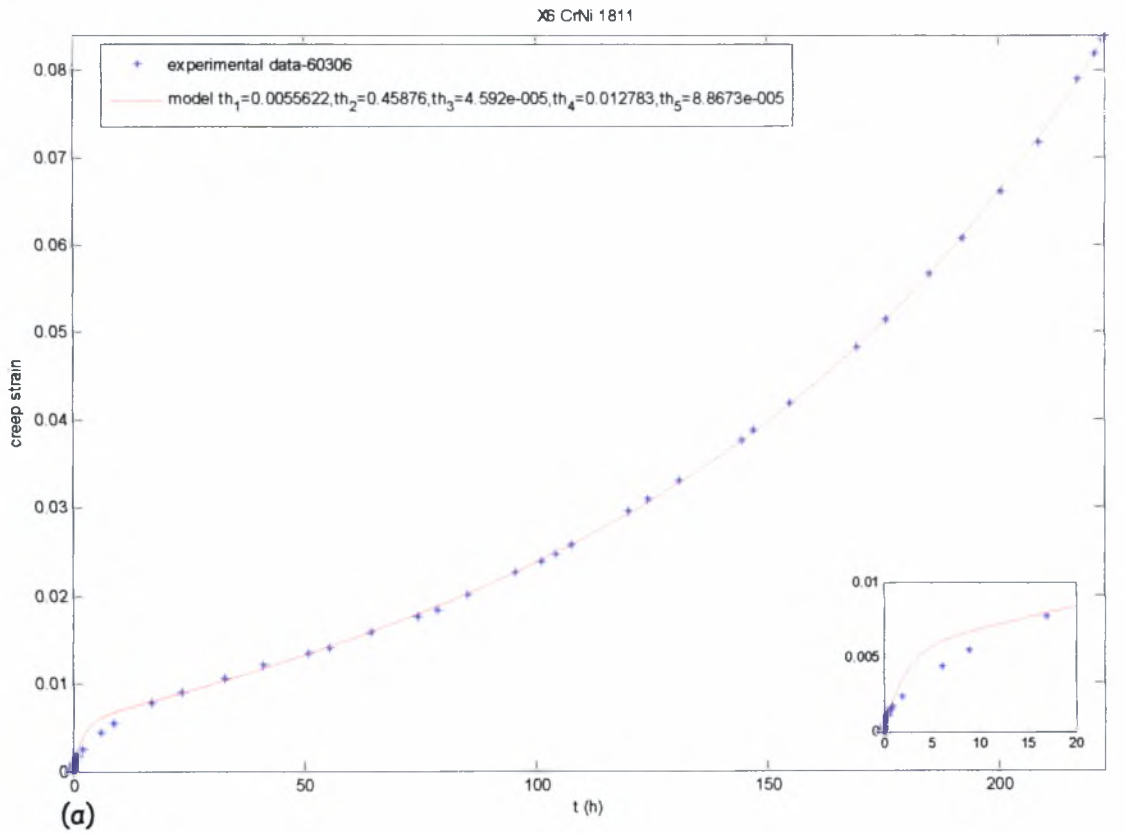




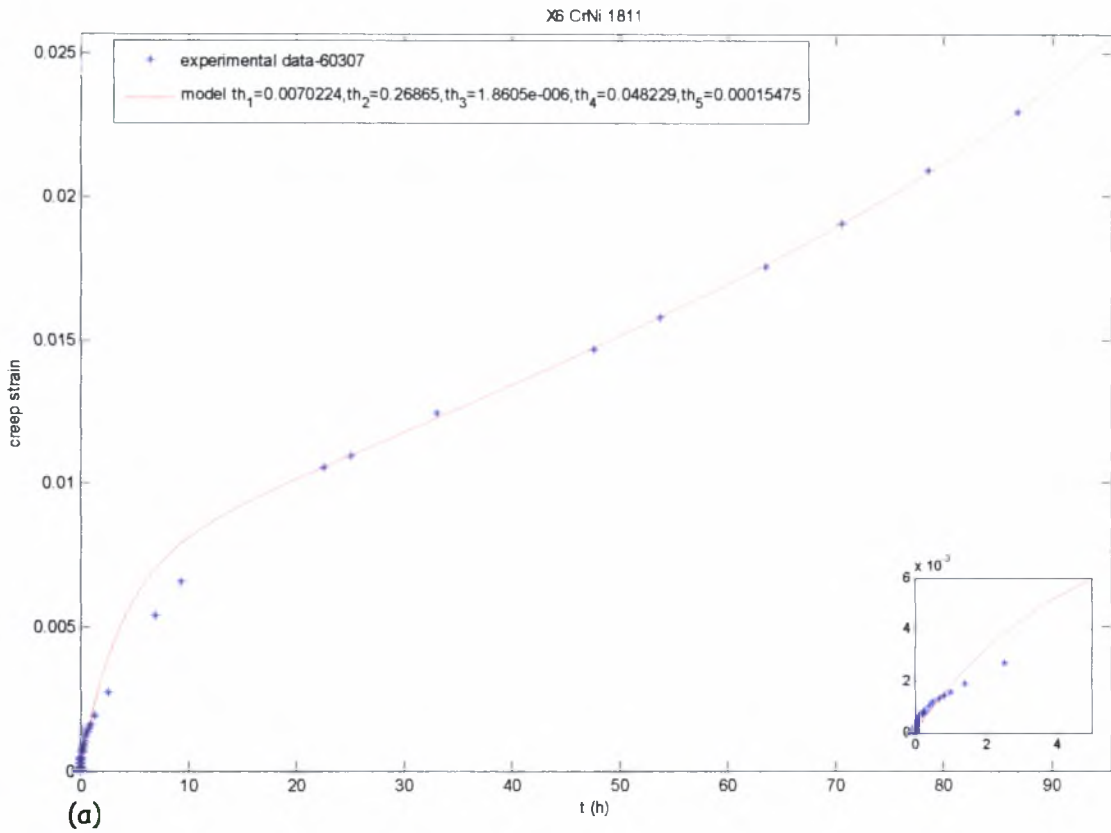
**Σχ 4.39** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



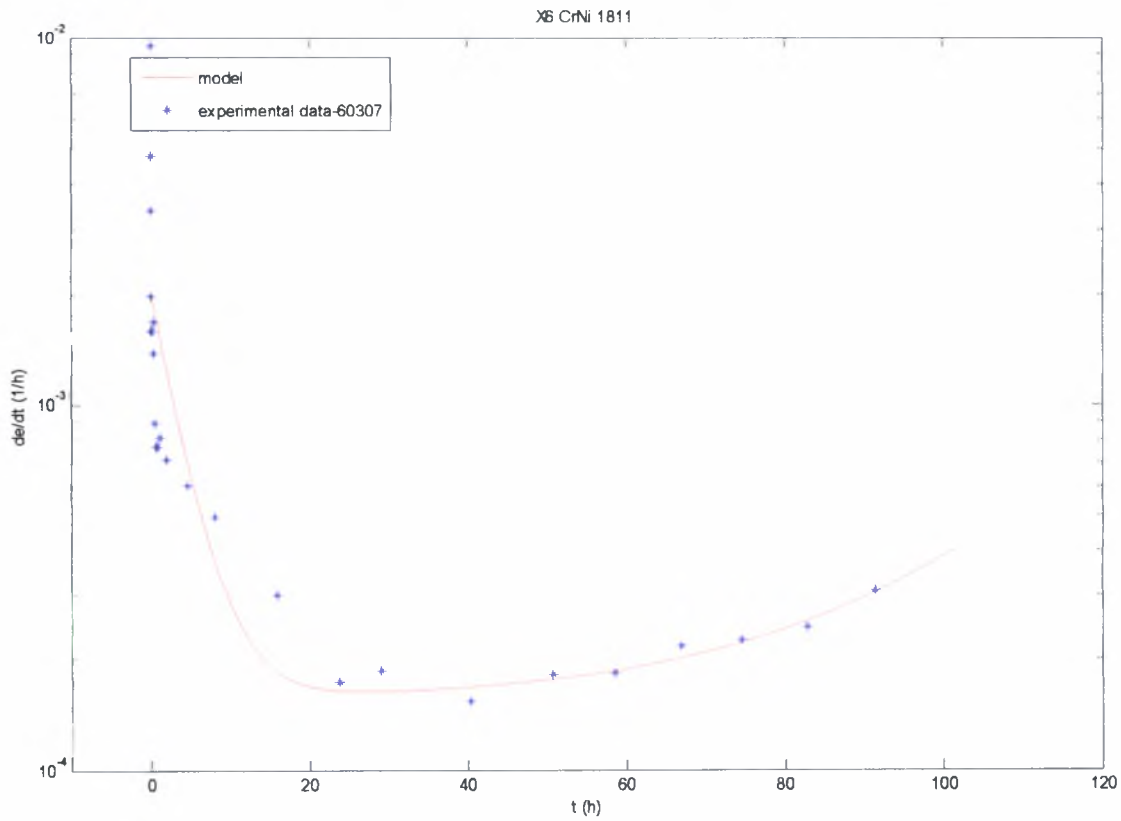
**Σχ 4.40** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



**Σχ 4.41** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



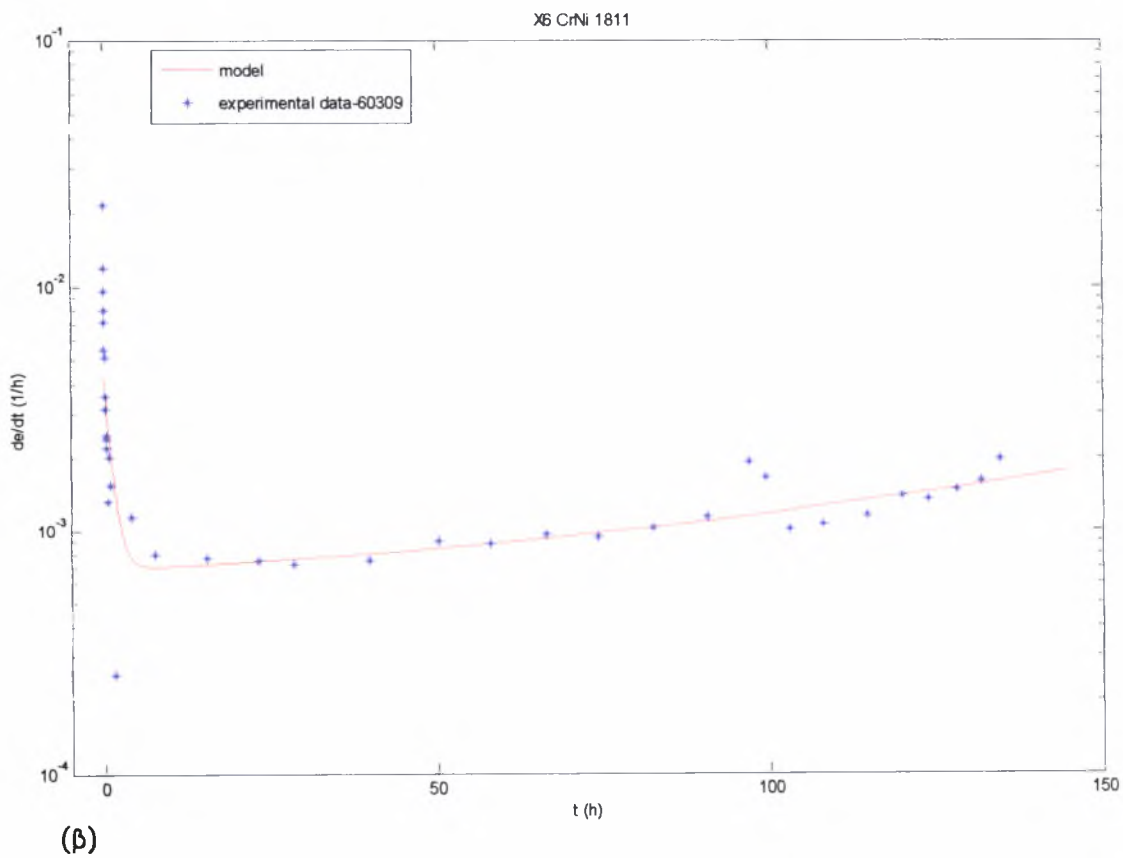
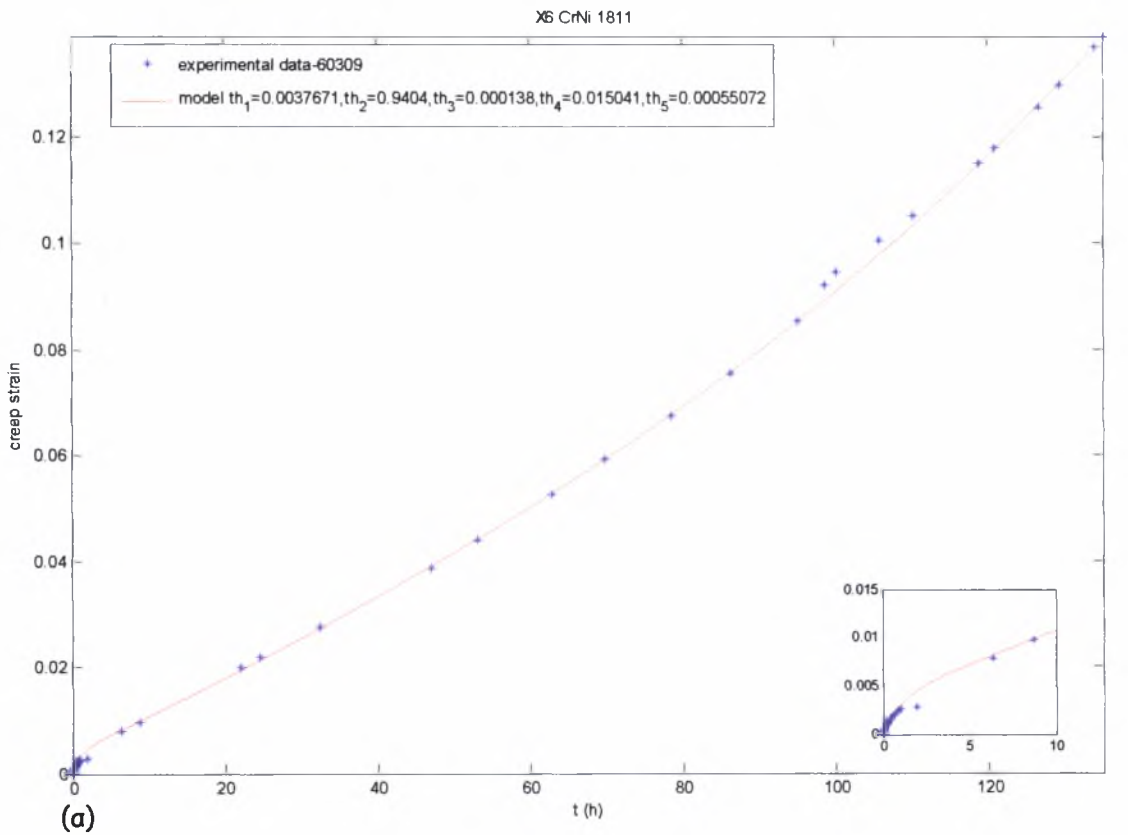
(α)



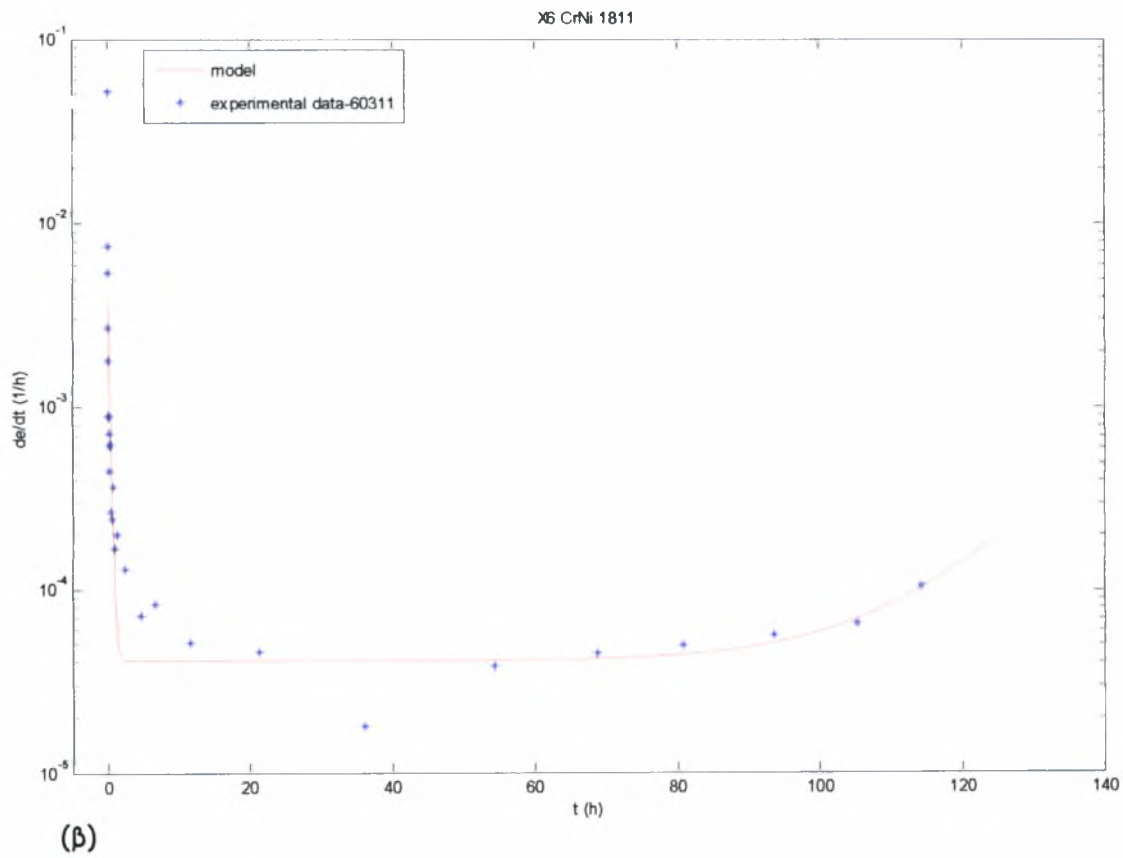
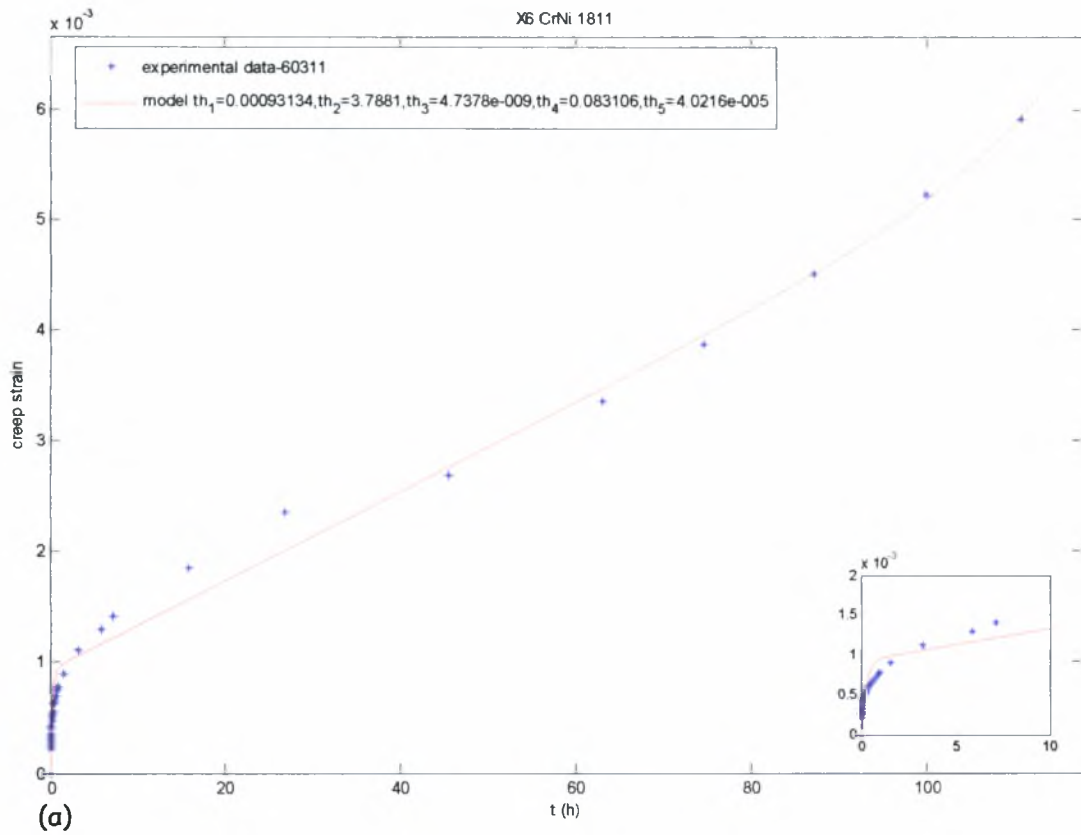
(β)

Σχ 4.42 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

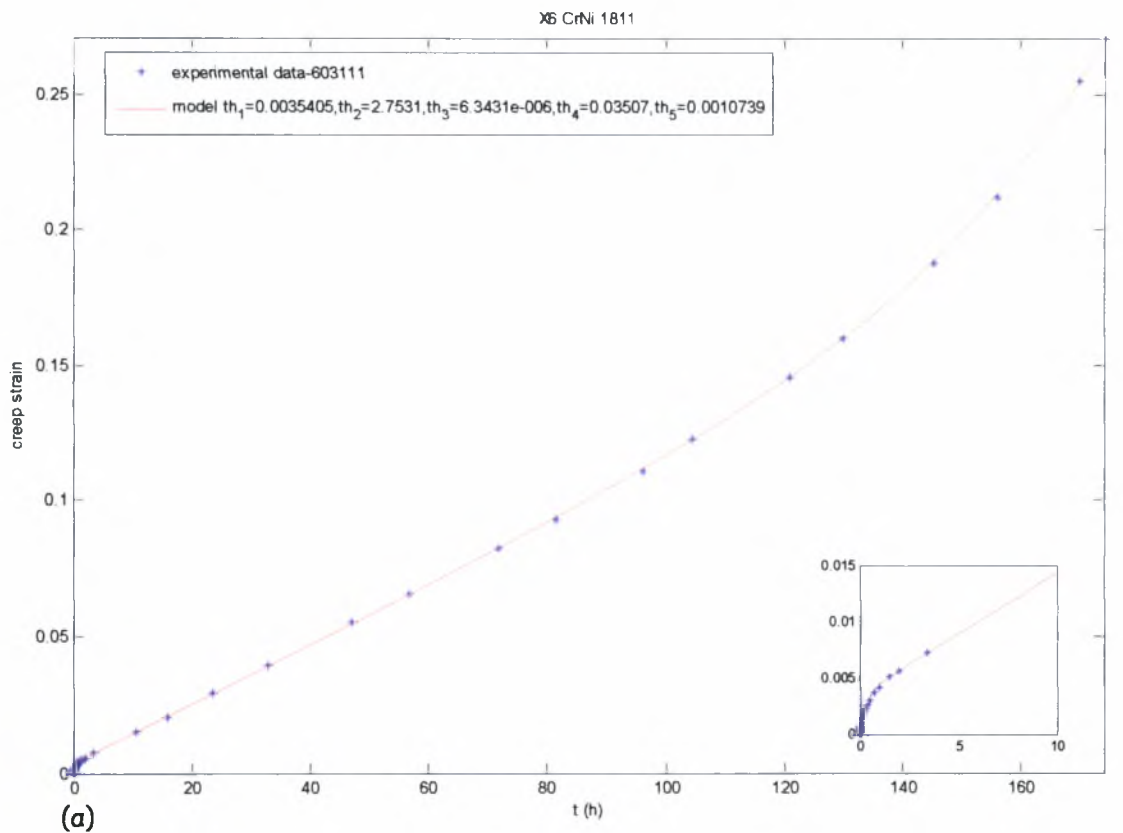
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



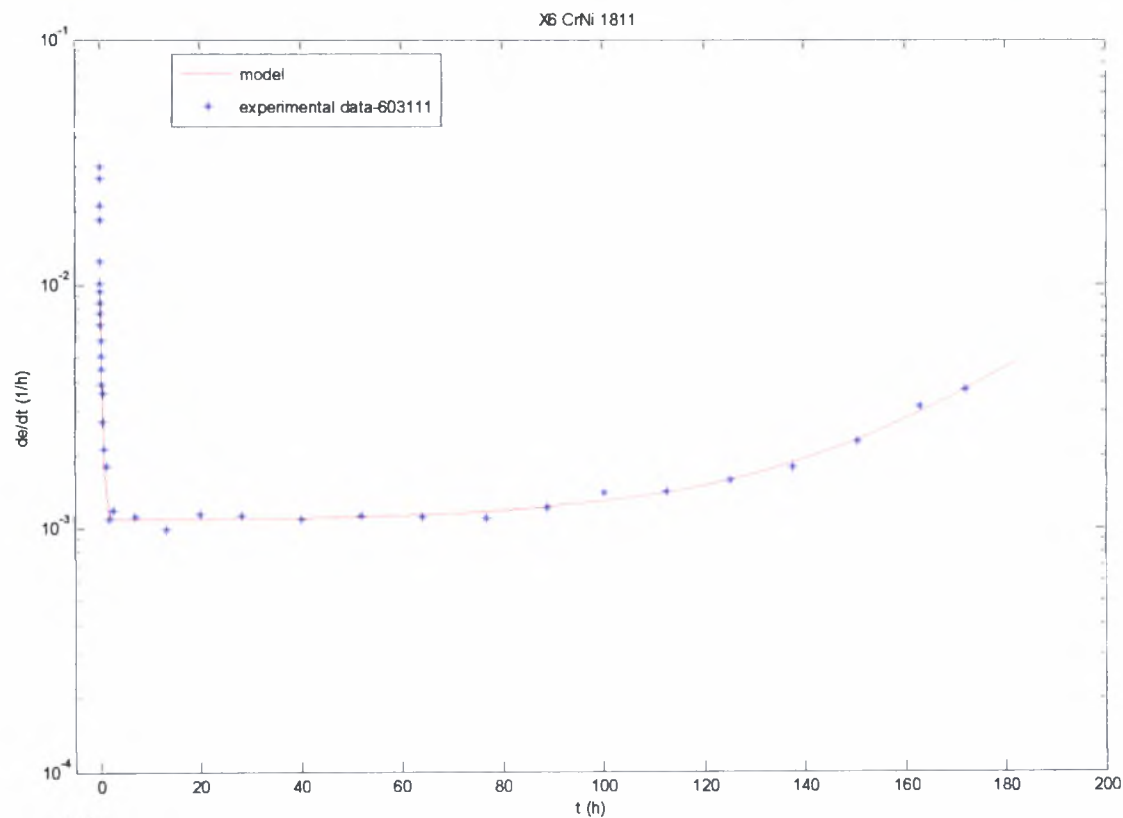
**Σχ 4.43** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



**Σχ 4.44** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

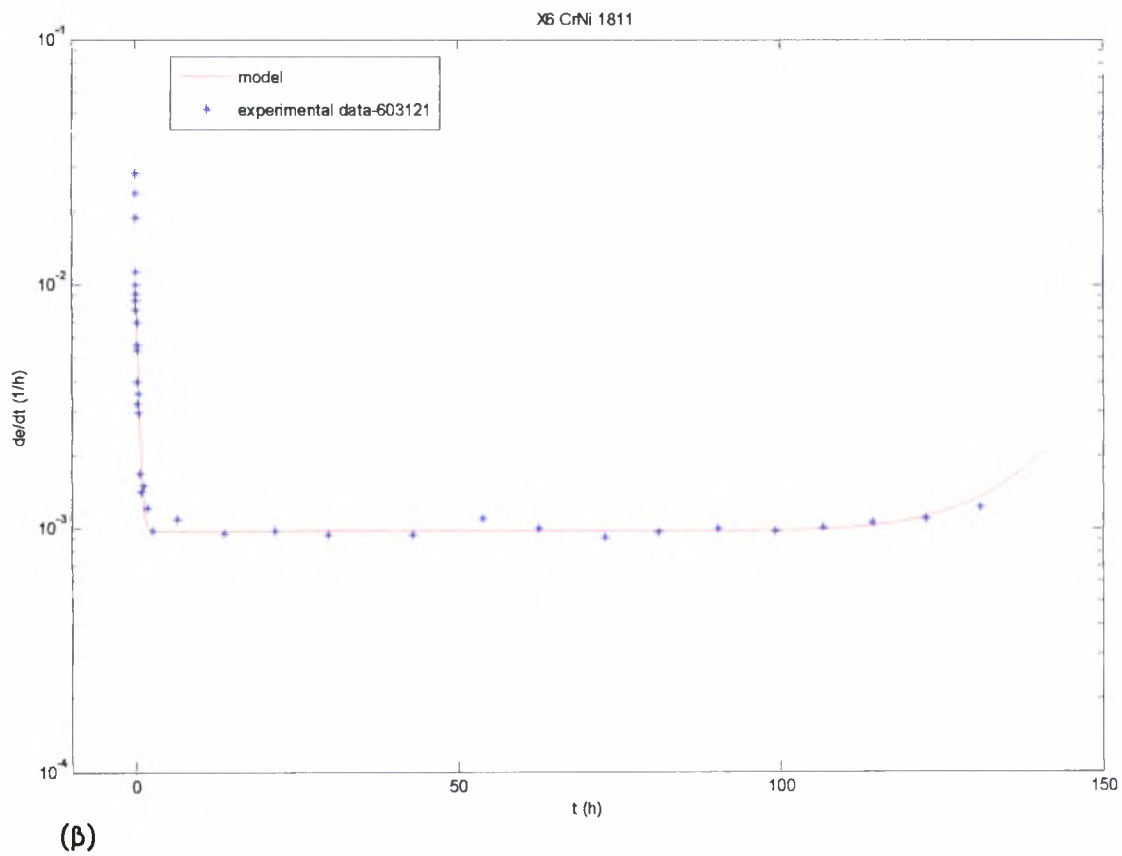
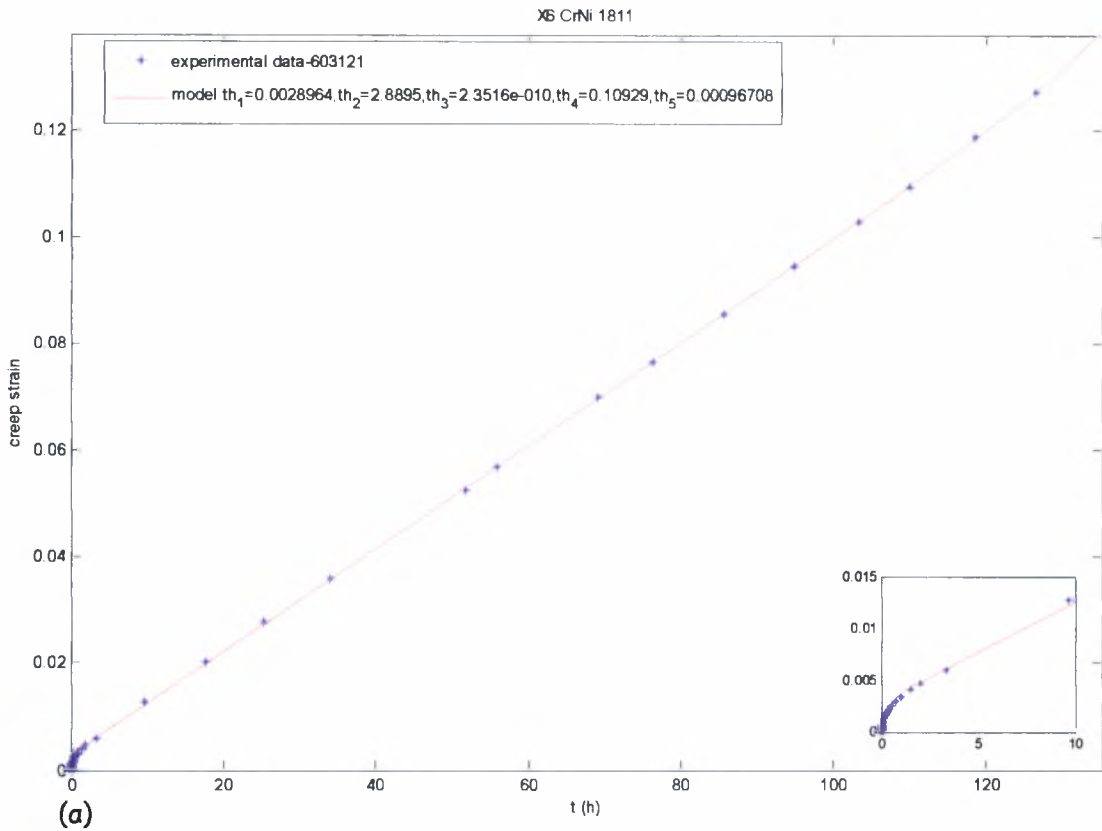


(a)



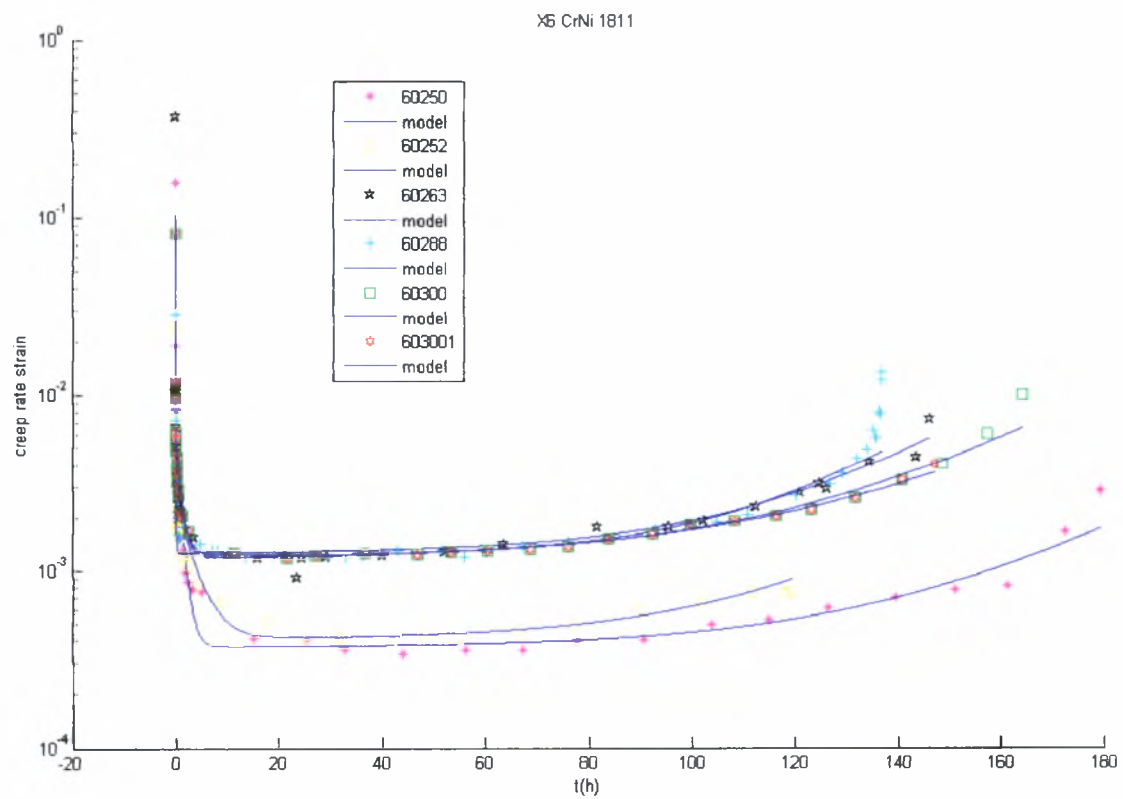
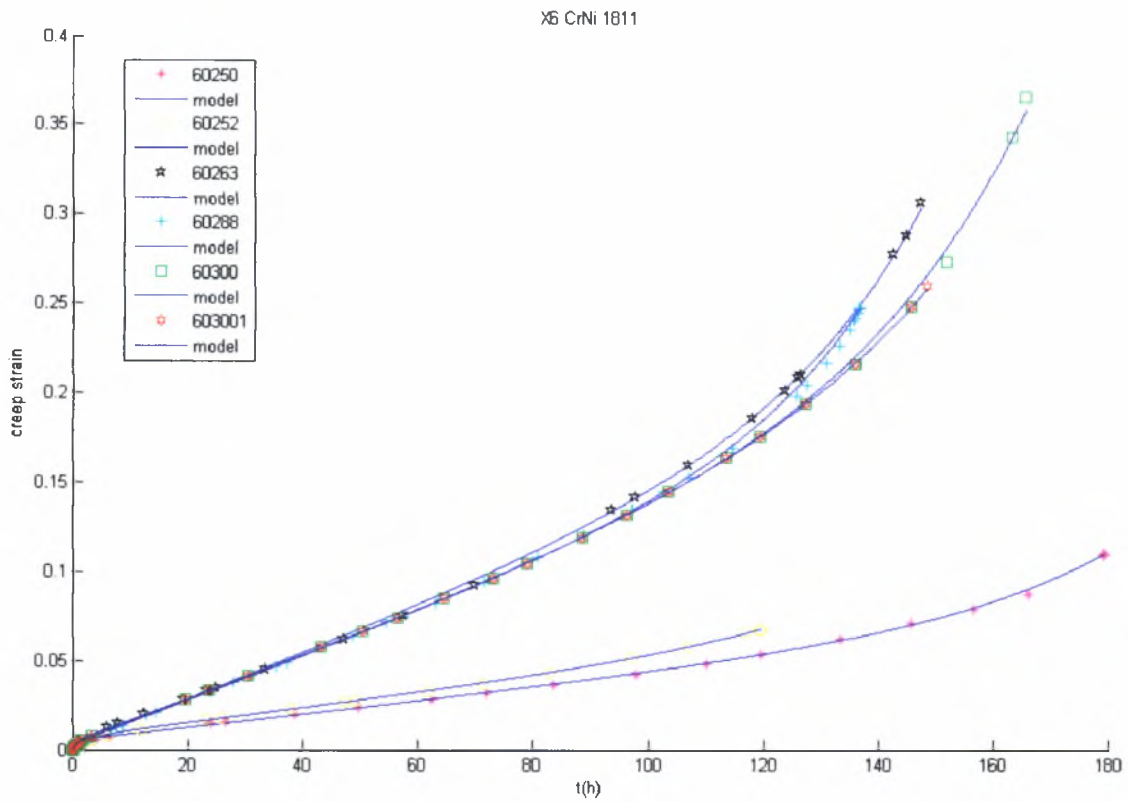
(b)

Σχ 4.45 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και Θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

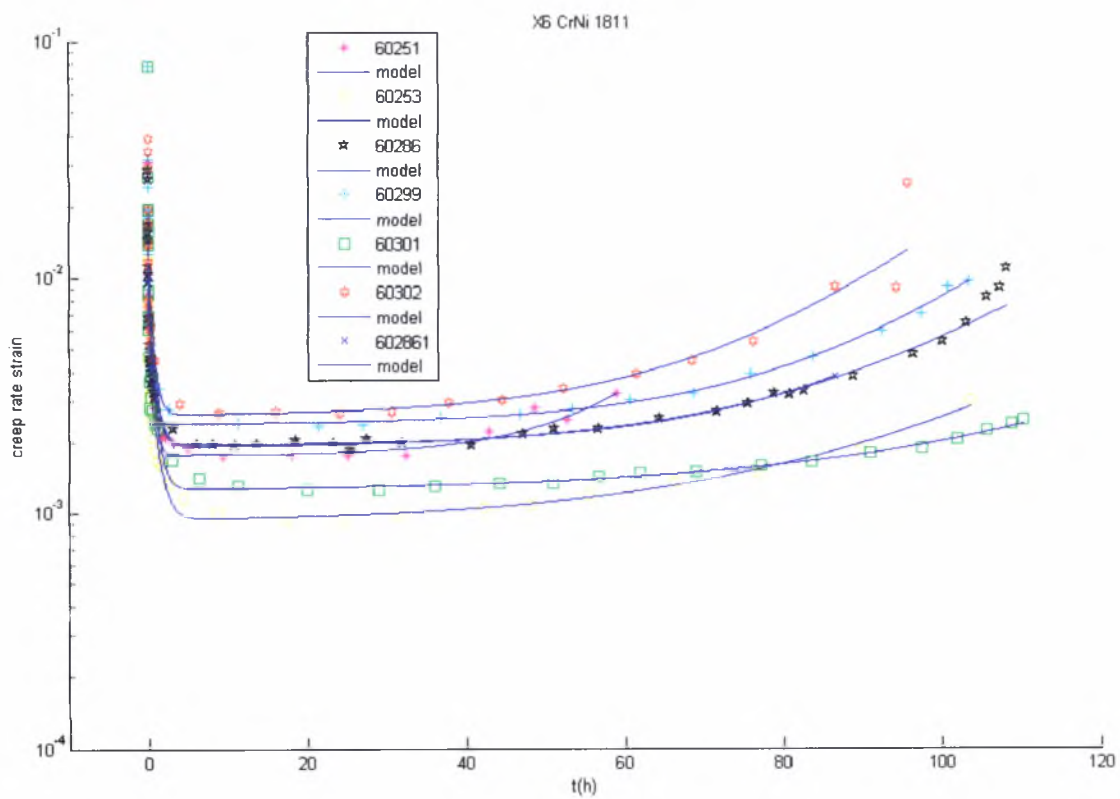
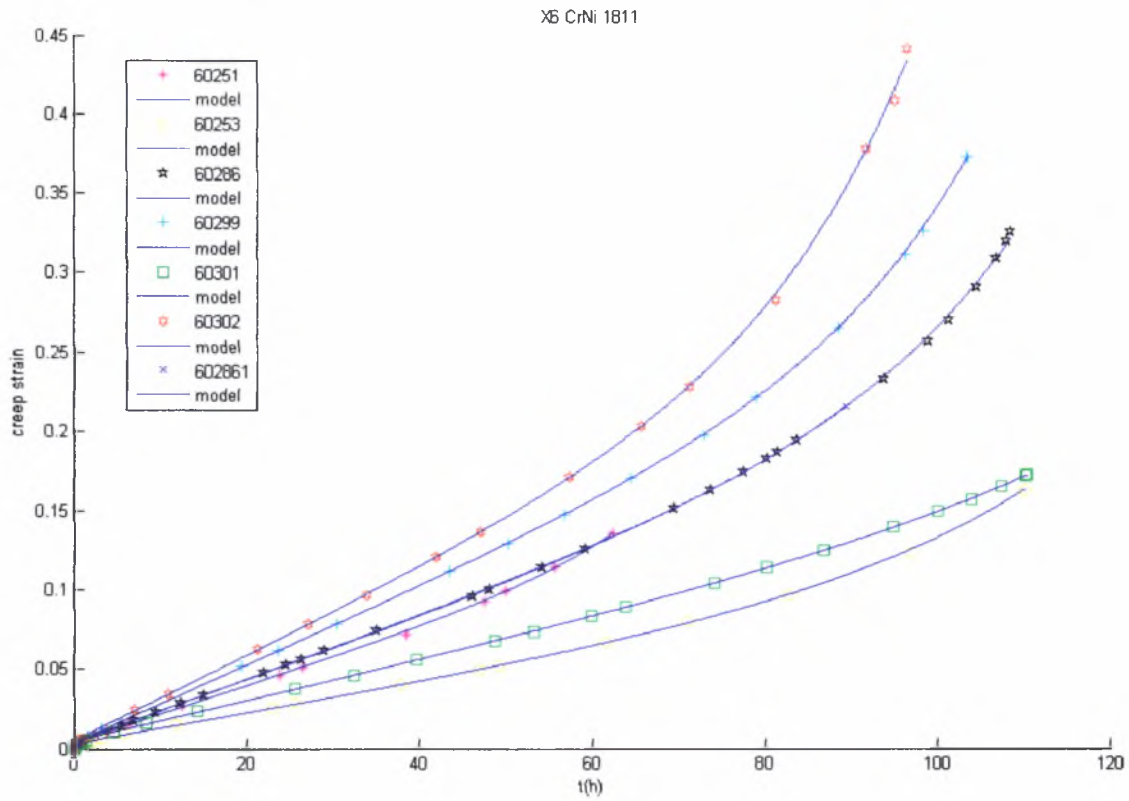


Σχ 4.46 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

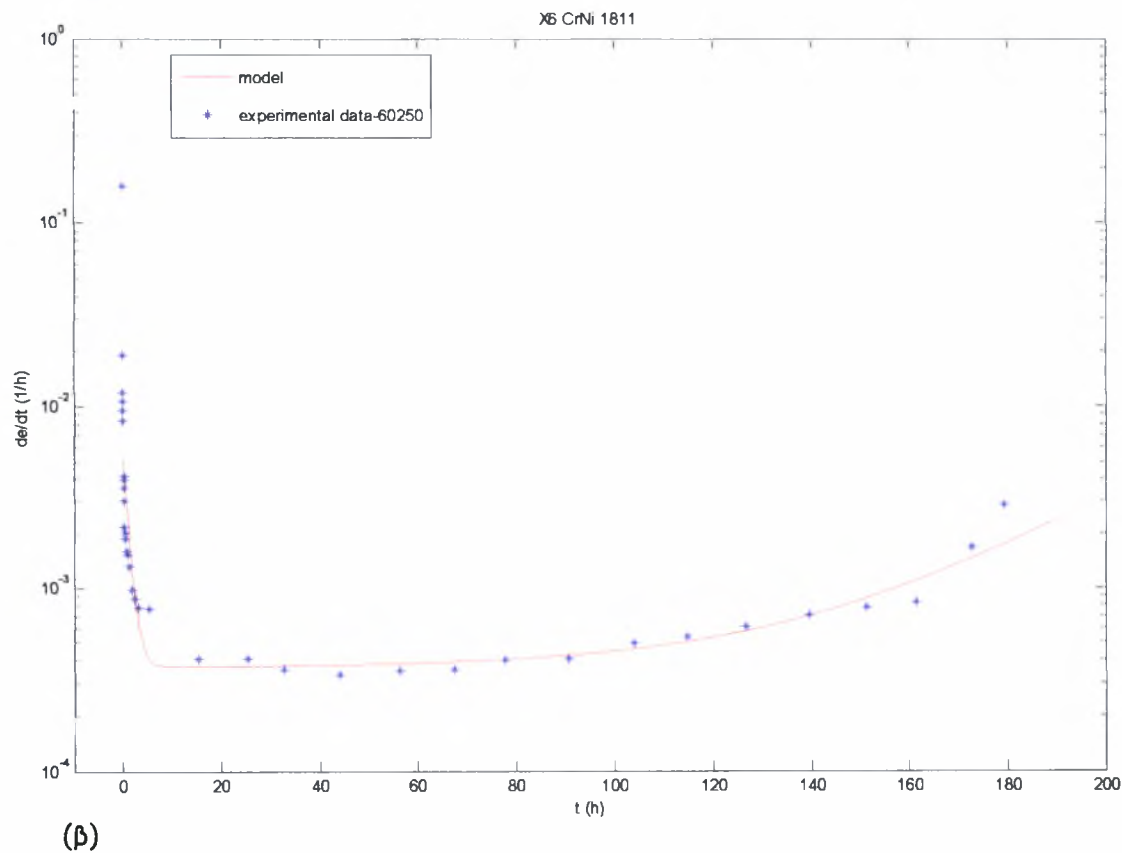
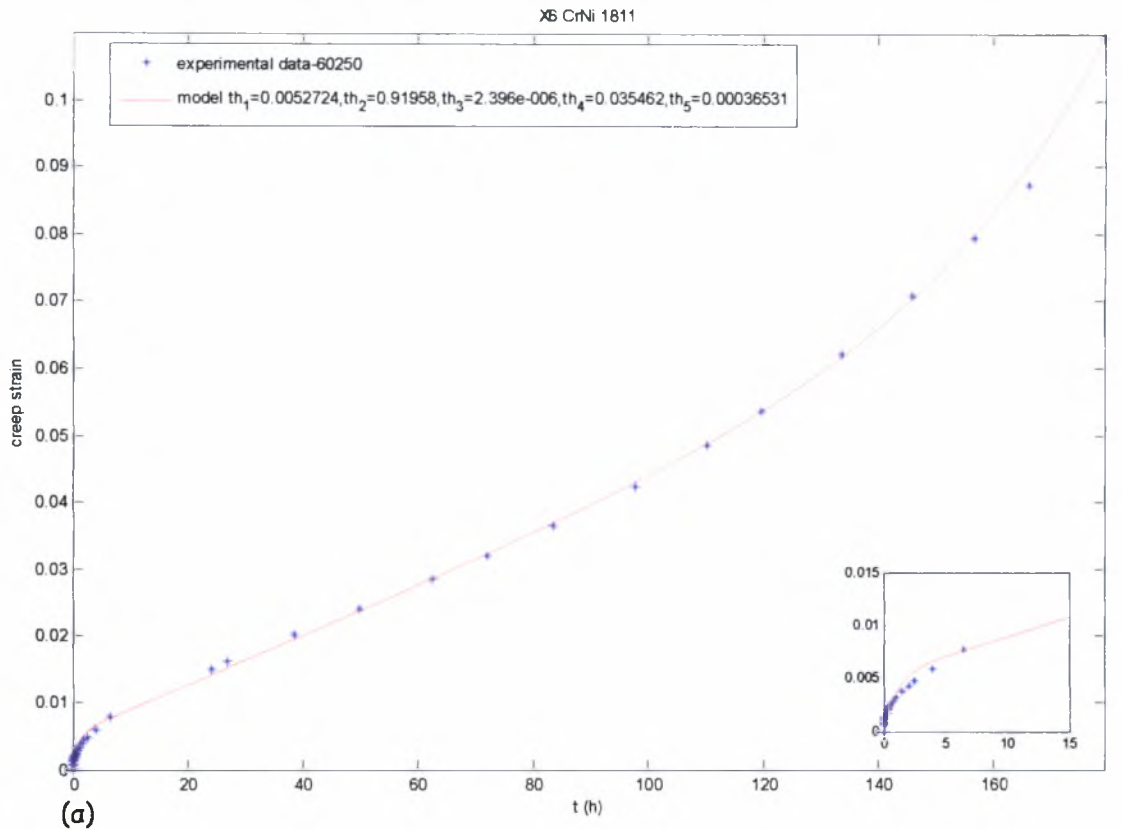




Σχ 4.47 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.

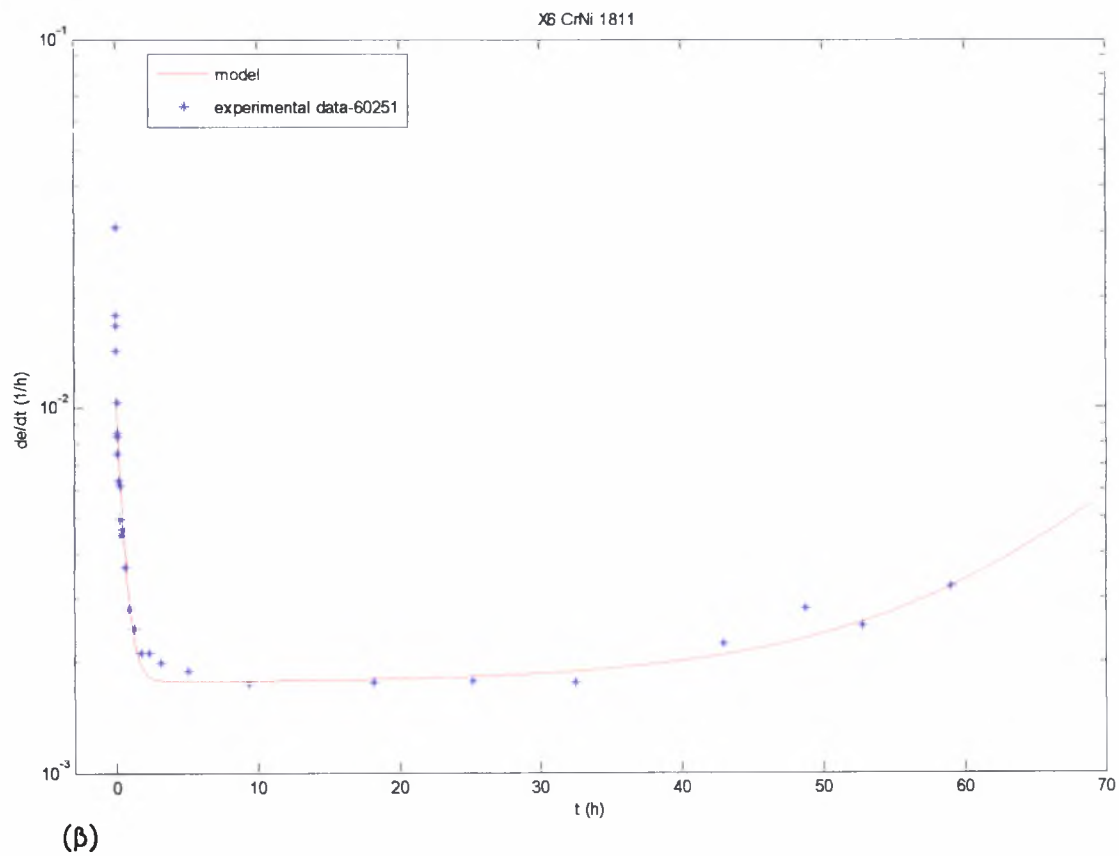
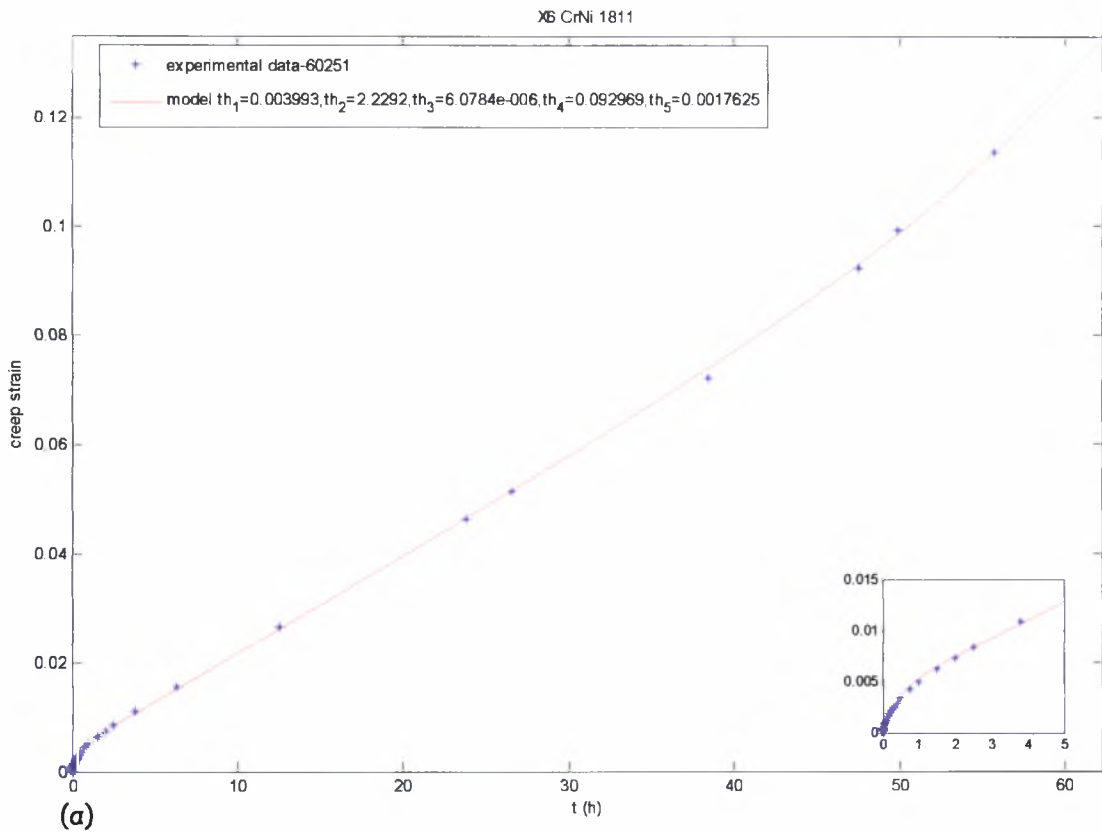


Σχ 4.48 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.



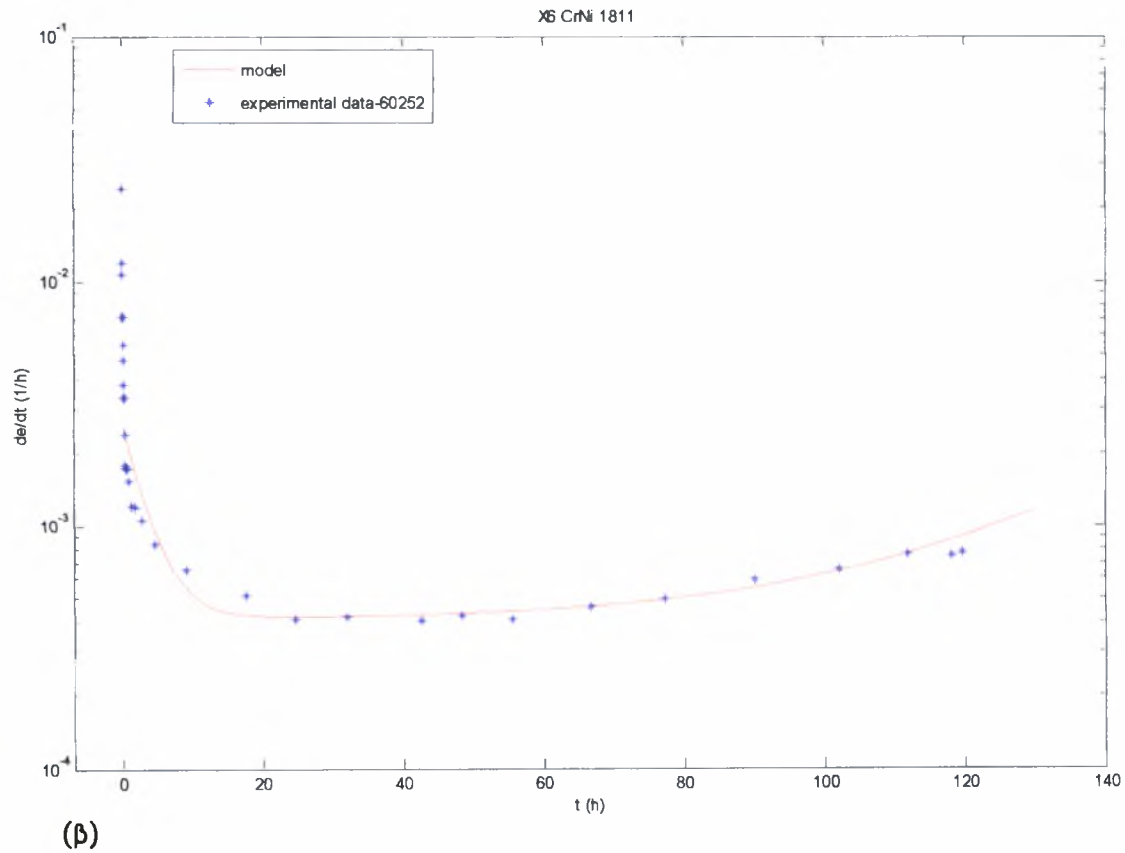
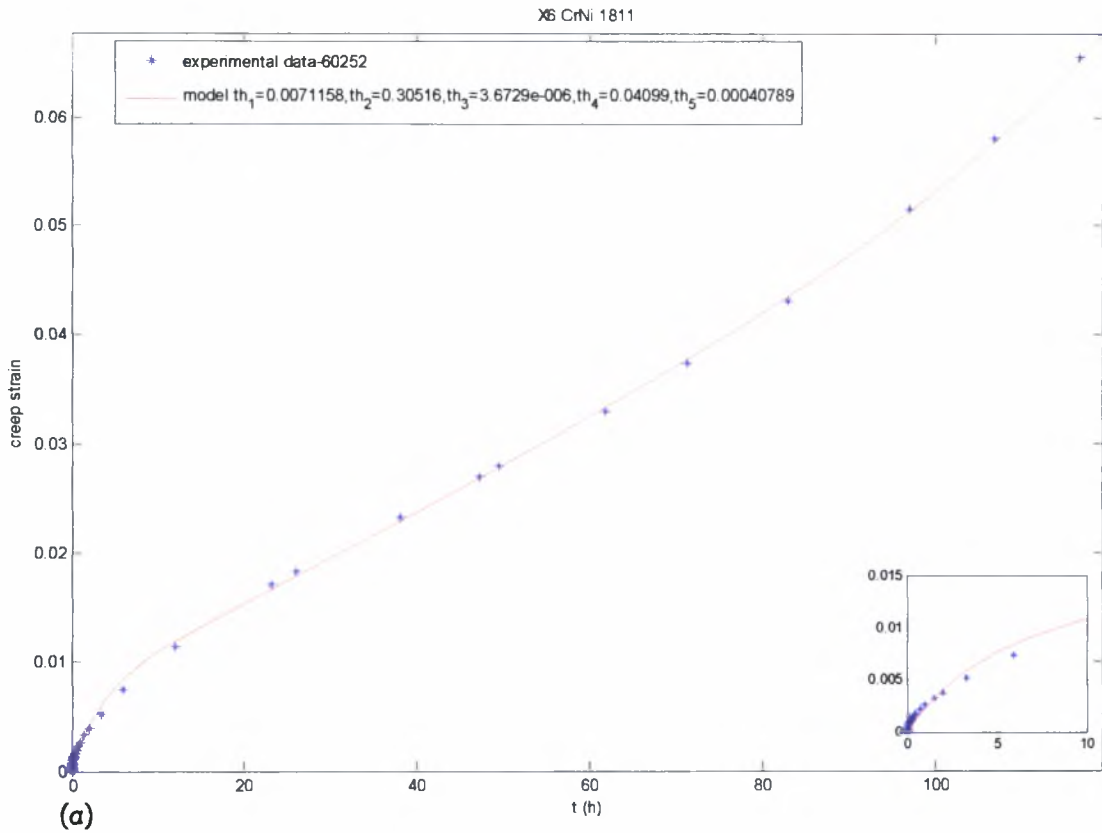
Σχ 4.49 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

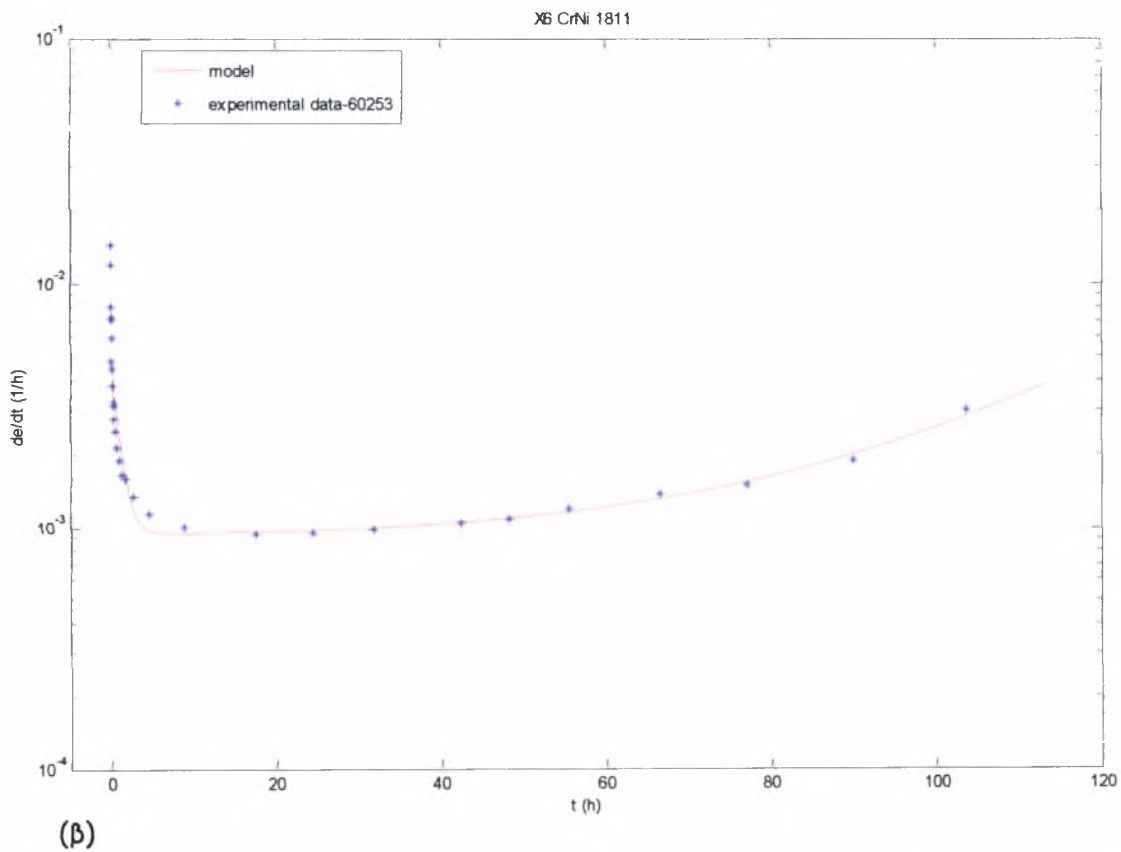
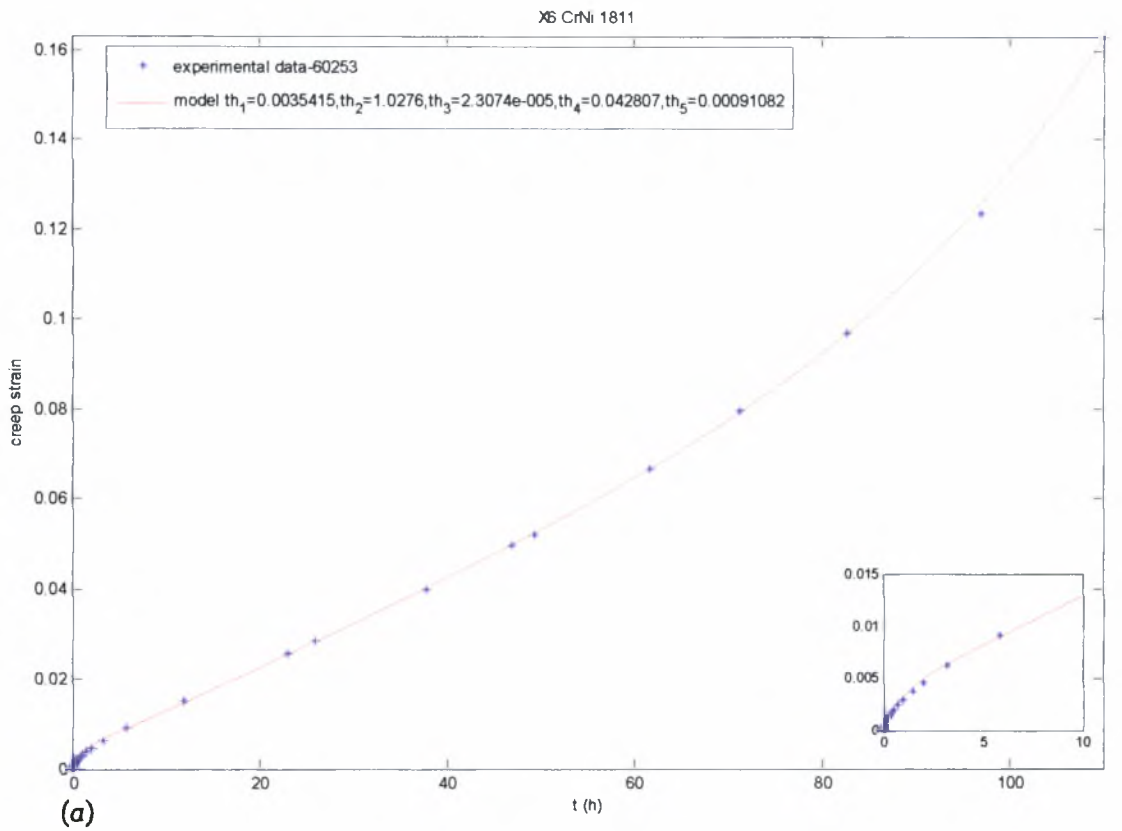


**Σχ 4.50 α)** Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

**β)** ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

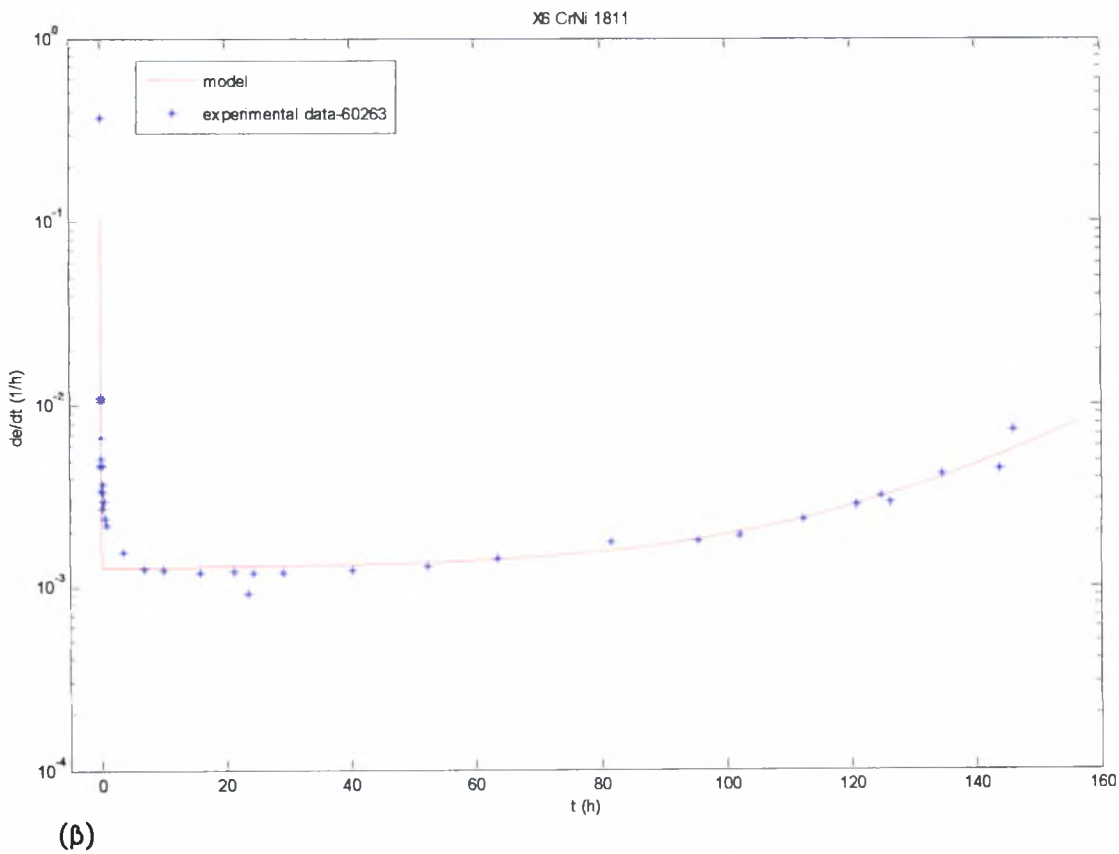
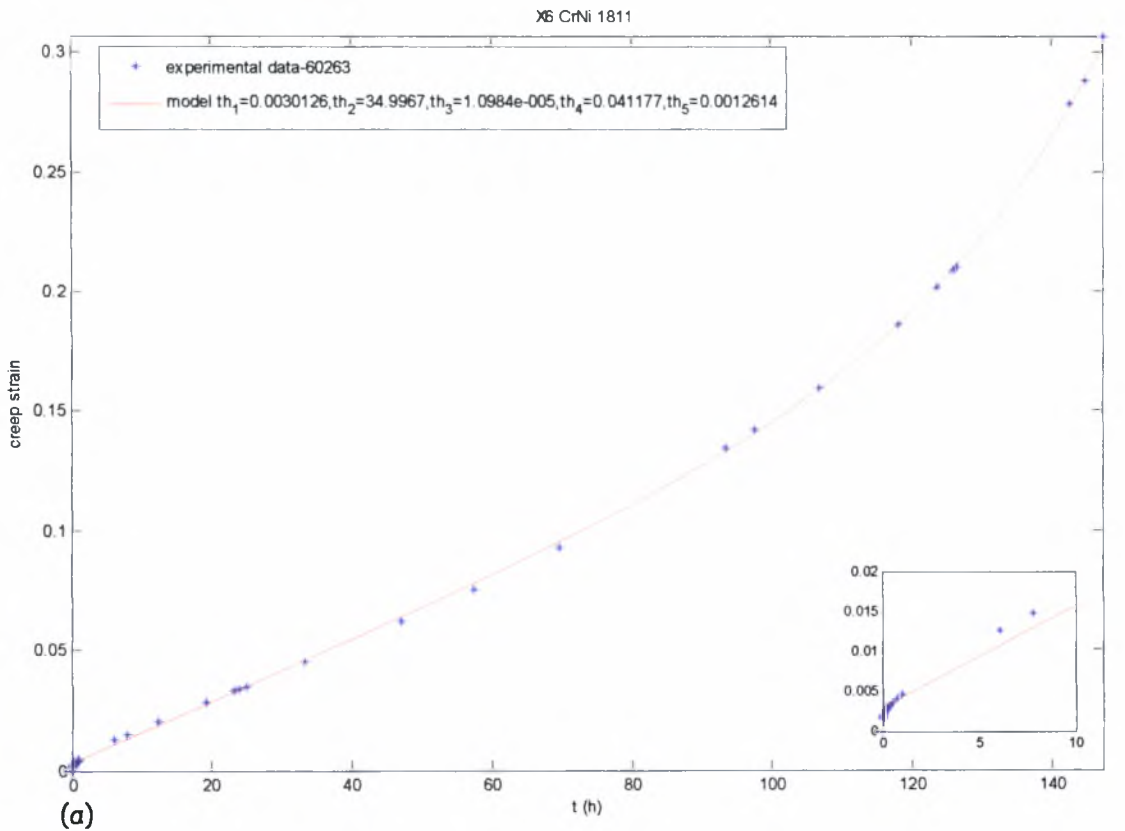


**Σχ 4.51** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

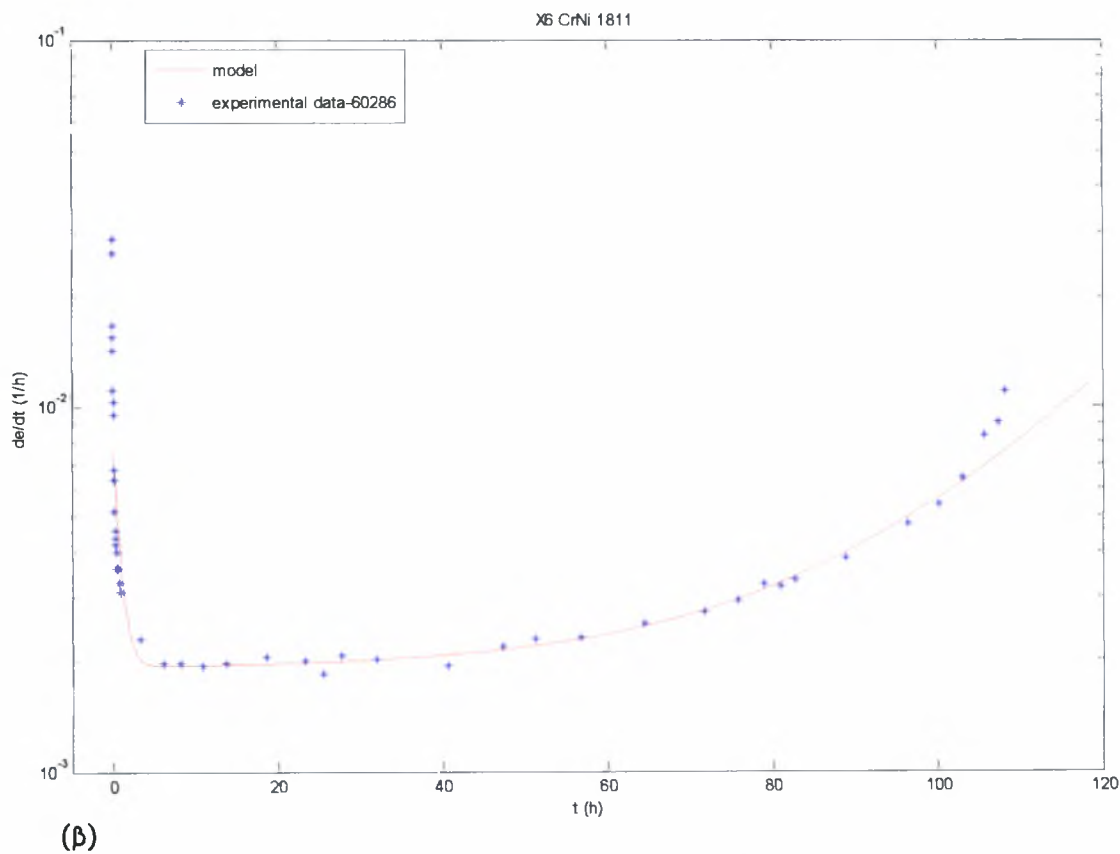
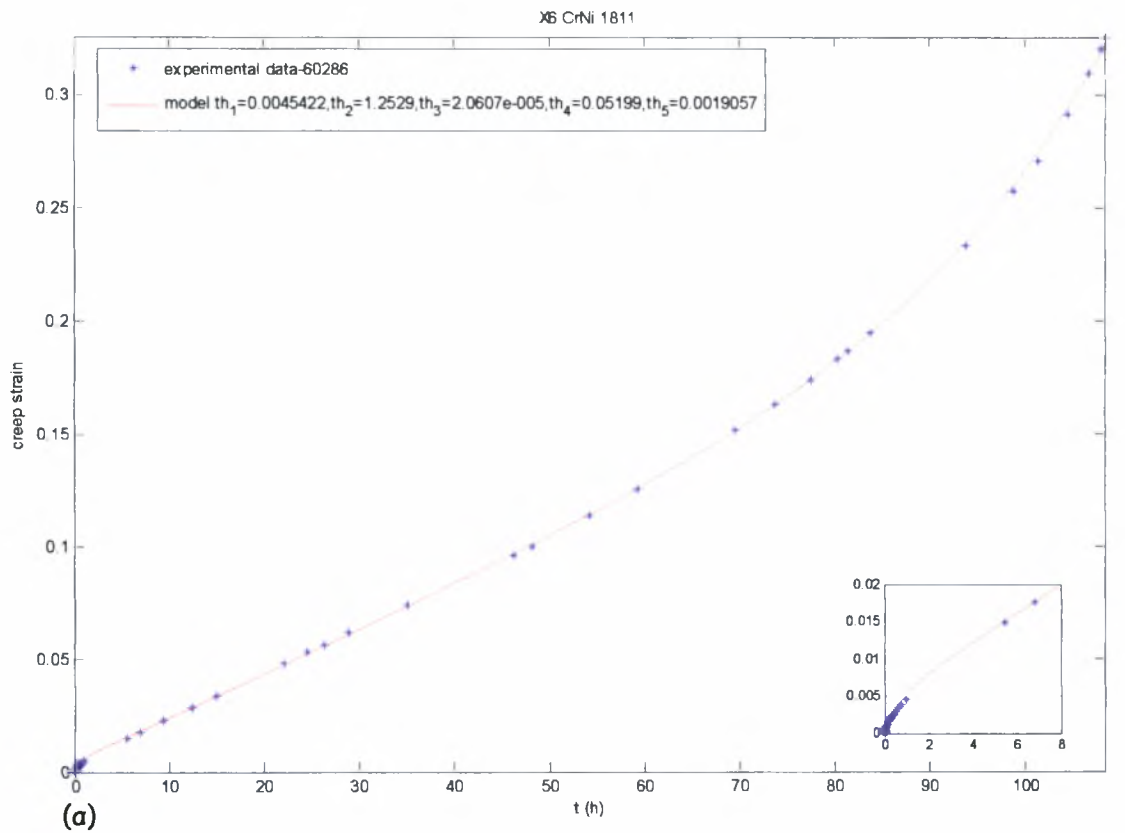


**Σχ 4.52** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



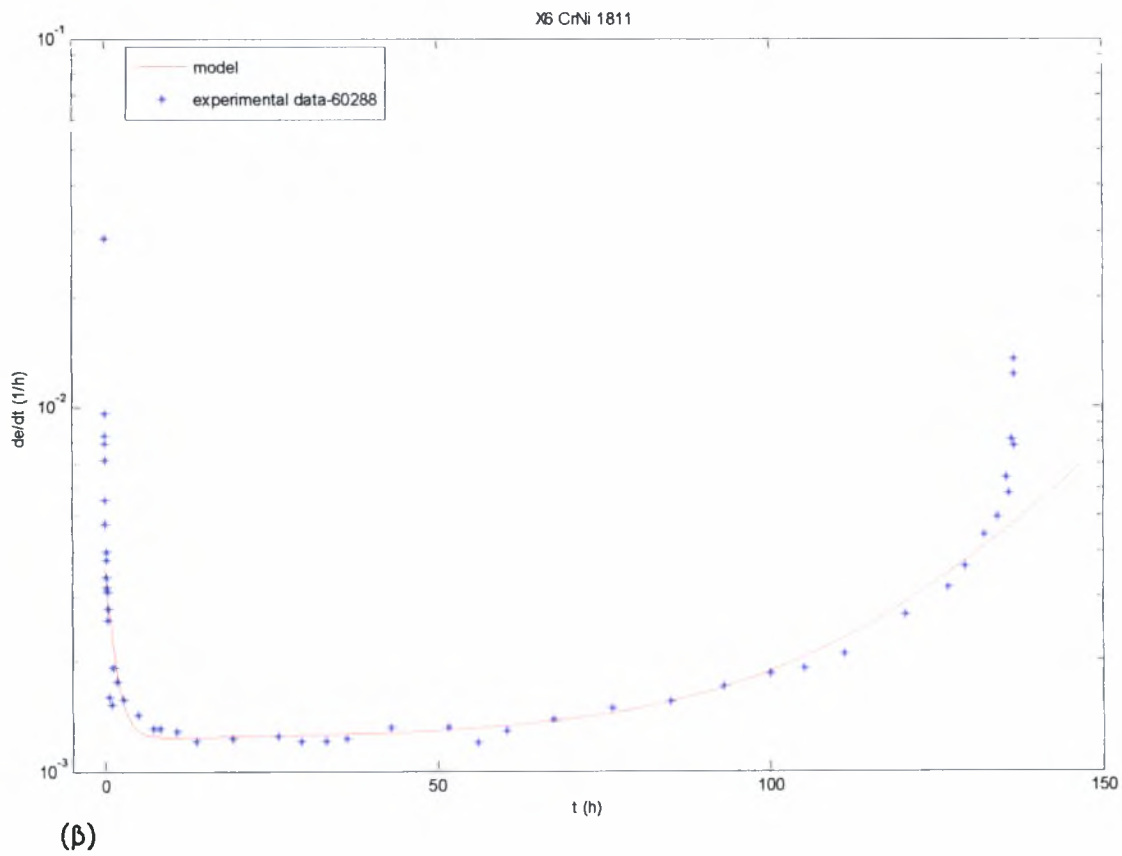
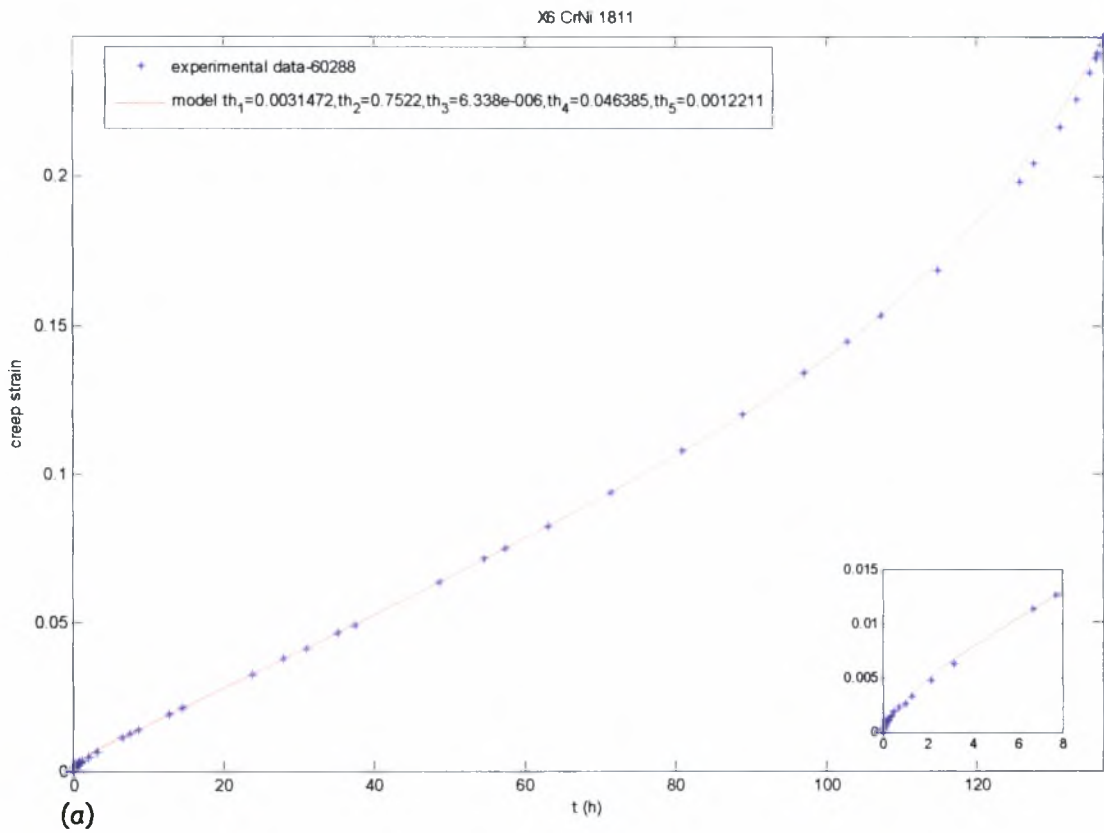
Σχ 4.53 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



**Σχ 4.54** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

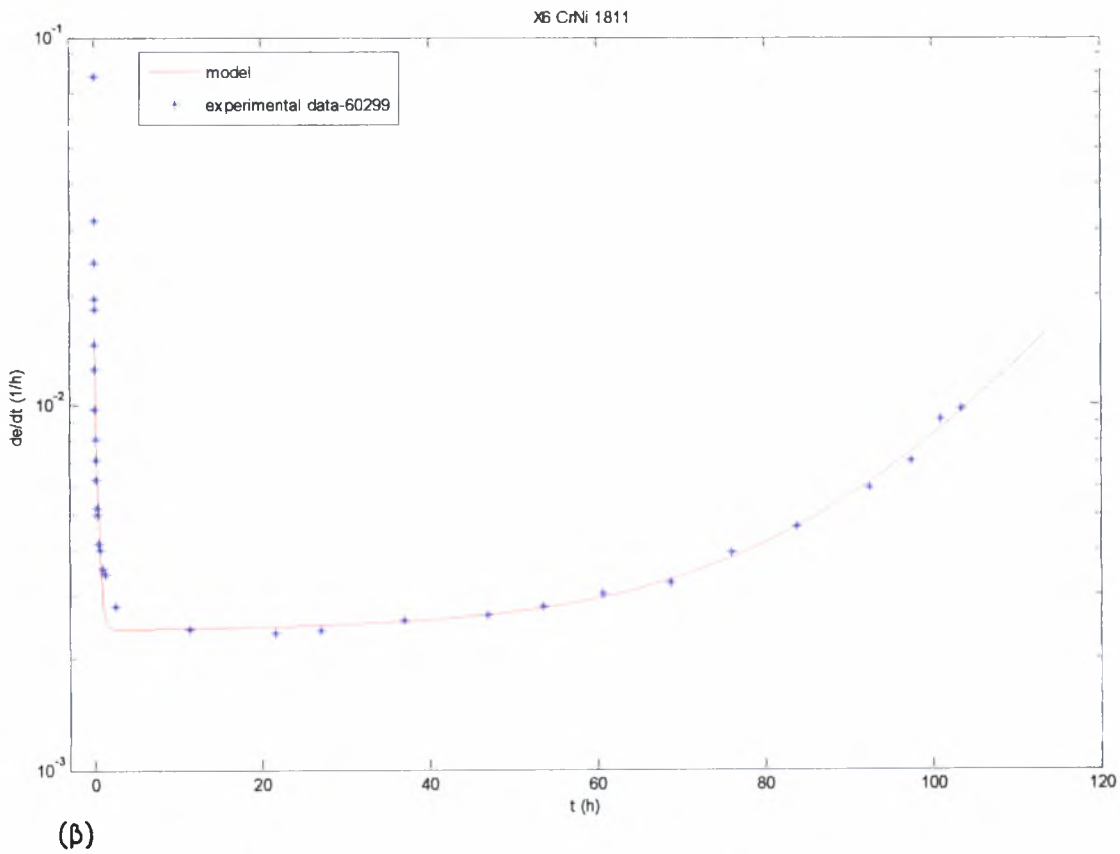
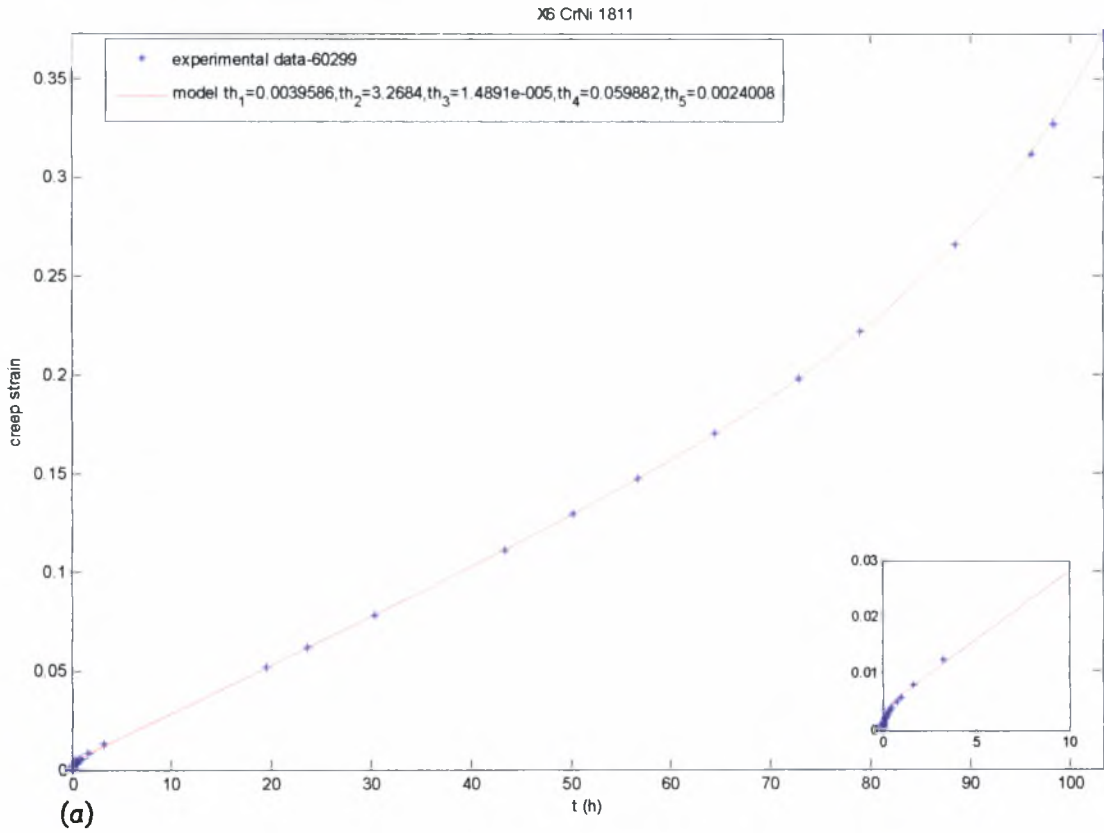
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



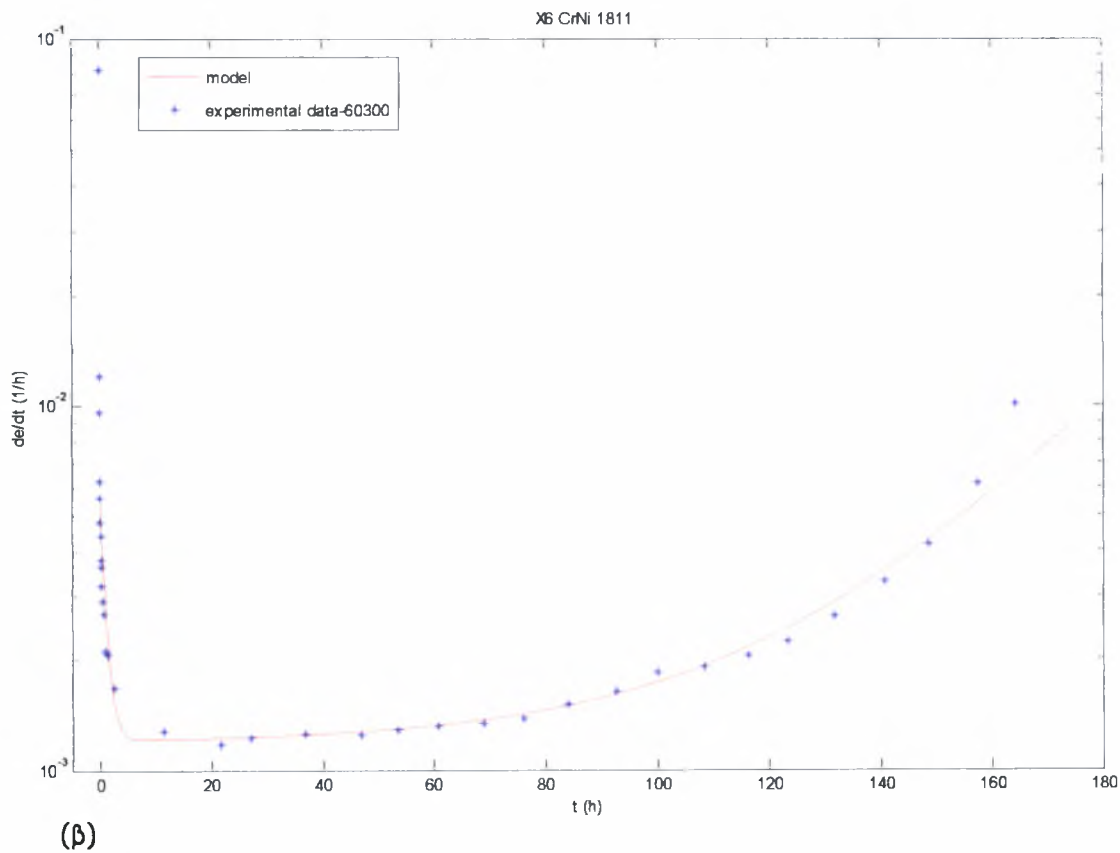
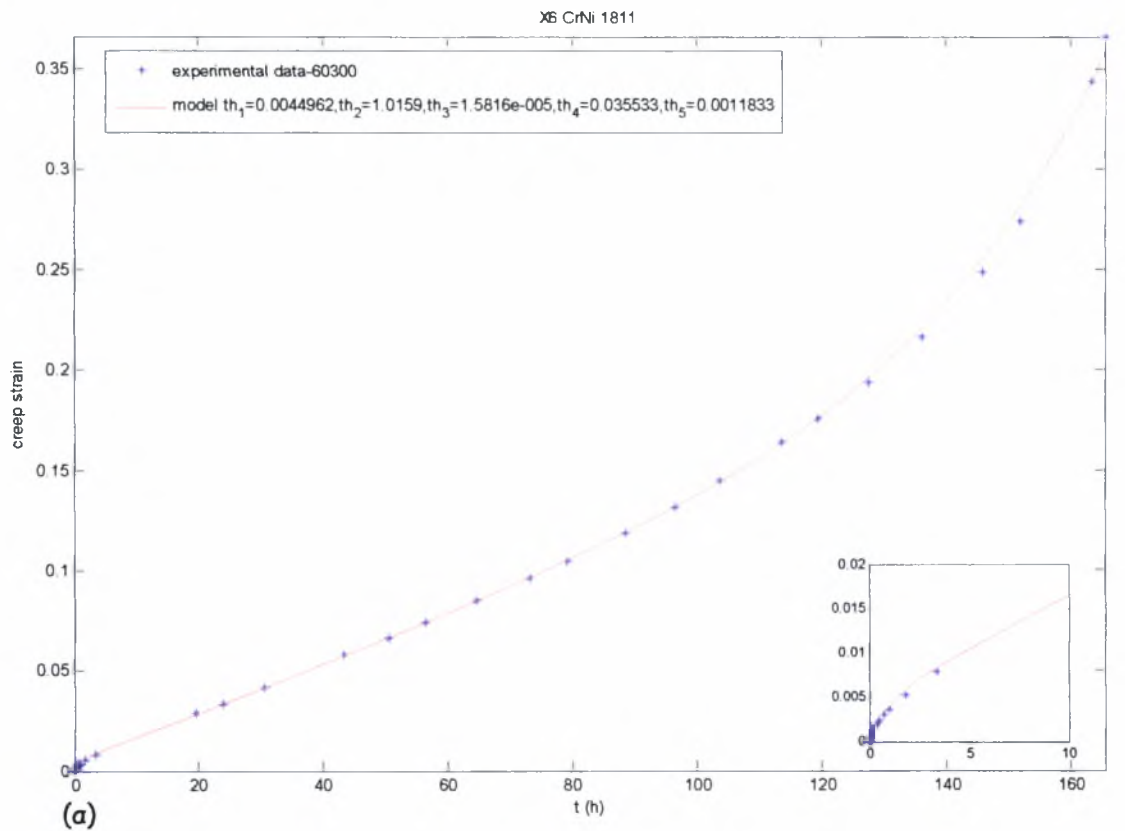


**Σχ 4.55** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

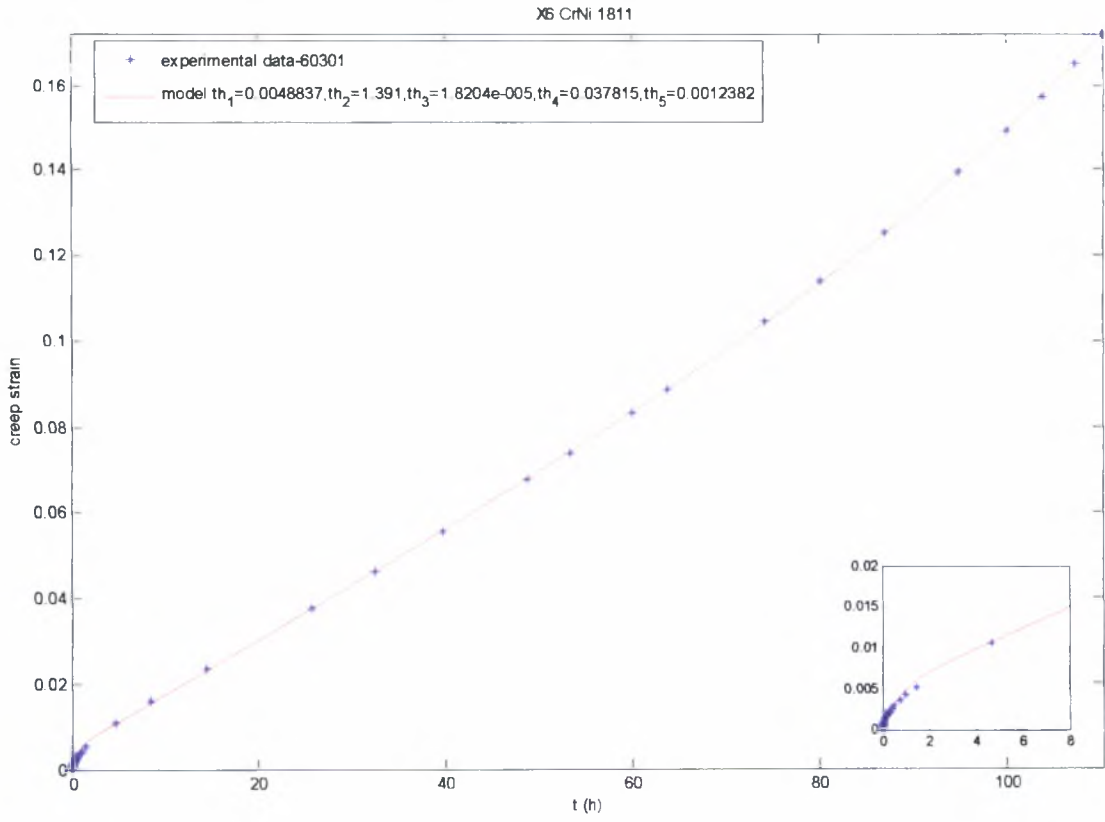
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



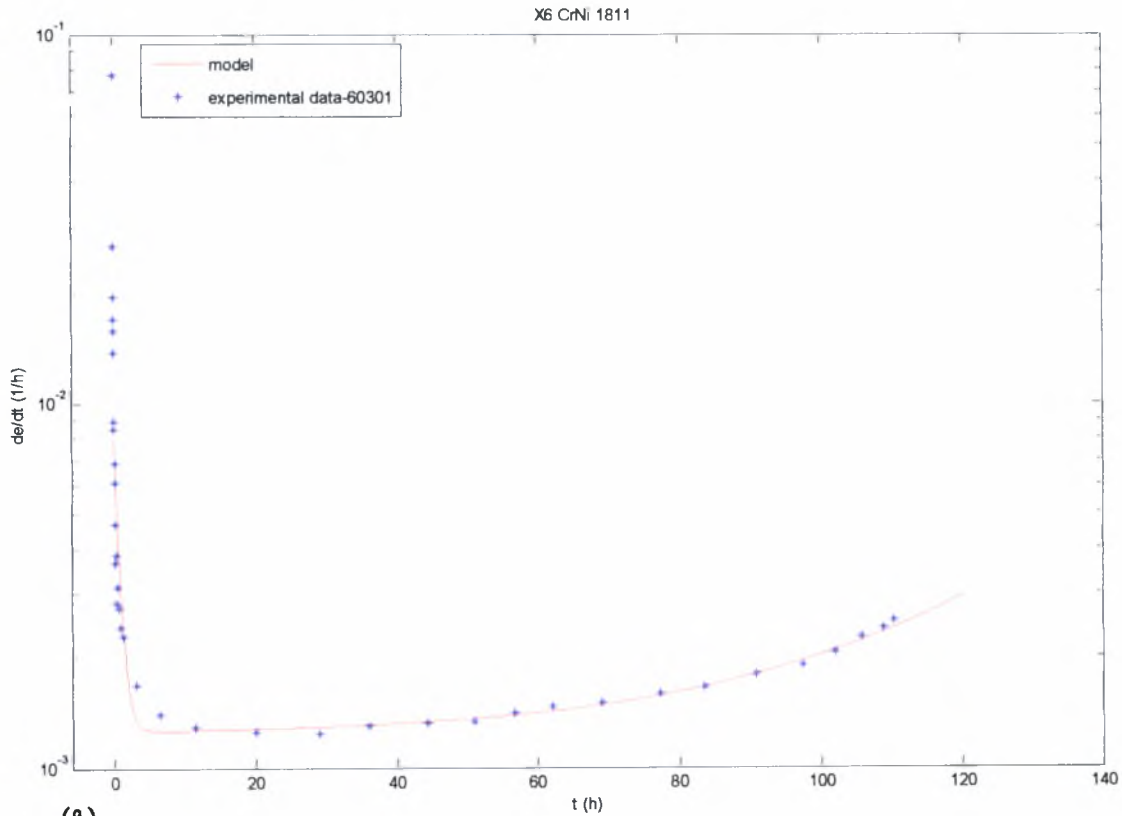
**Σχ 4.56** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



Σχ 4.57 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



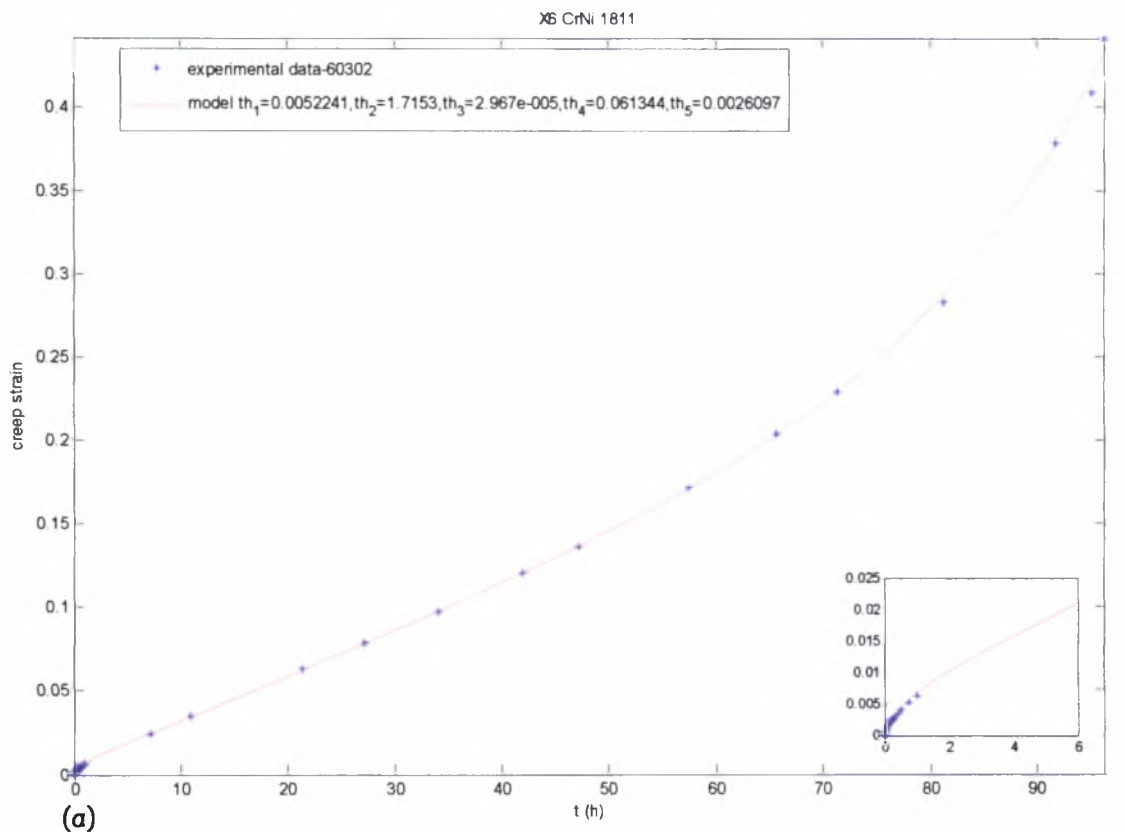
(a)



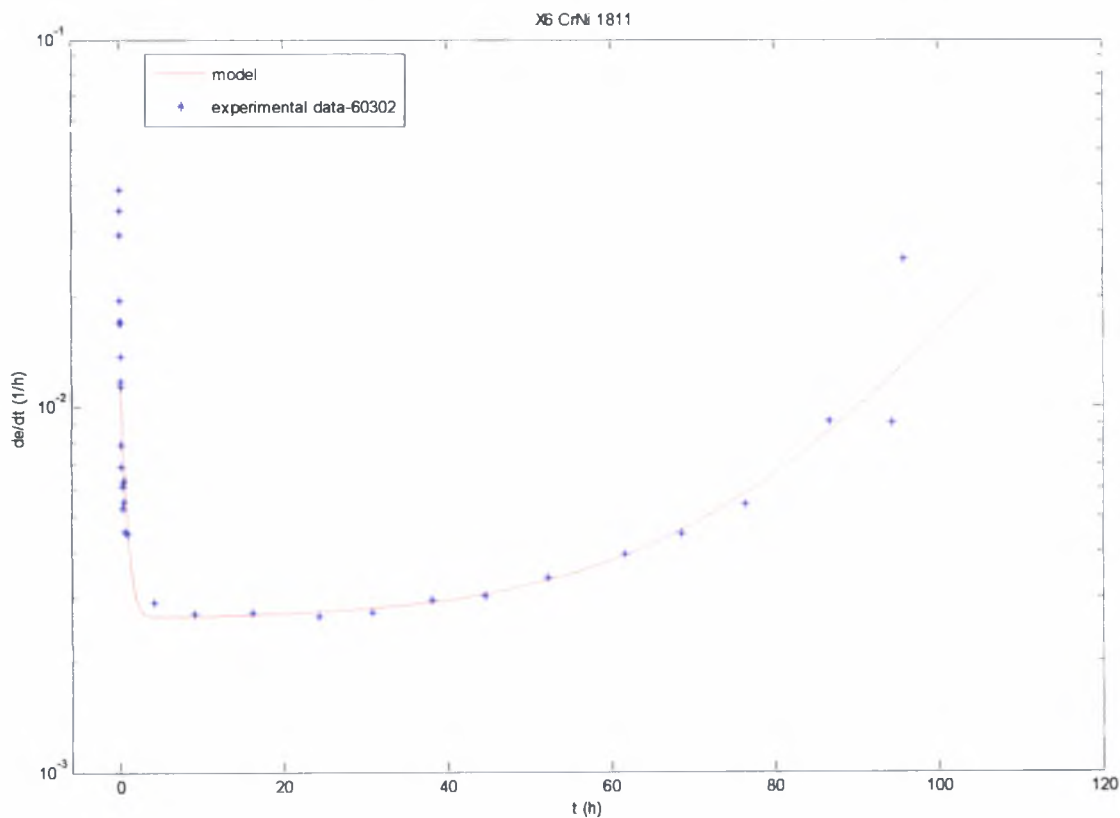
(β)

Σχ 4.58 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



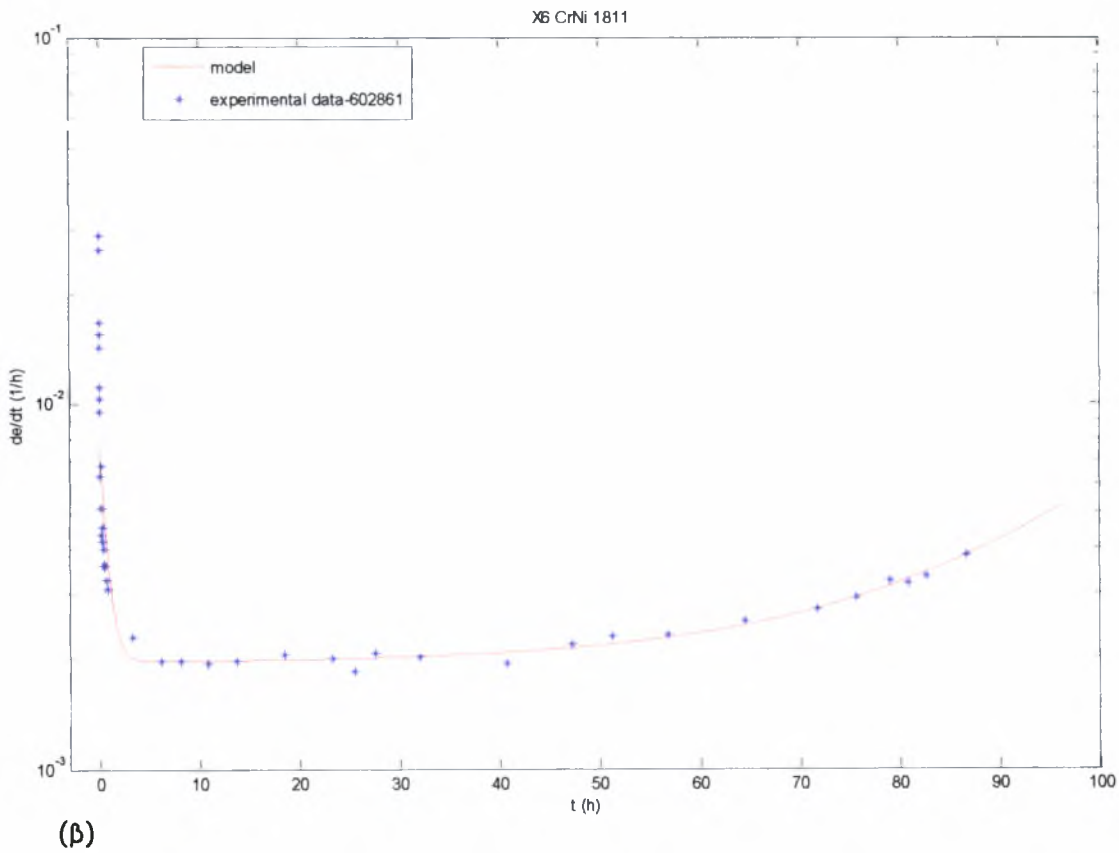
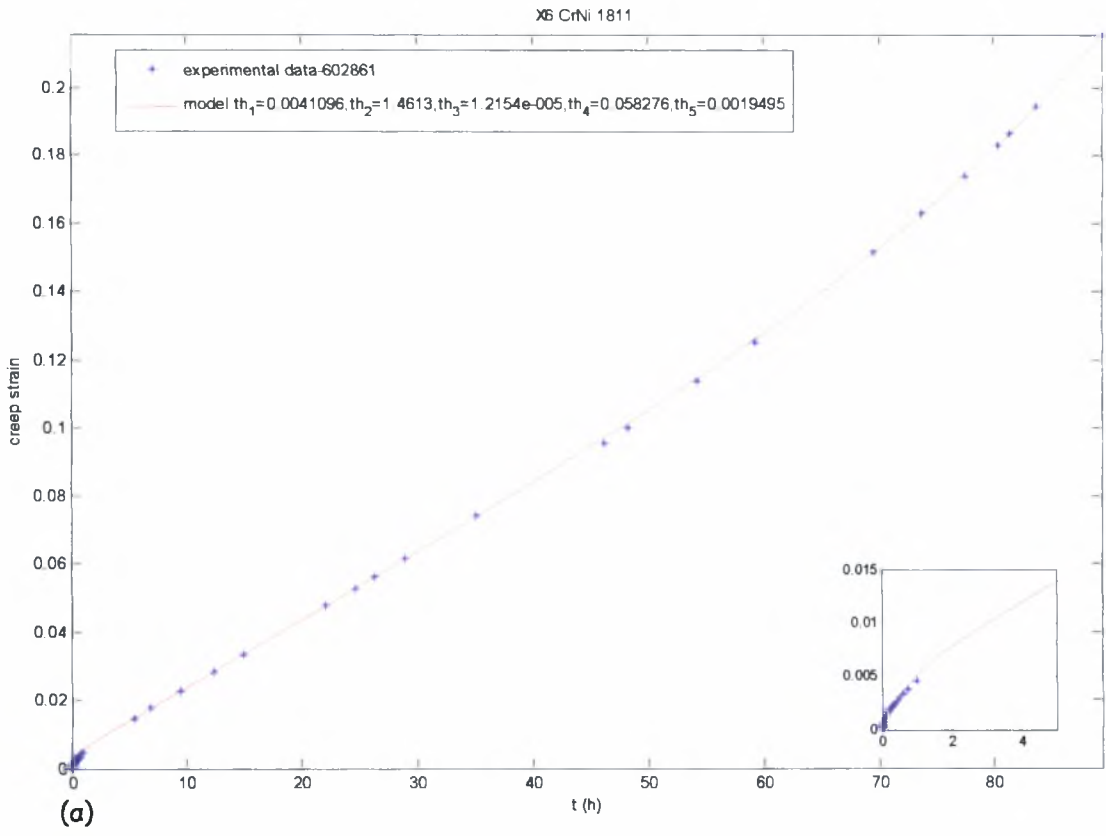
(α)



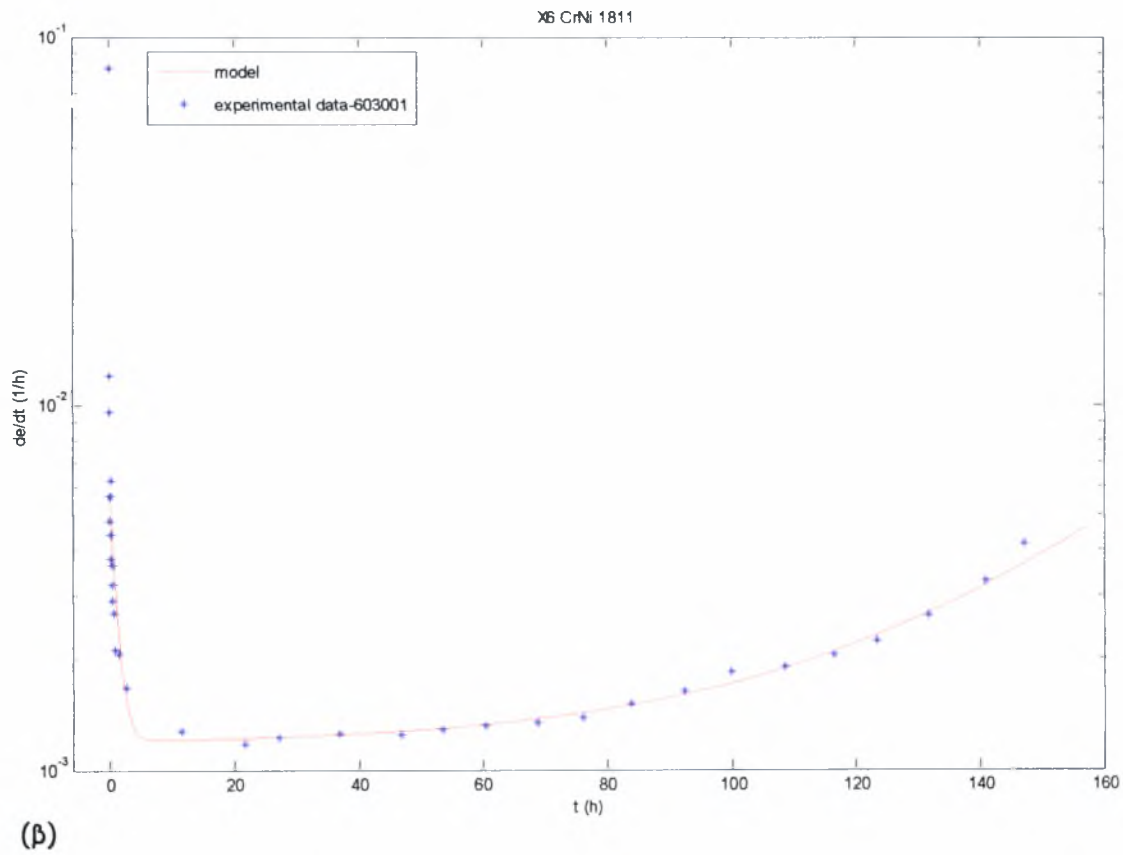
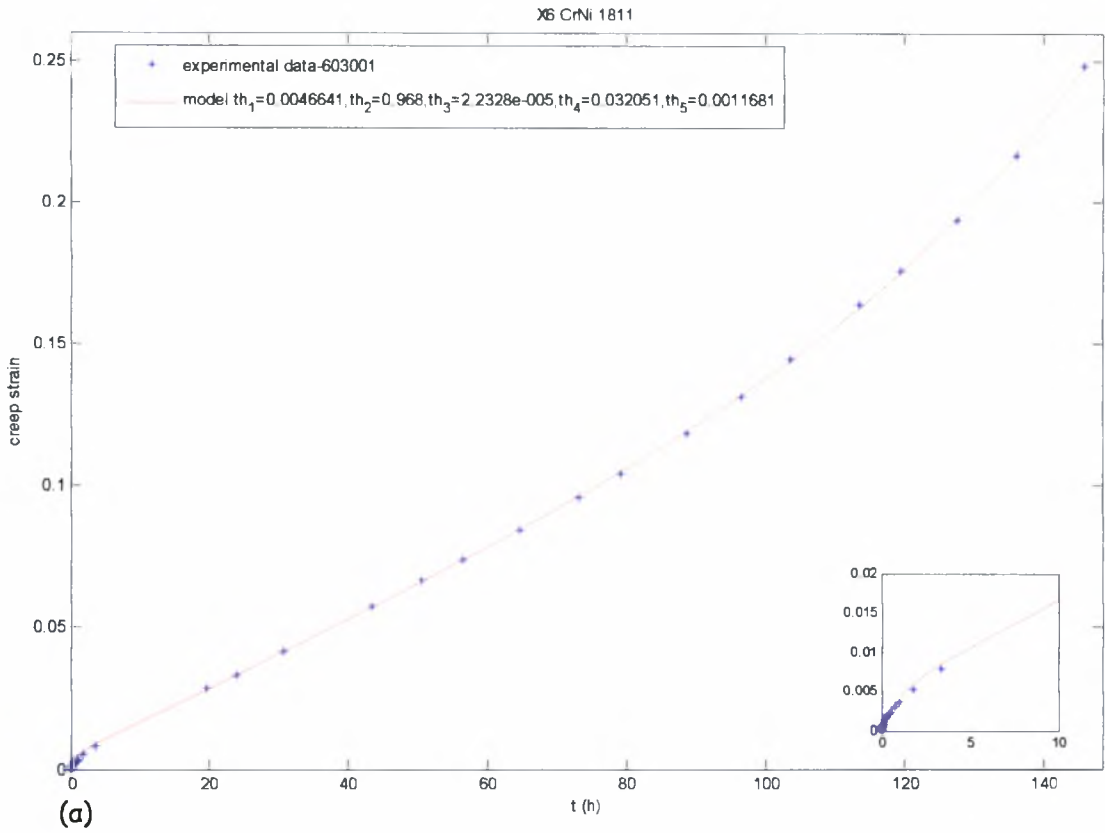
(β)

Σχ 4.59 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

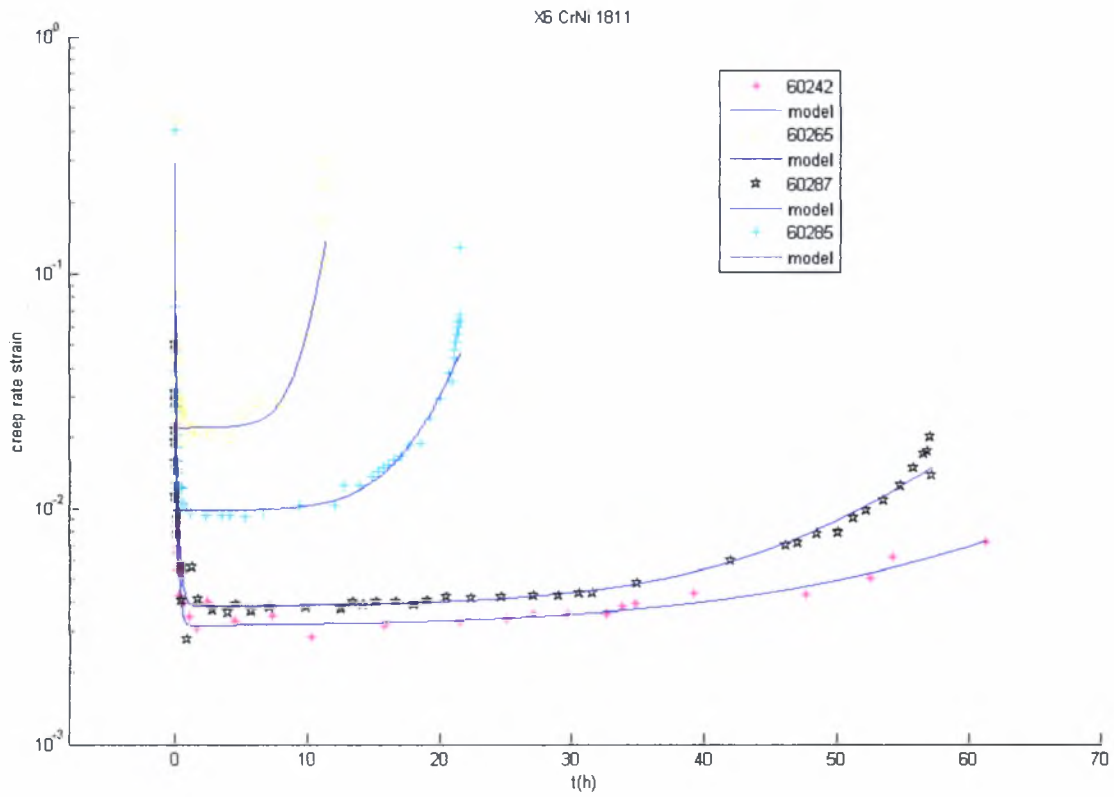
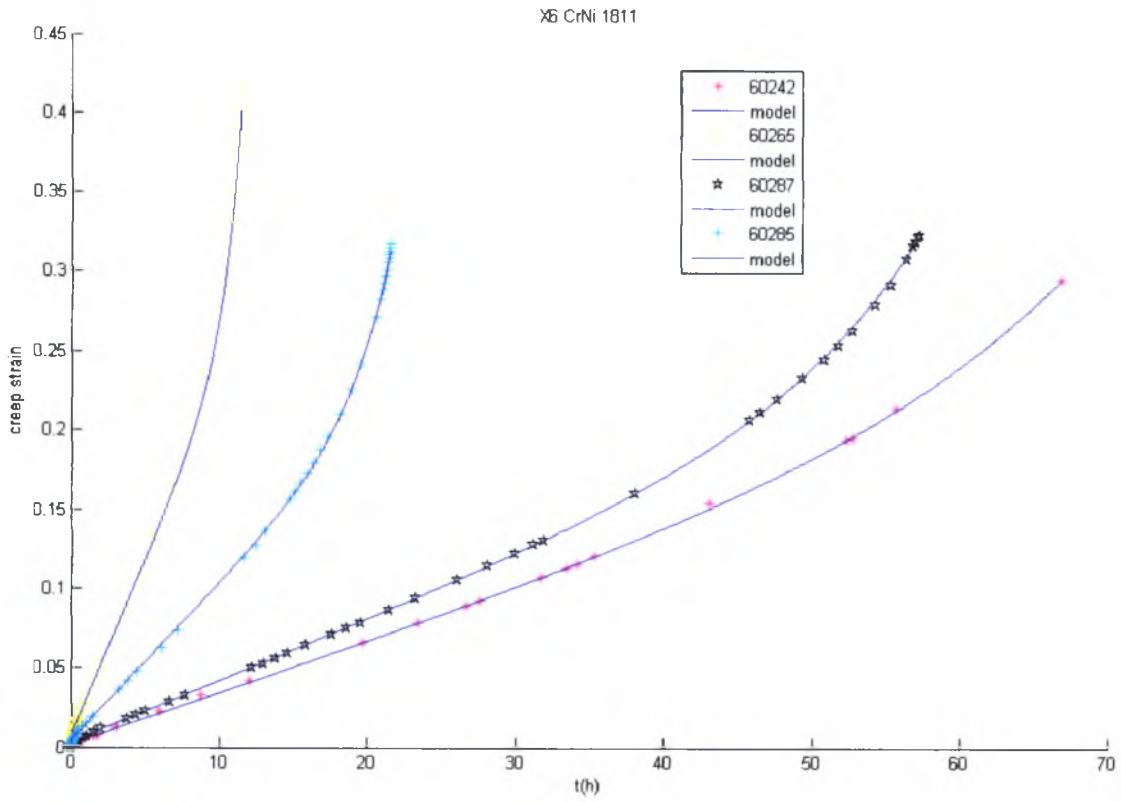
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



**Σχ 4.60** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

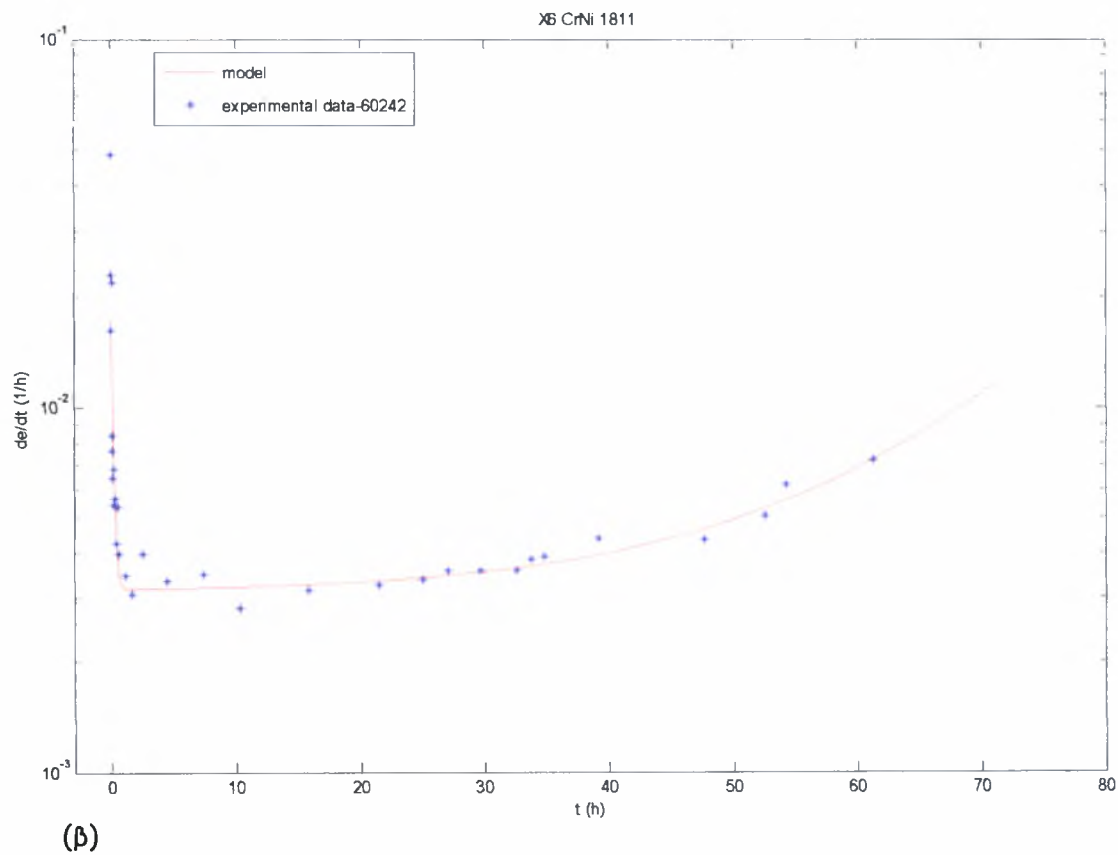
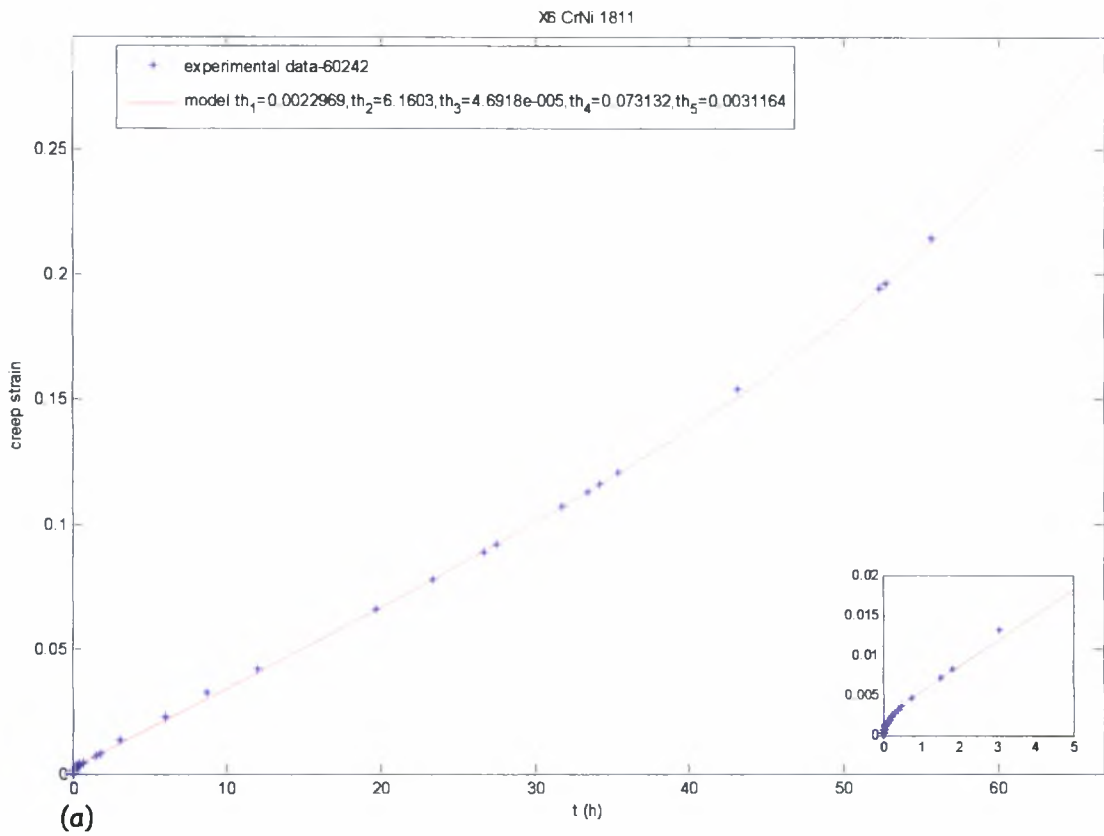


Σχ 4.61 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

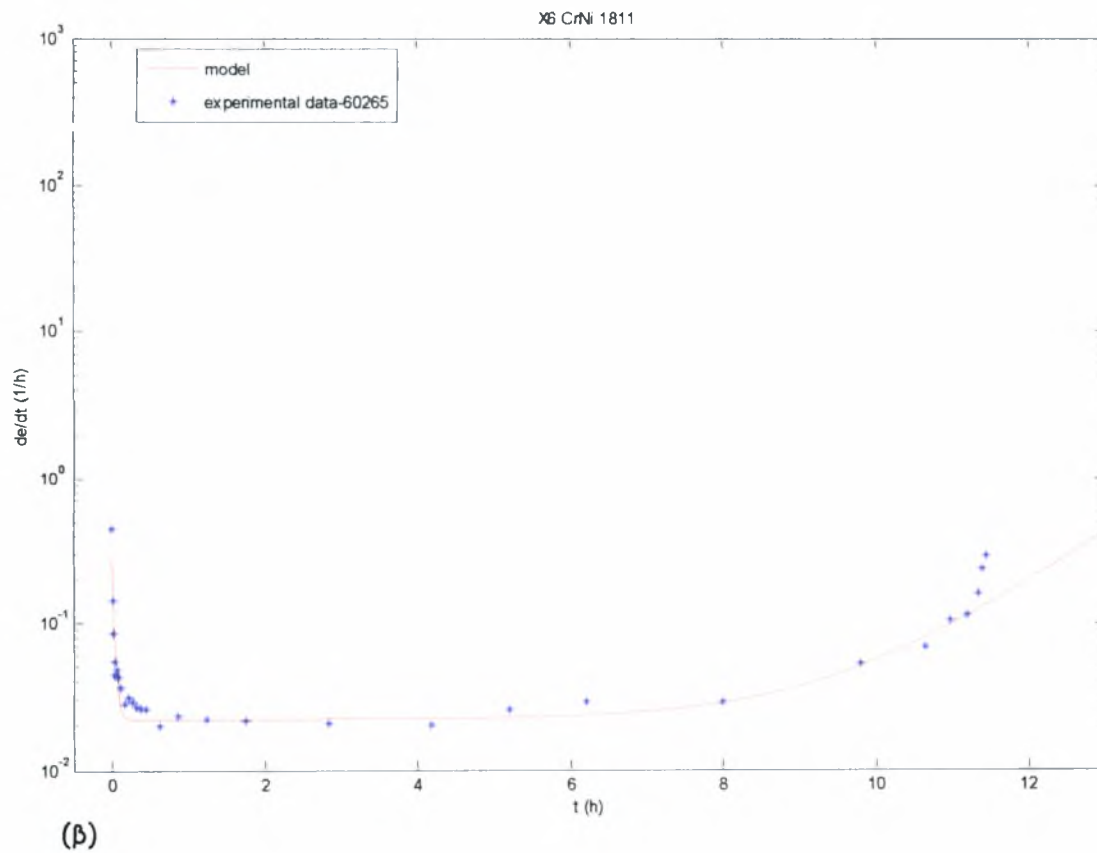
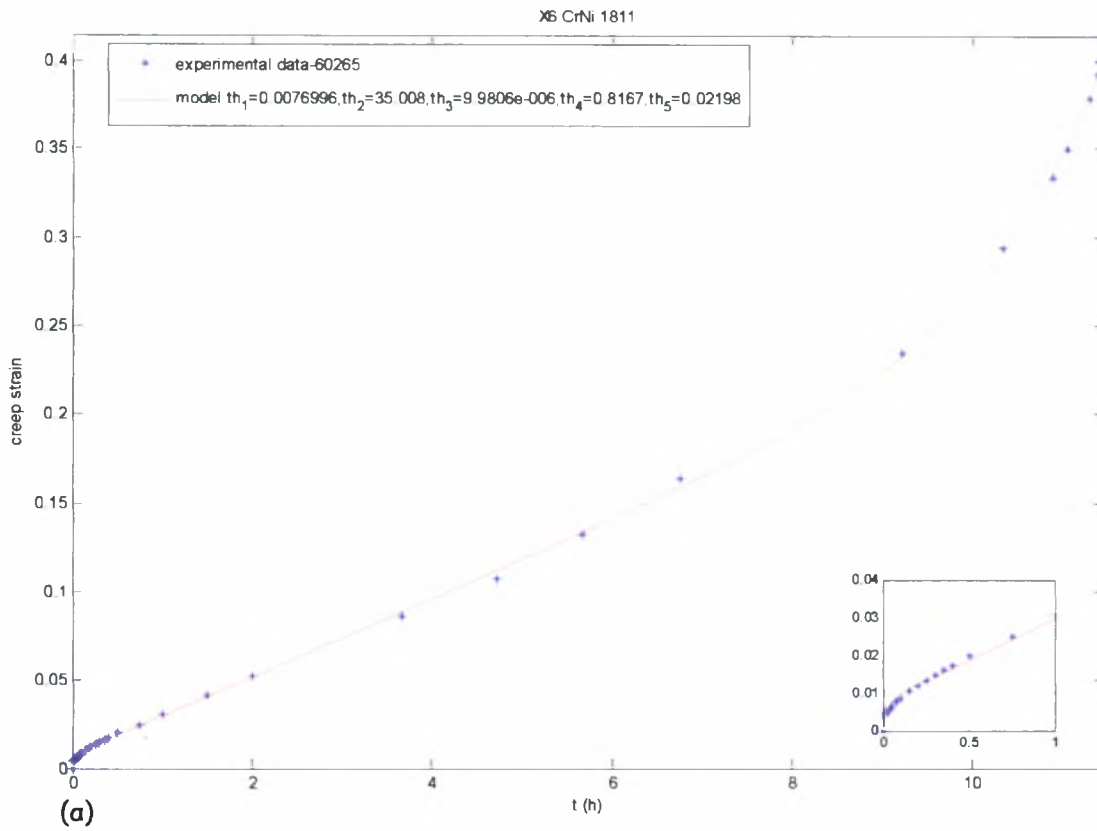


**Σχ 4.62** Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 130Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.

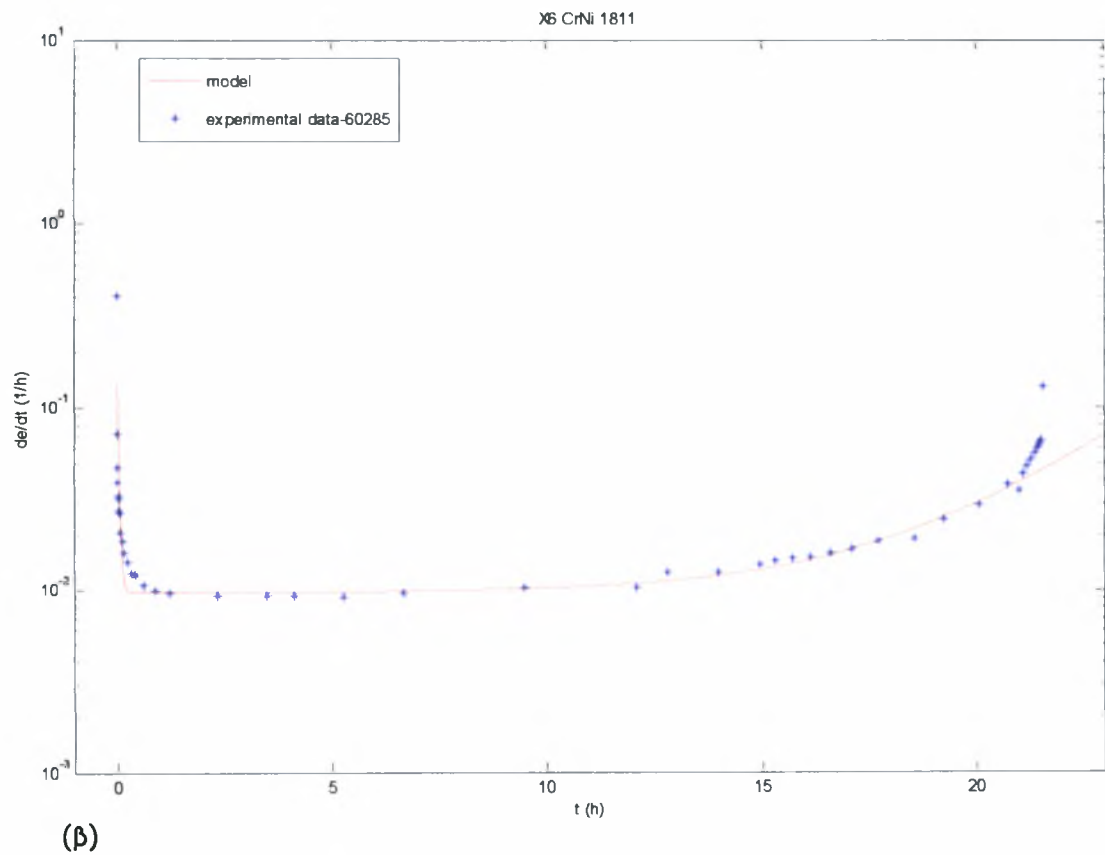
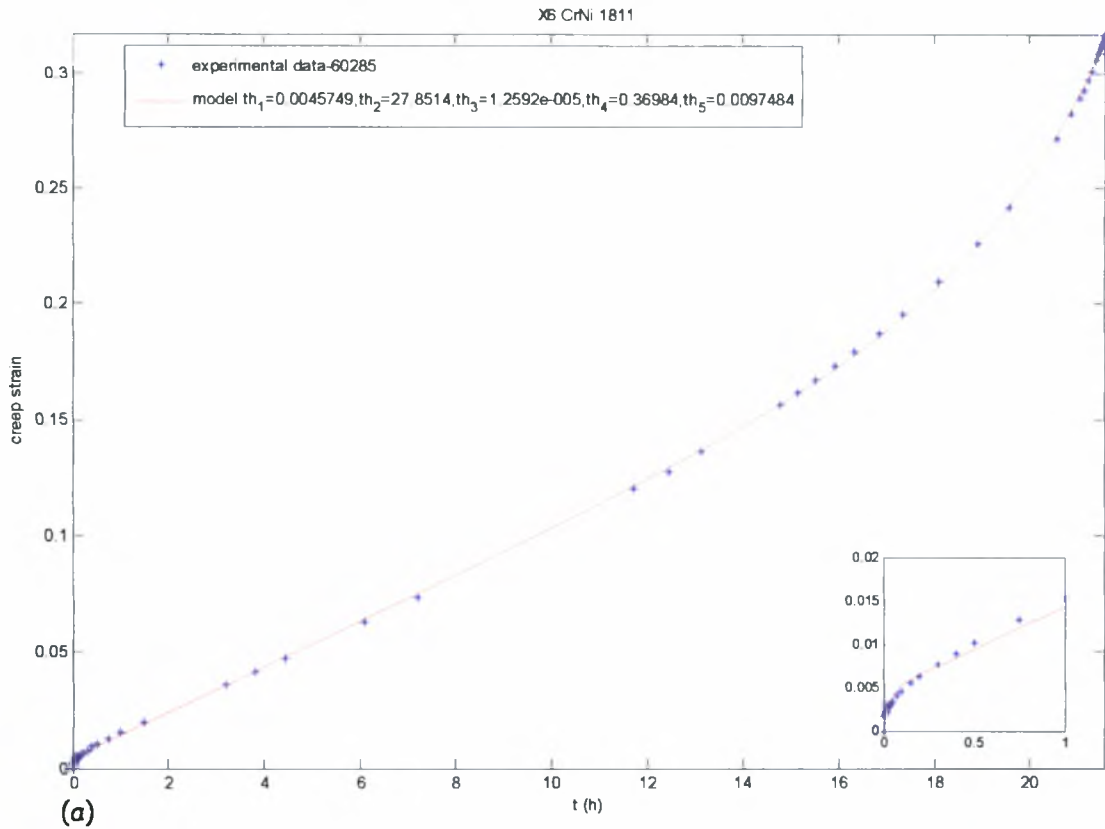




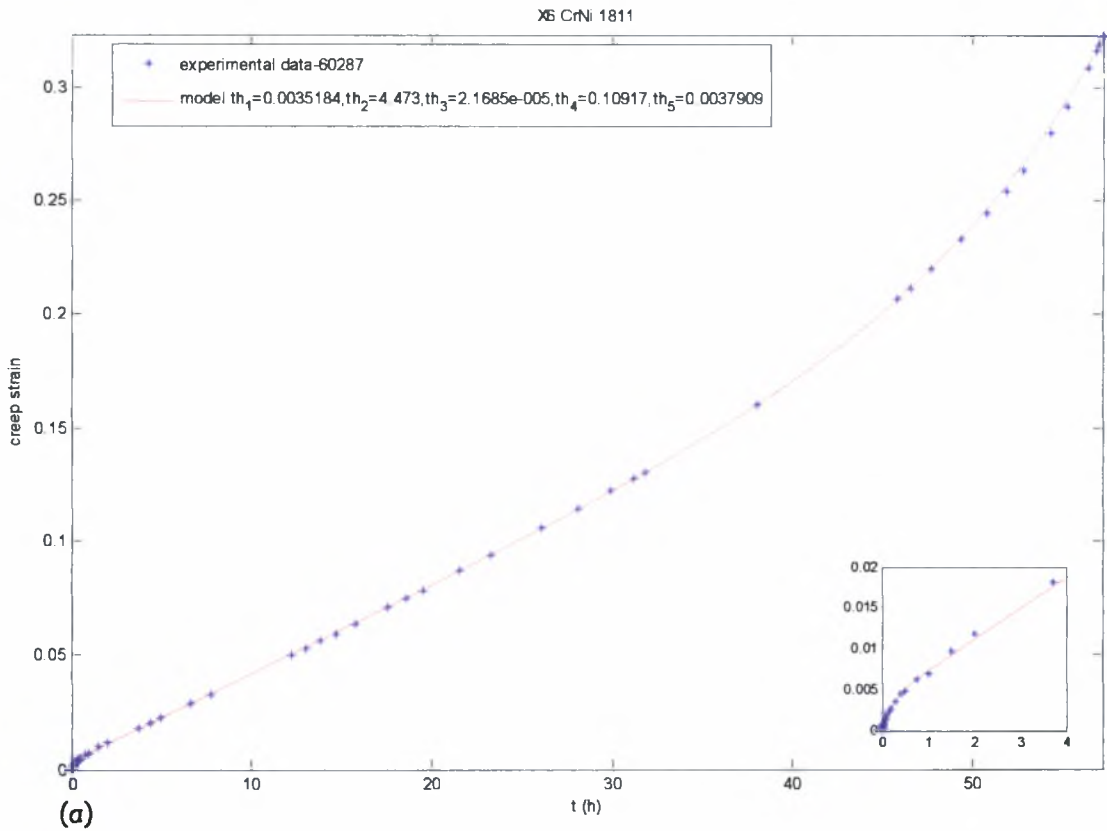
**Σχ 4.63** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 130Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



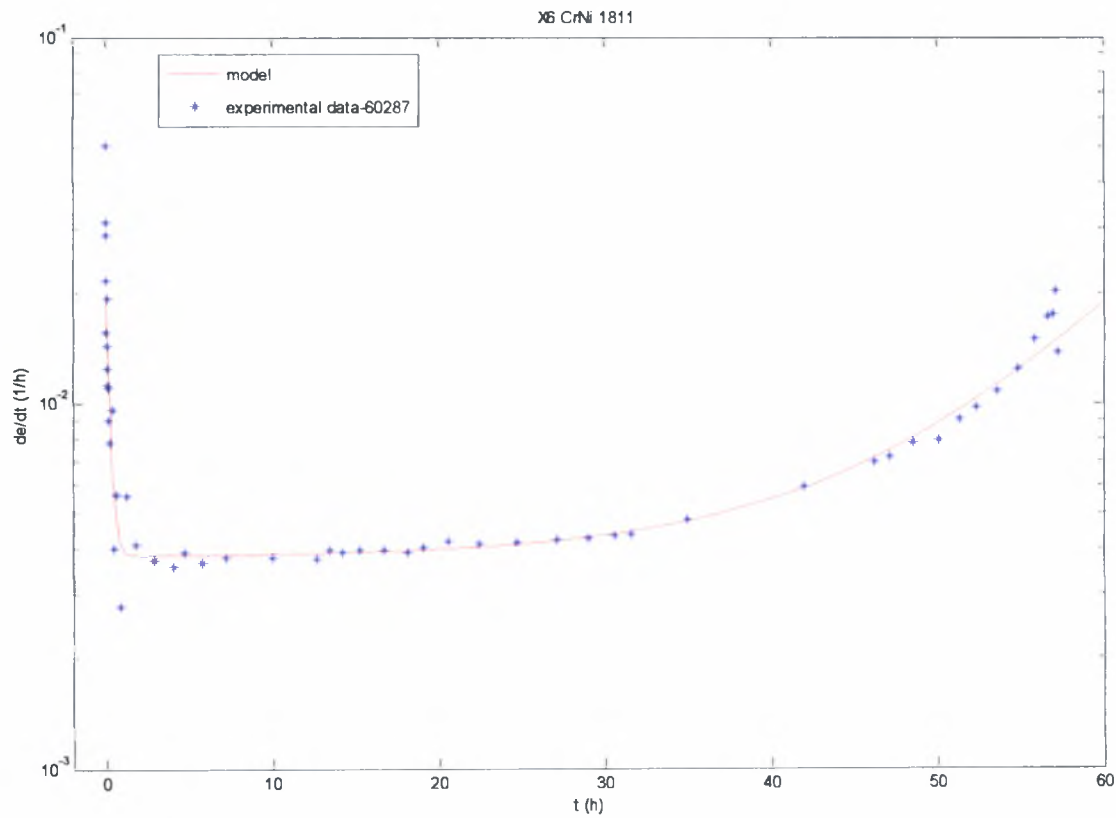
Σχ 4.64 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 130Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



**Σχ 4.65** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 130Μρα και Θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



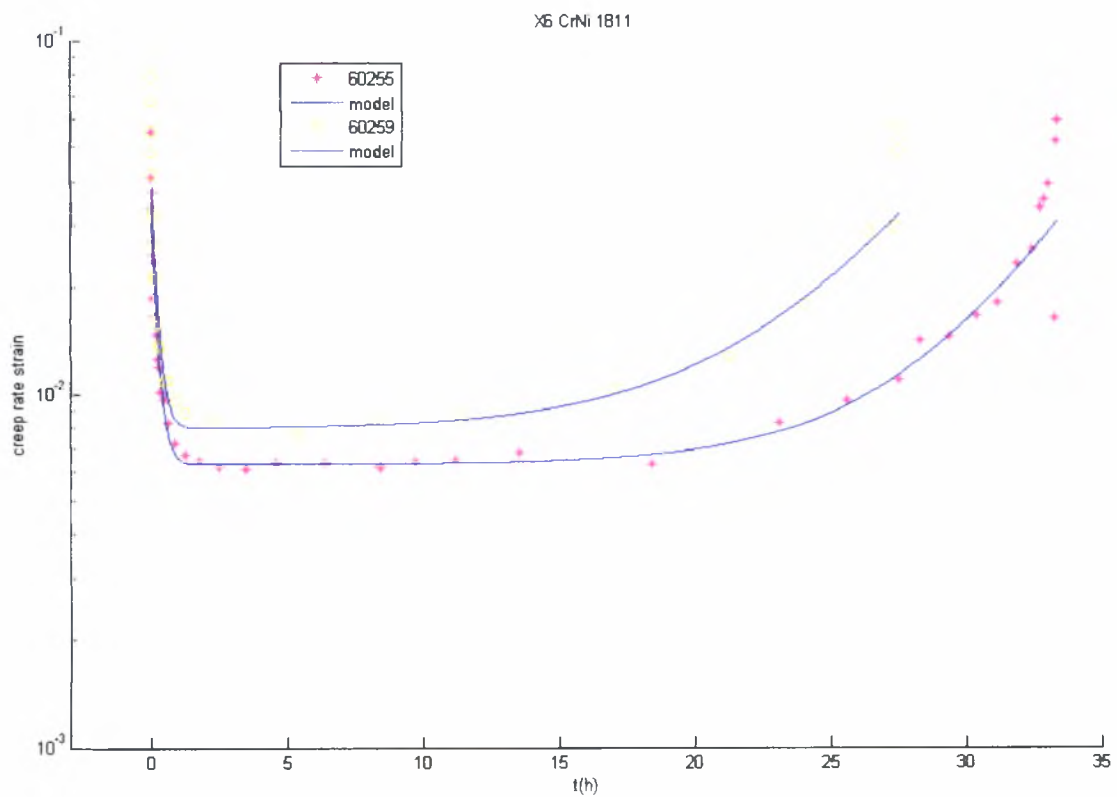
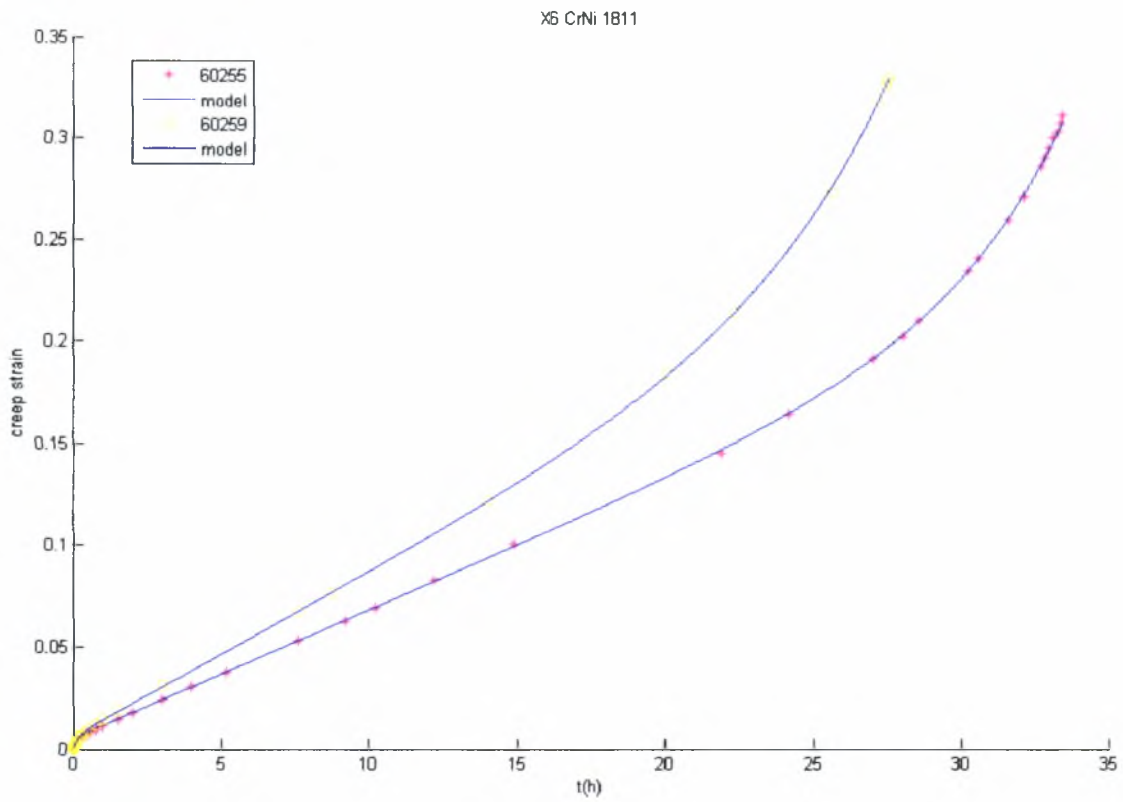
(a)



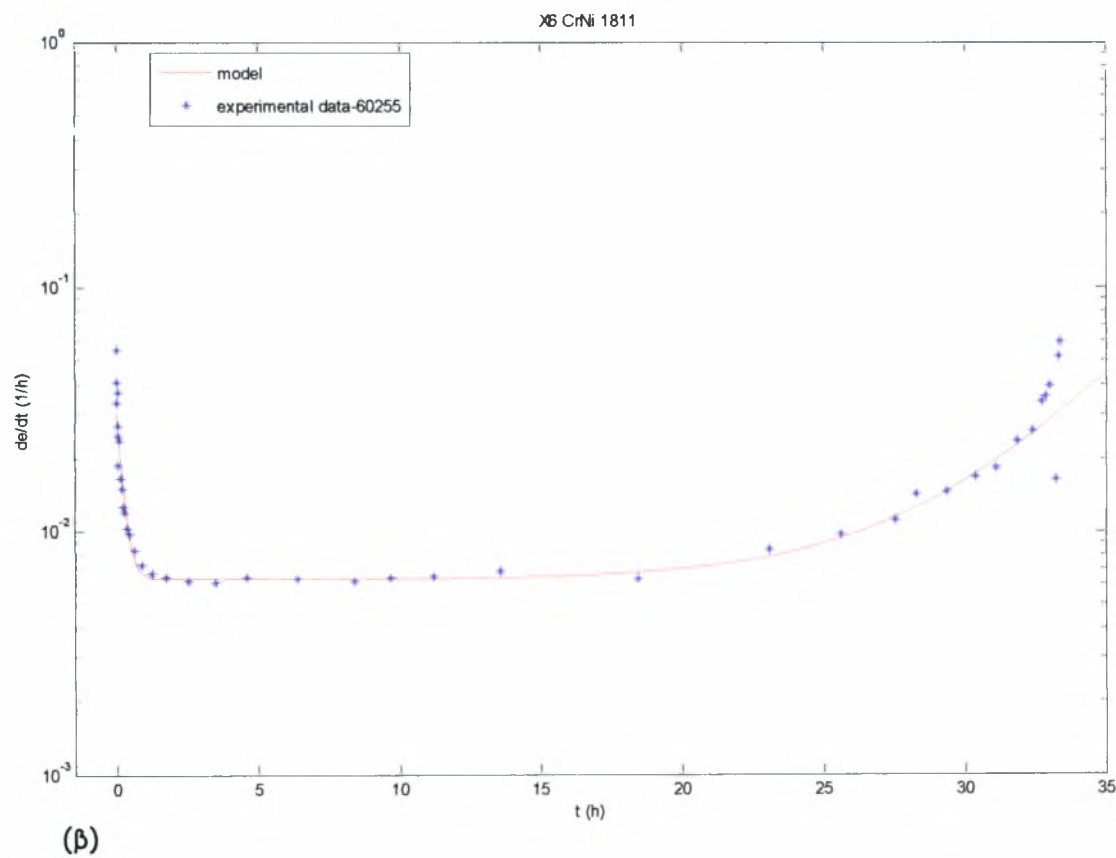
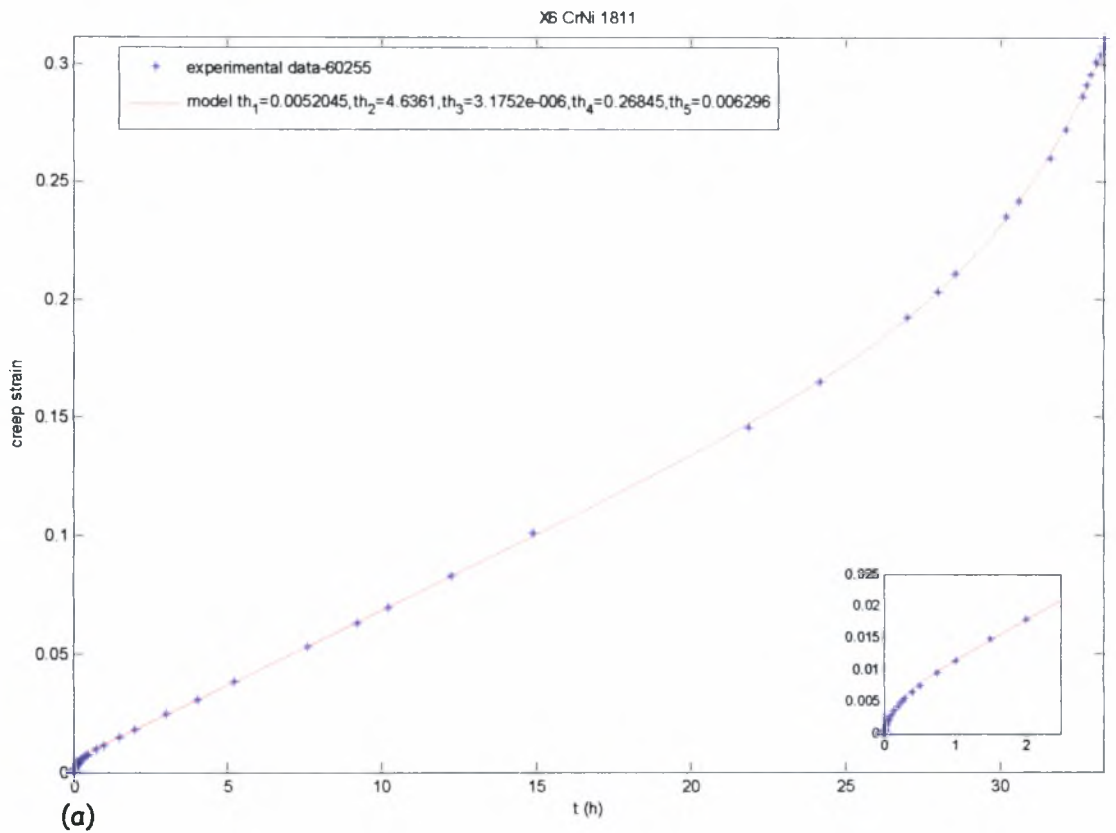
(b)

Σχ 4.66 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 130Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

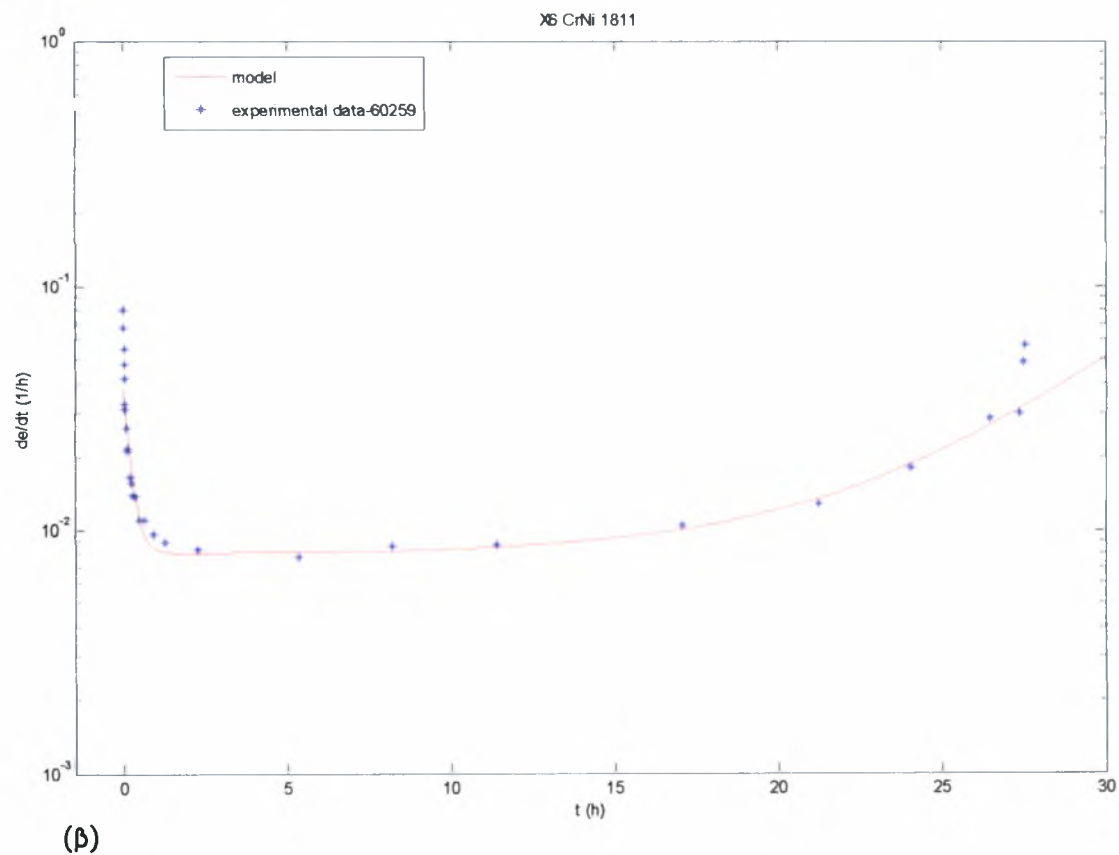
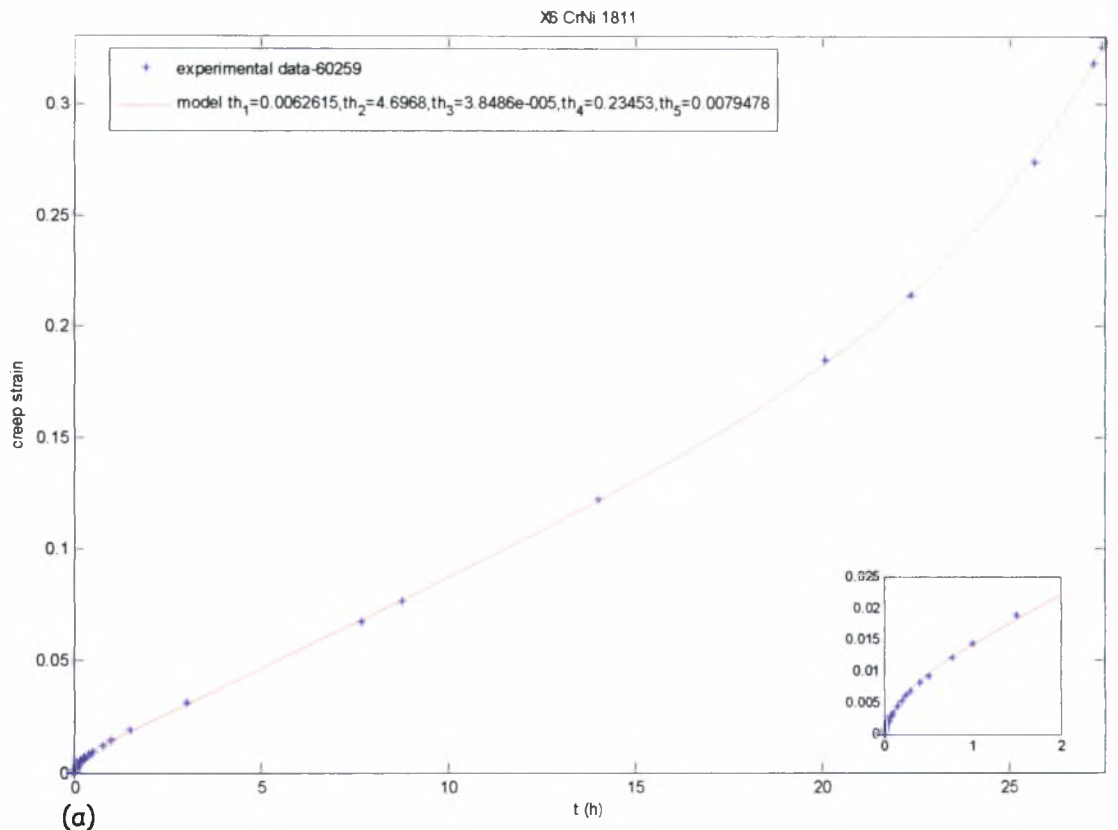


**Σχ 4.67** Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .



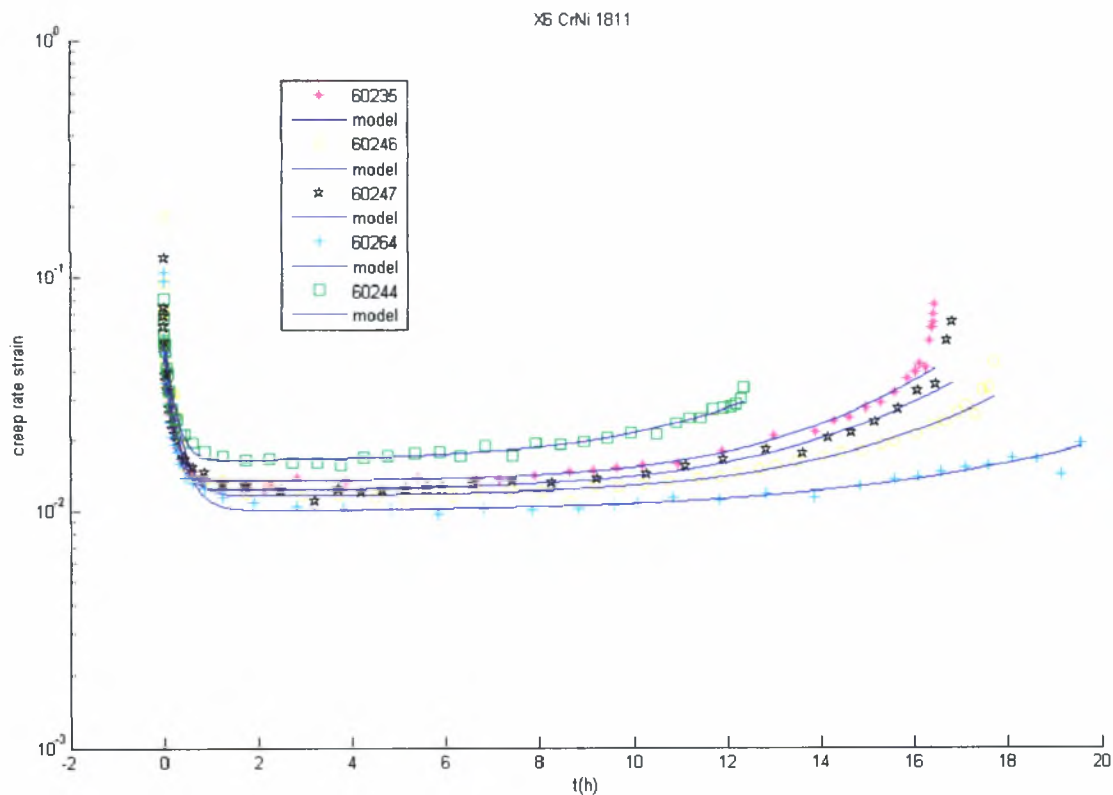
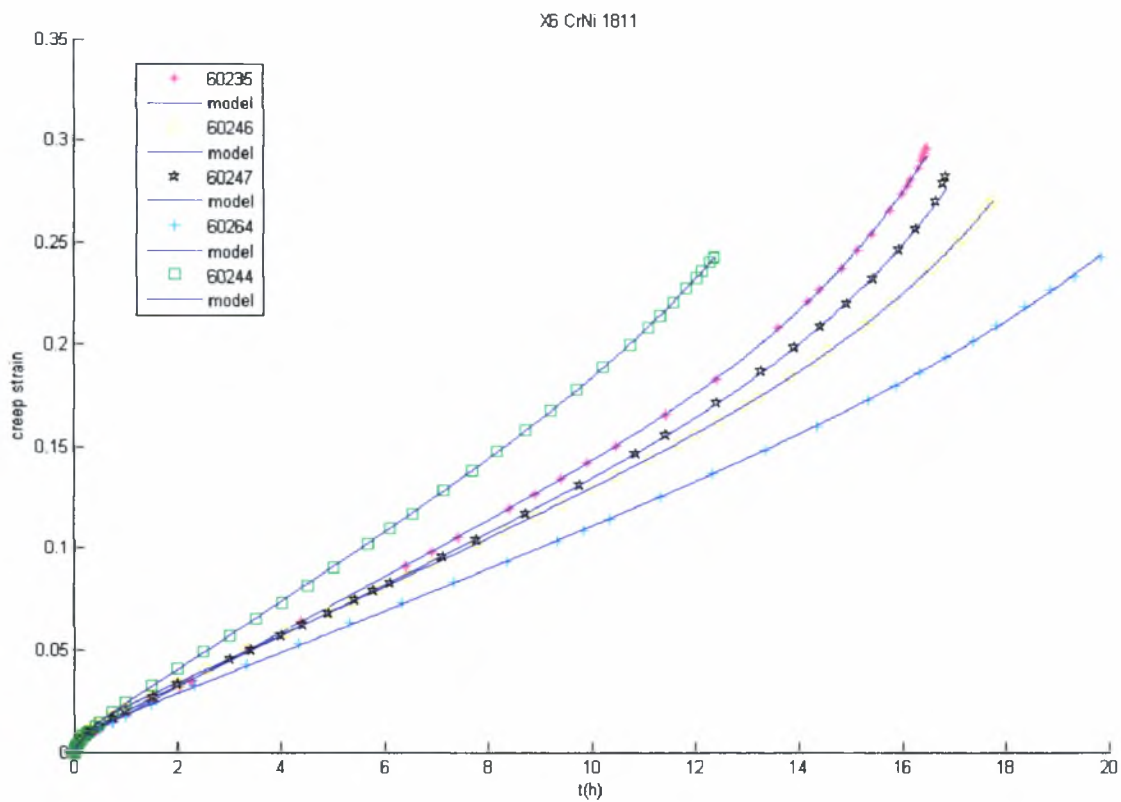
**Σχ 4.68** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140Μρα και Θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



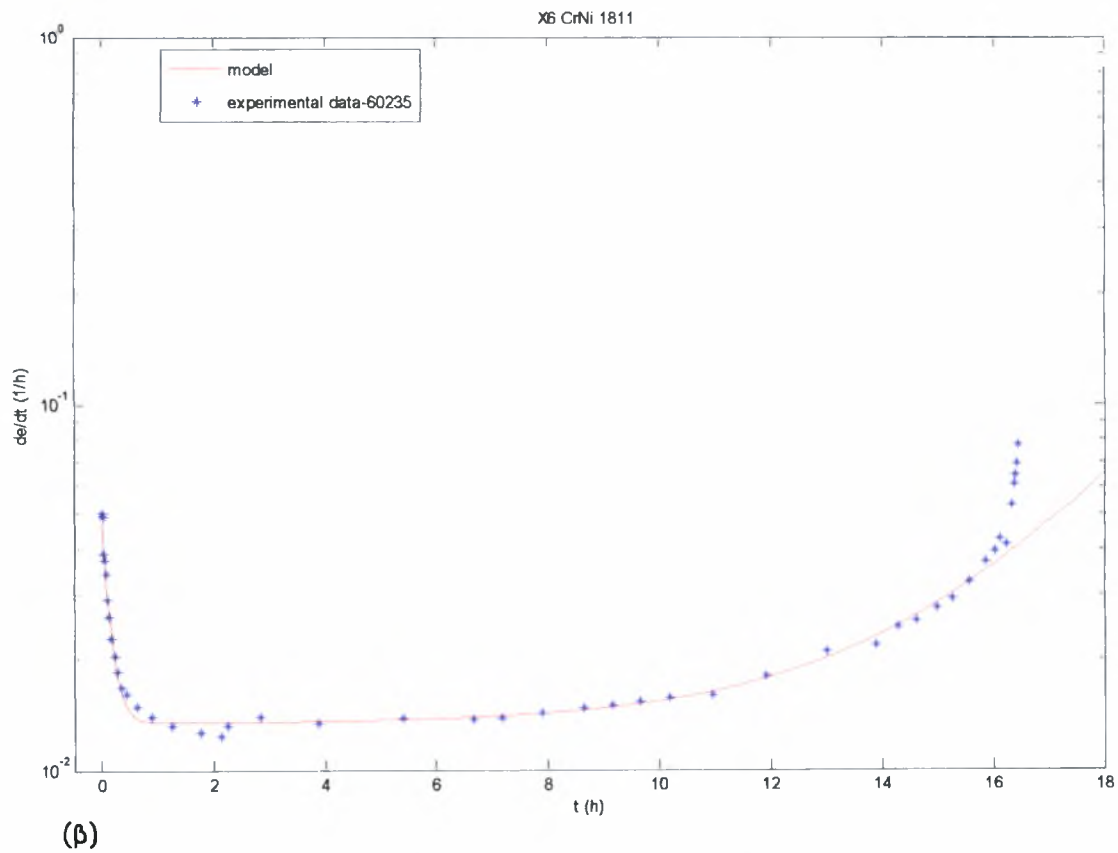
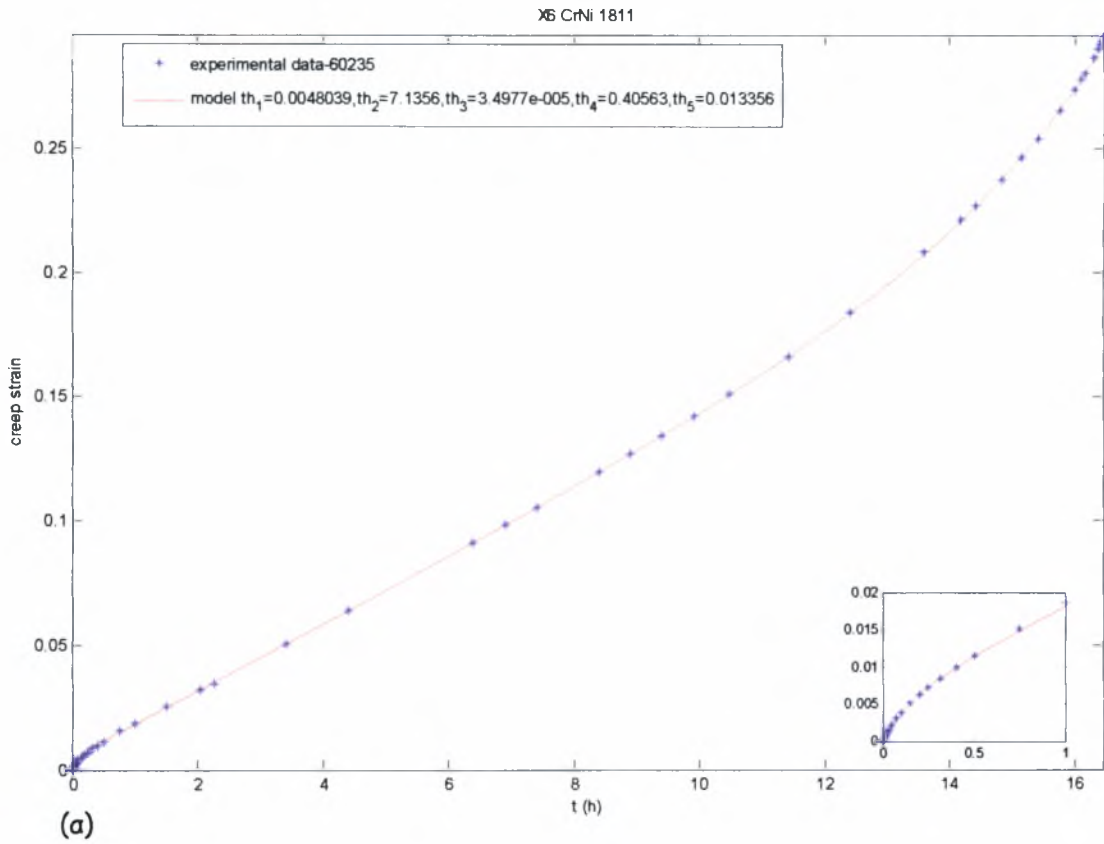
**Σχ 4.69** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

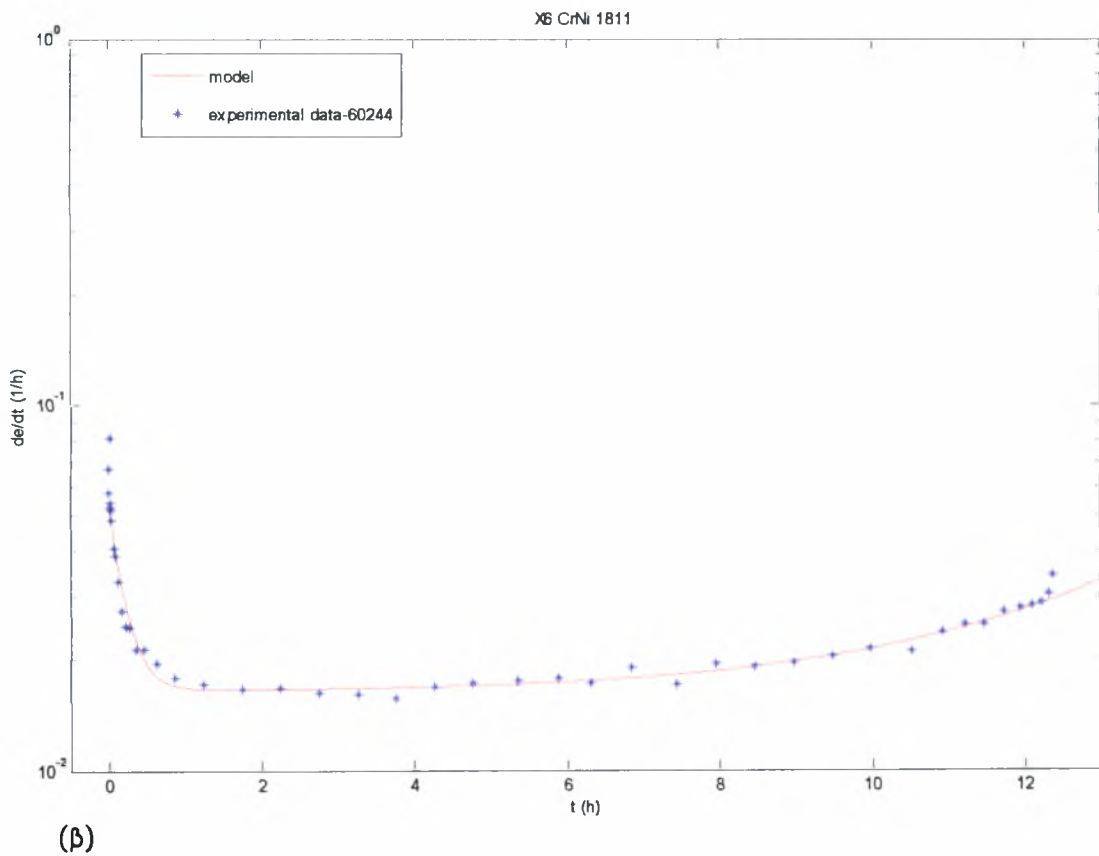
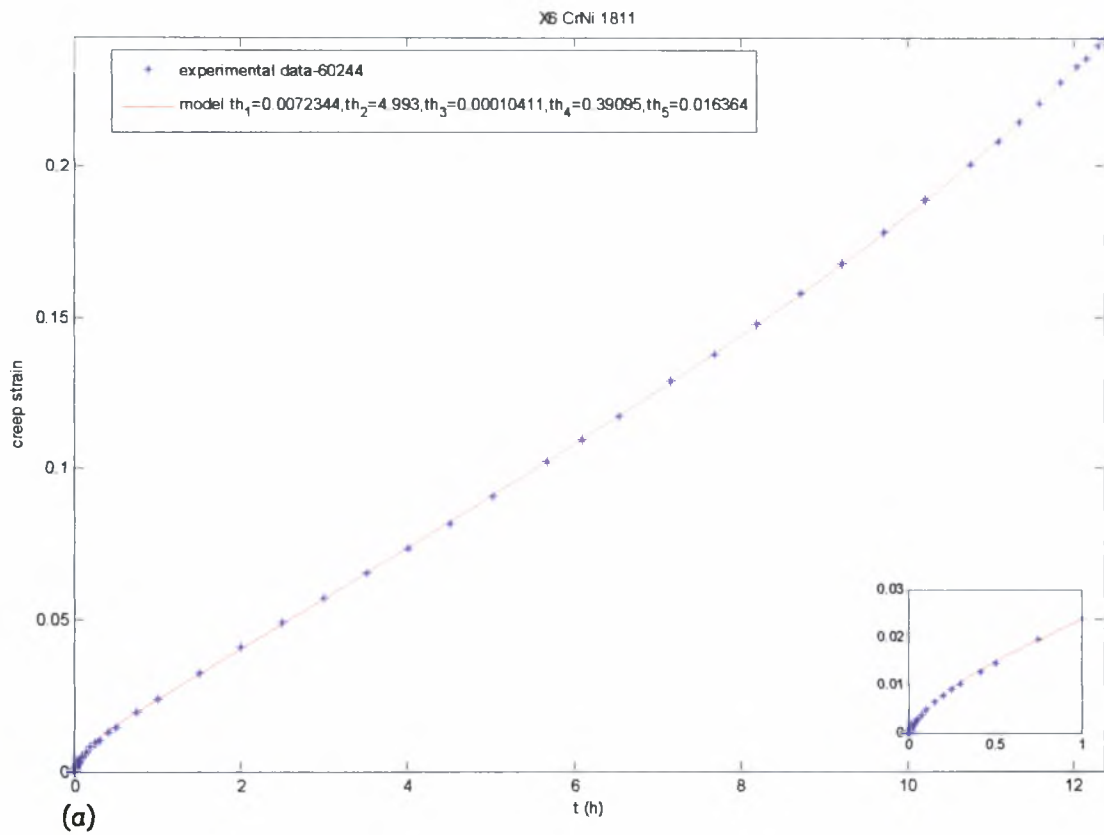


Σχ 4.70 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 150Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.

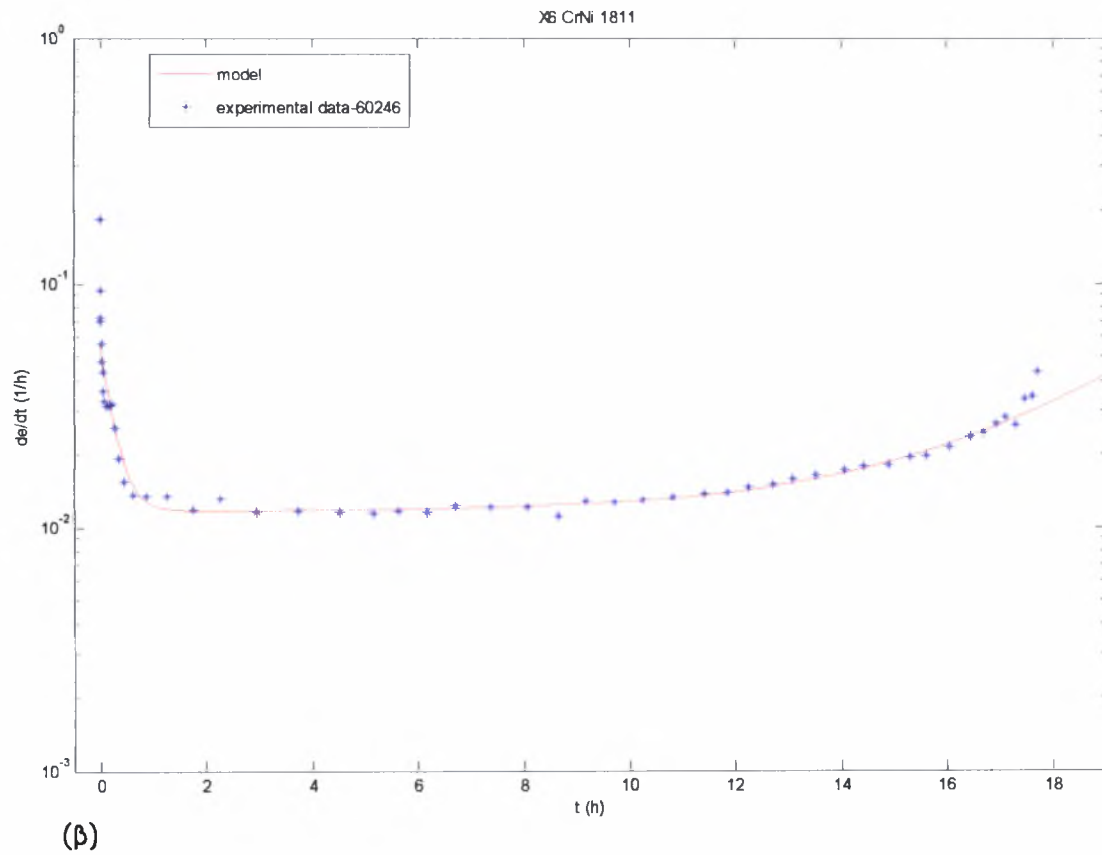
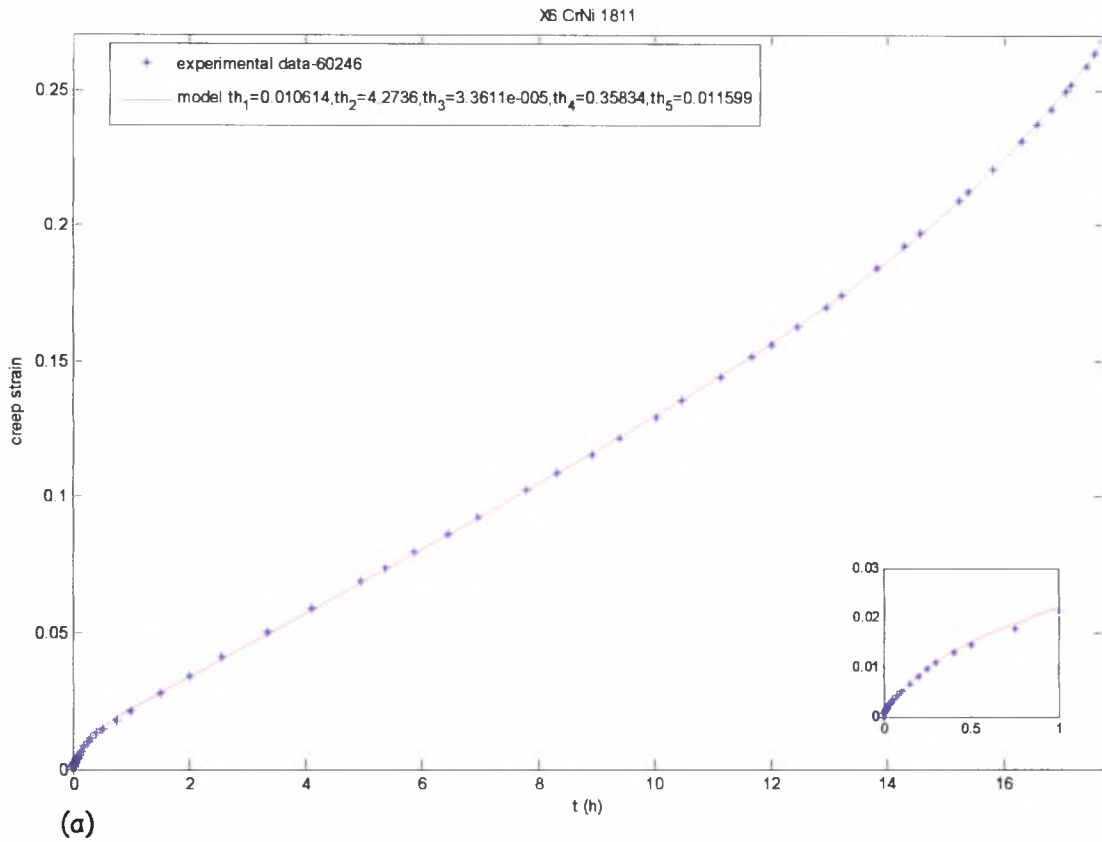




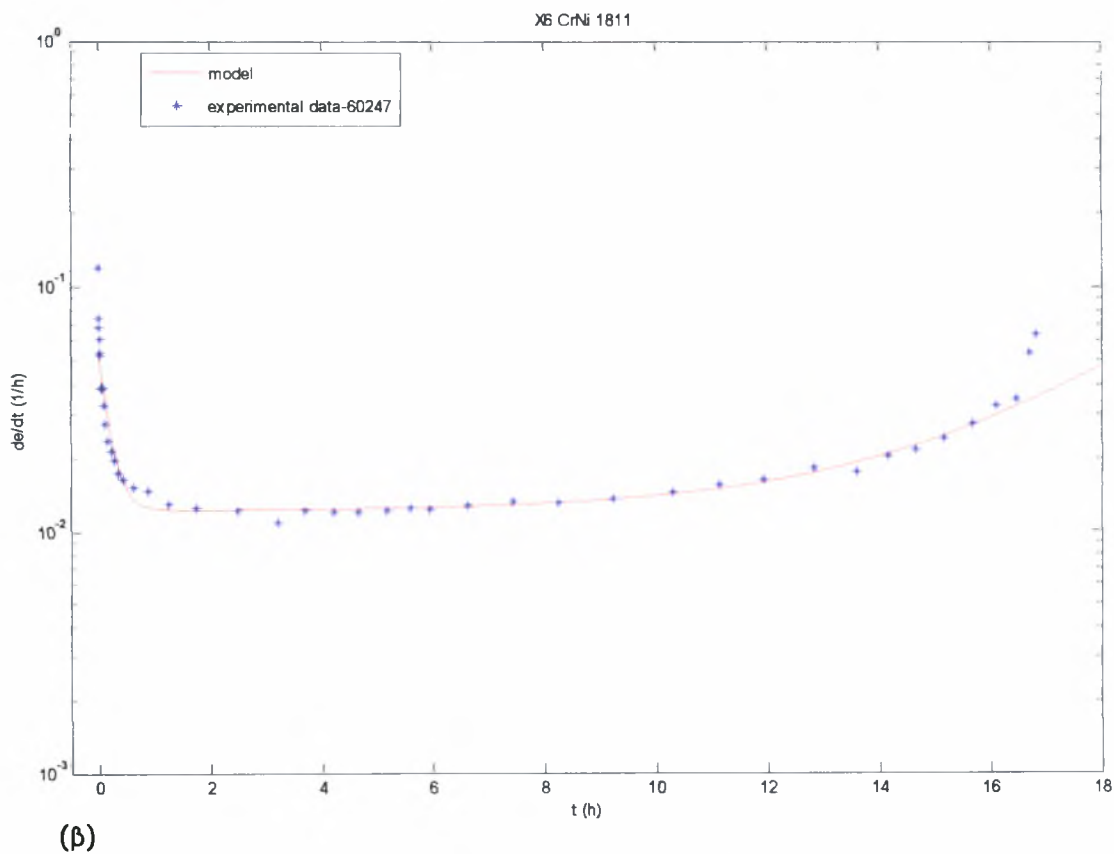
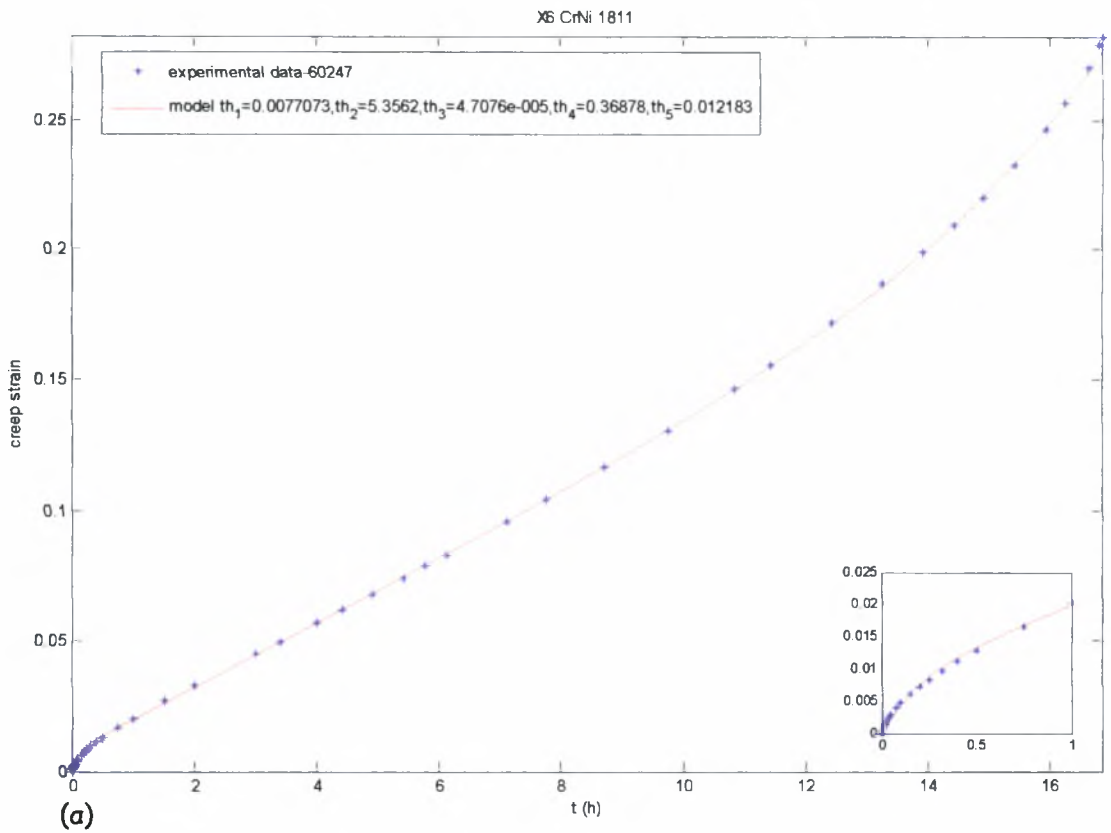
**Σχ 4.71** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 150Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



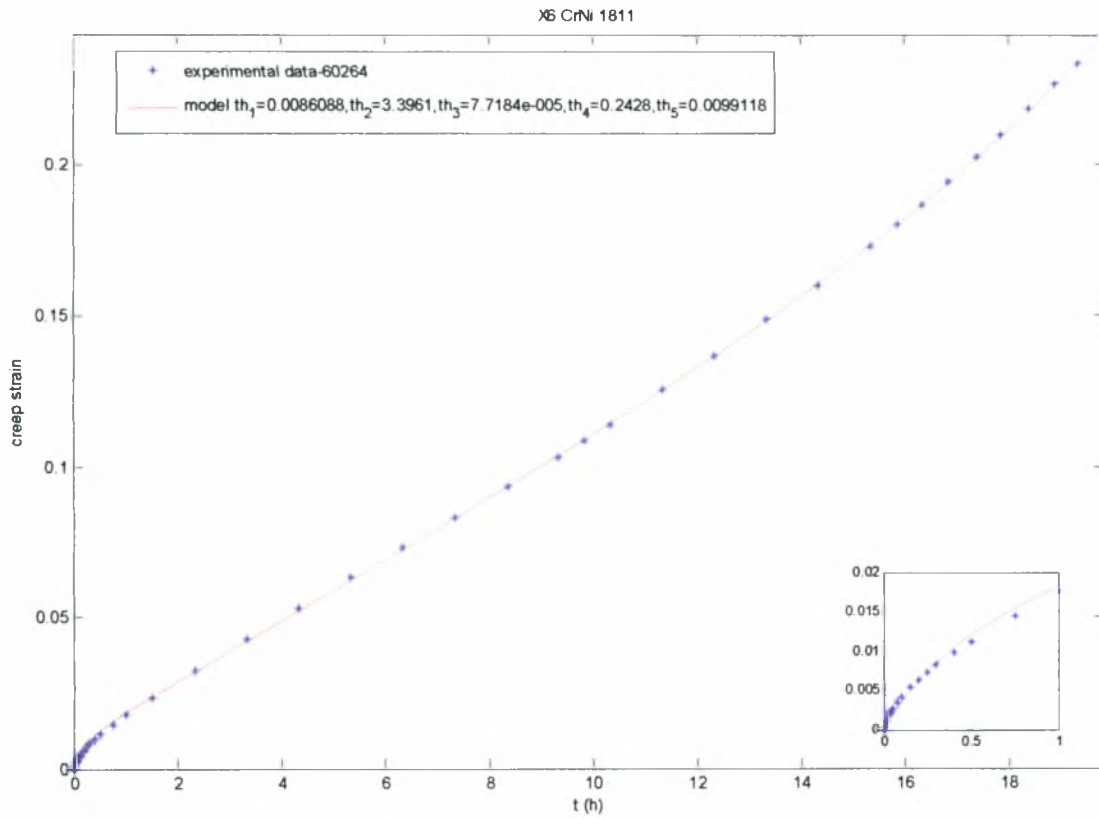
**Σχ 4.72** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 150Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



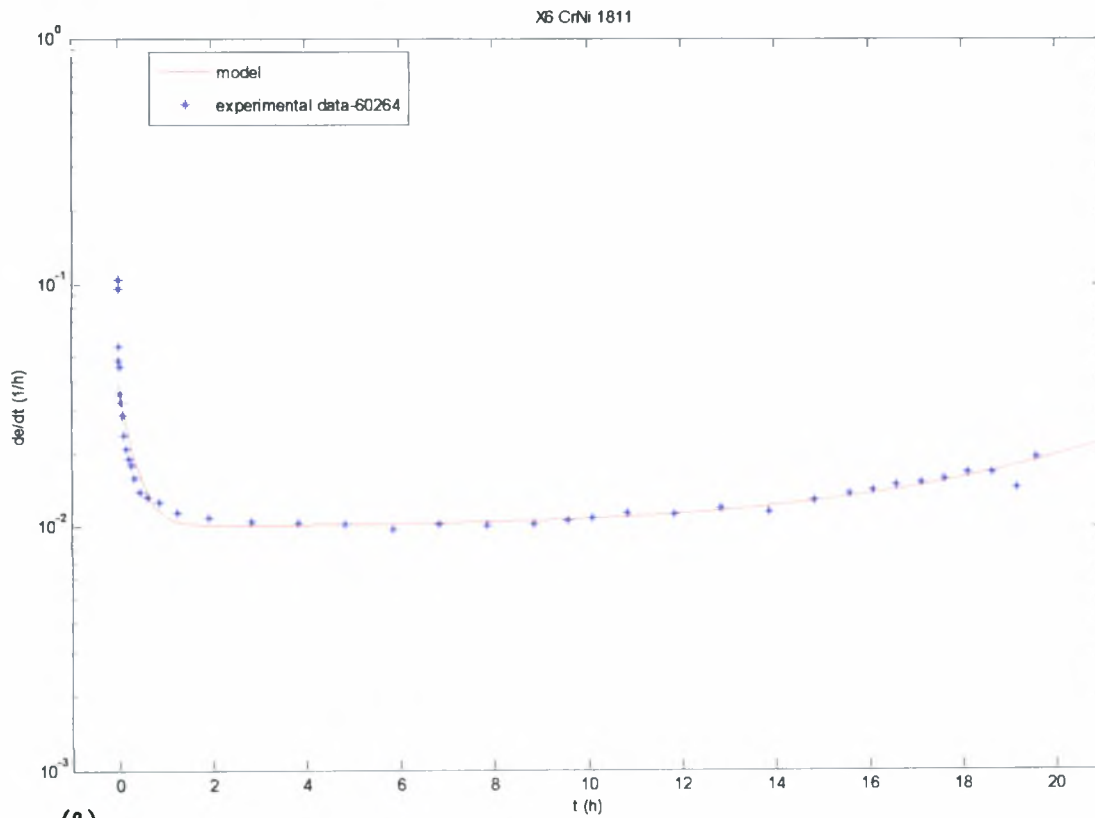
**Σχ 4.73** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 150Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



**Σχ 4.74** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 150Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



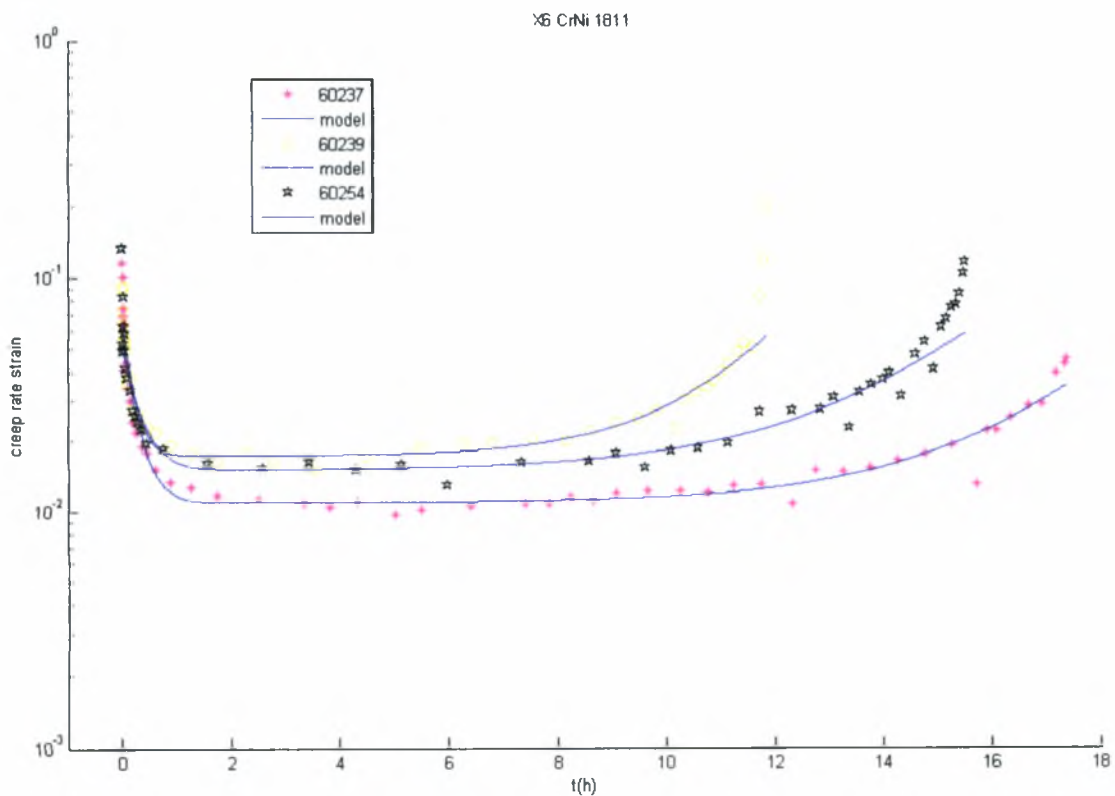
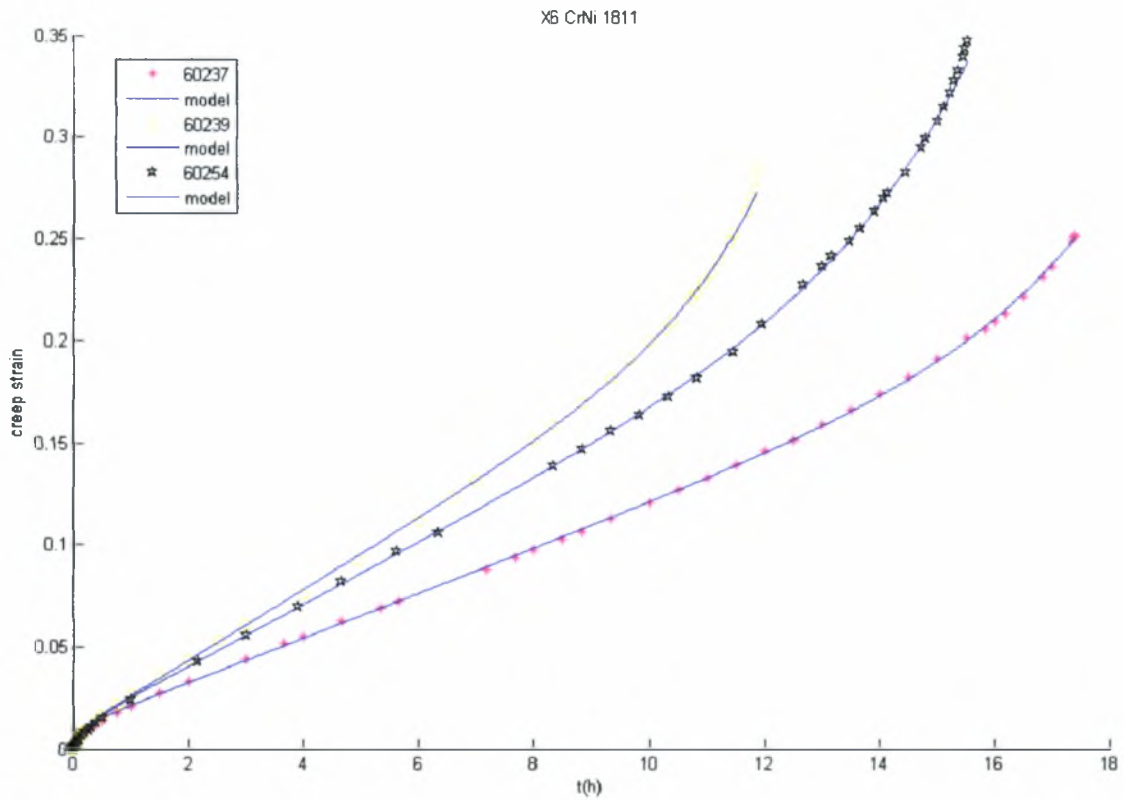
(α)



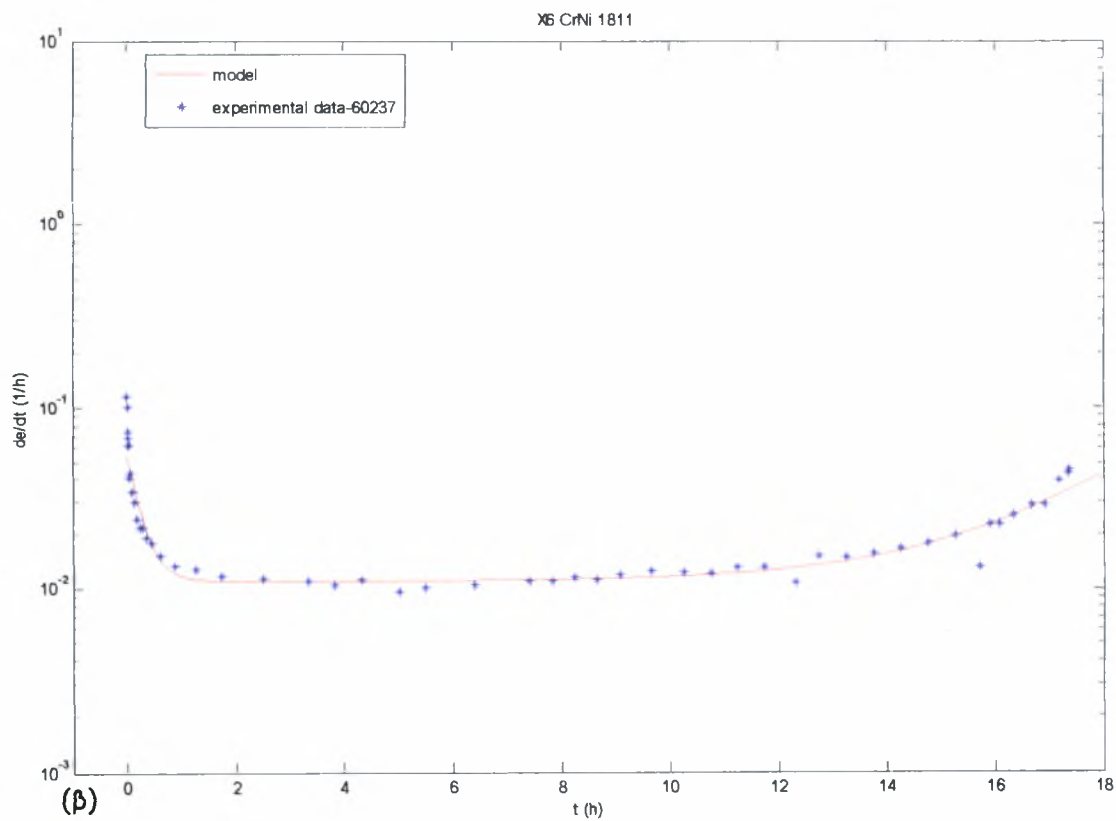
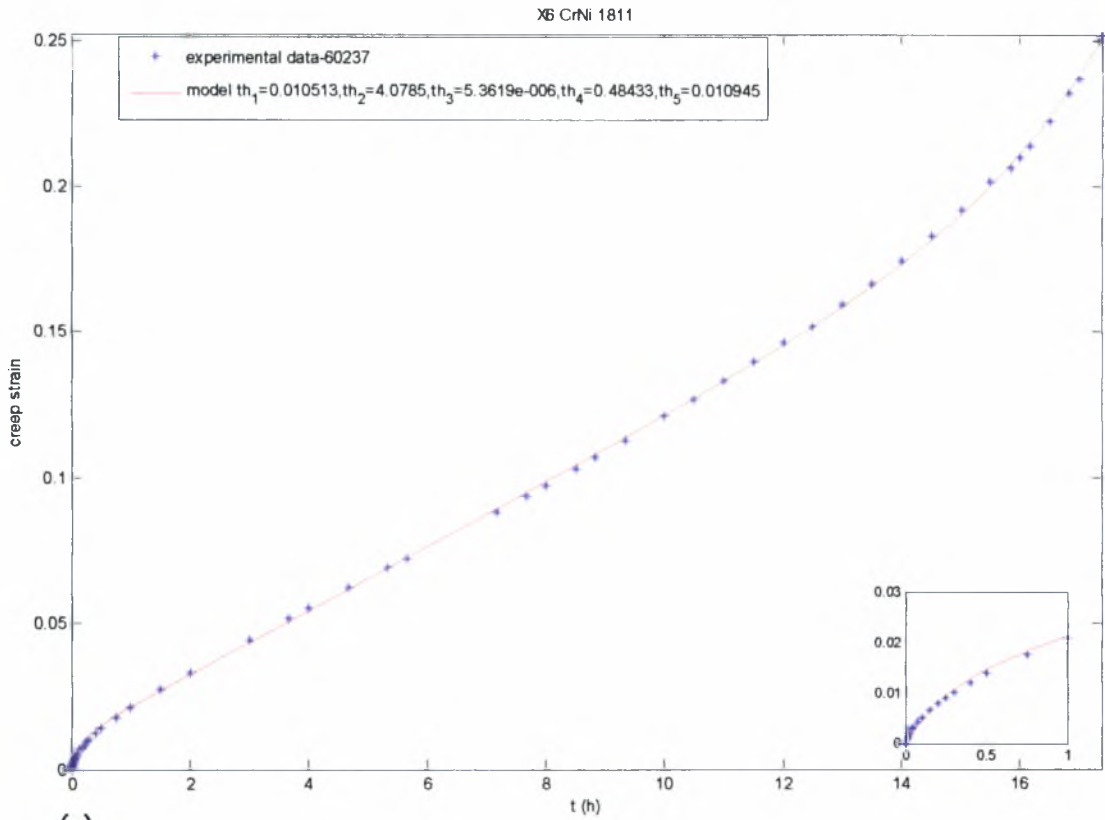
(β)

Σχ 4.75 α) Μοναξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 150Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

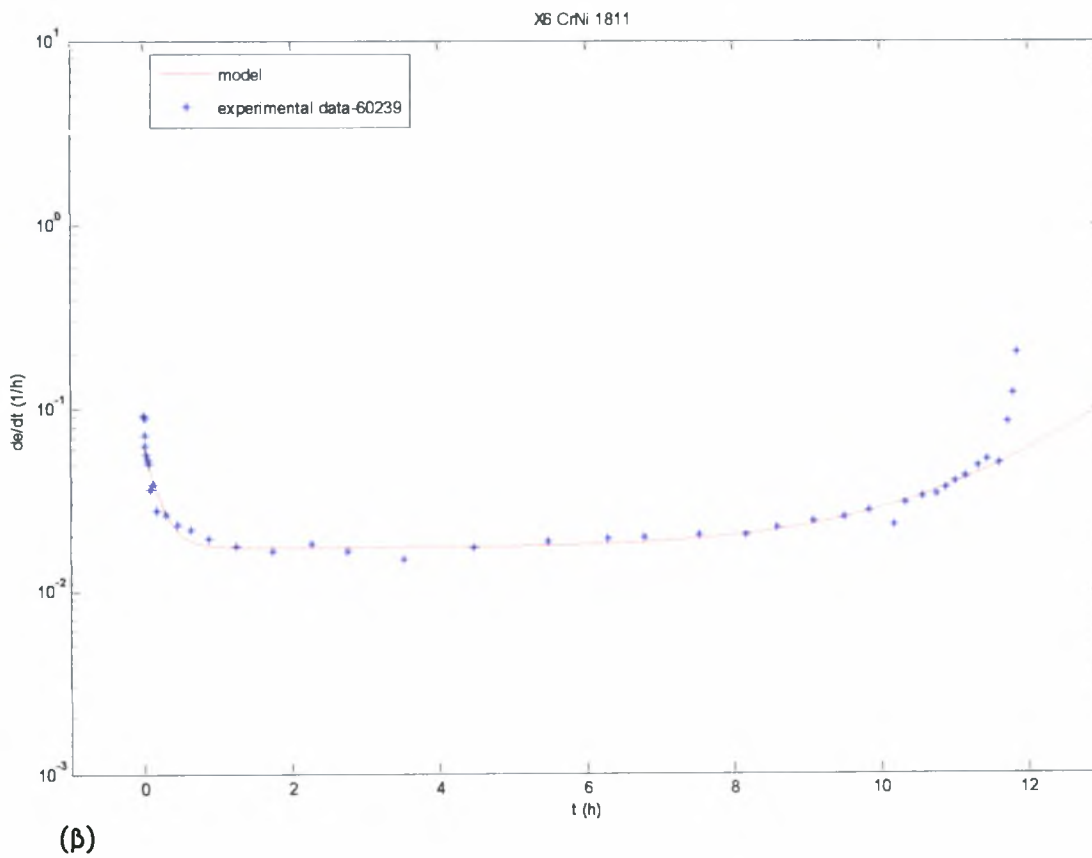
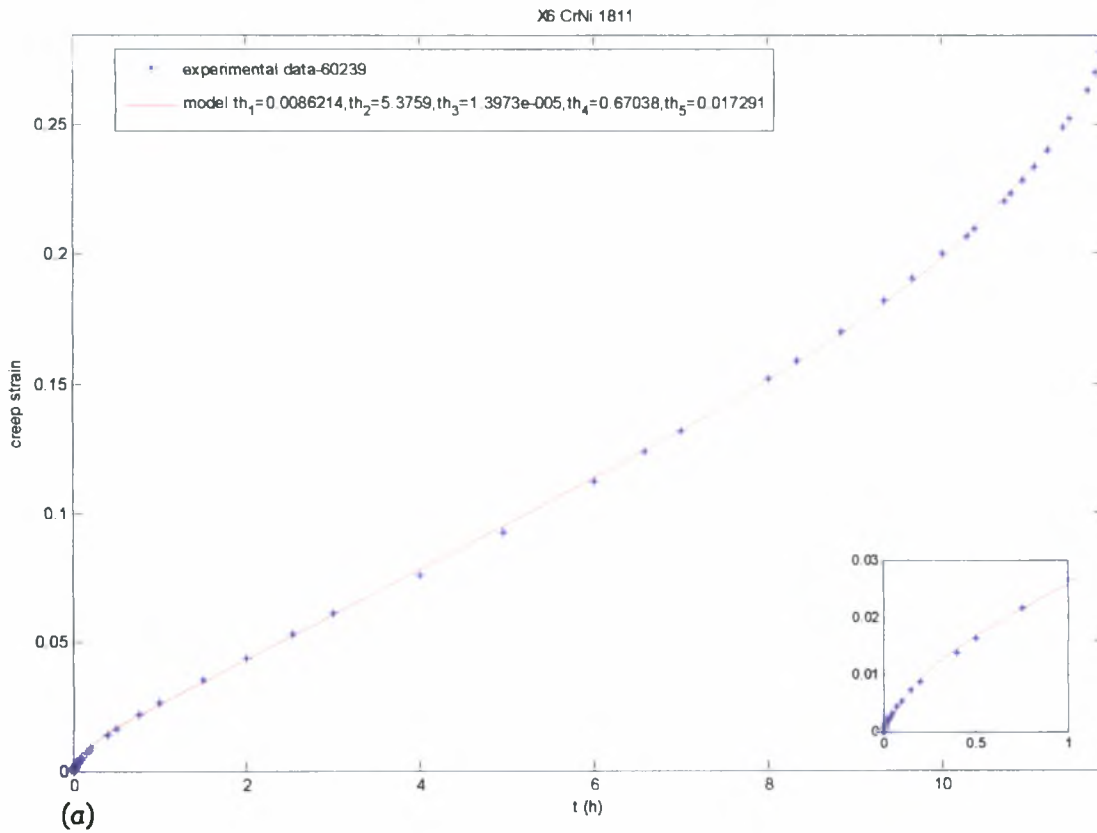


Σχ 4.76 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 160Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.



Σχ 4.77 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 160Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

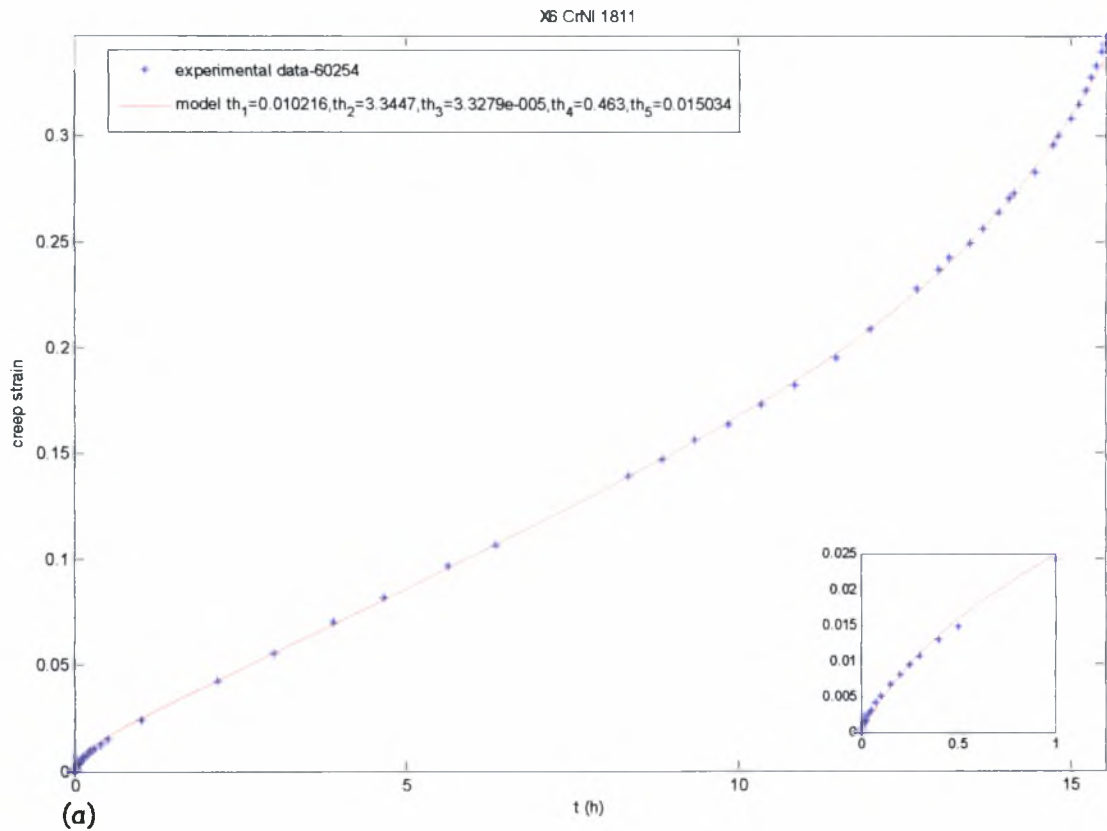
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



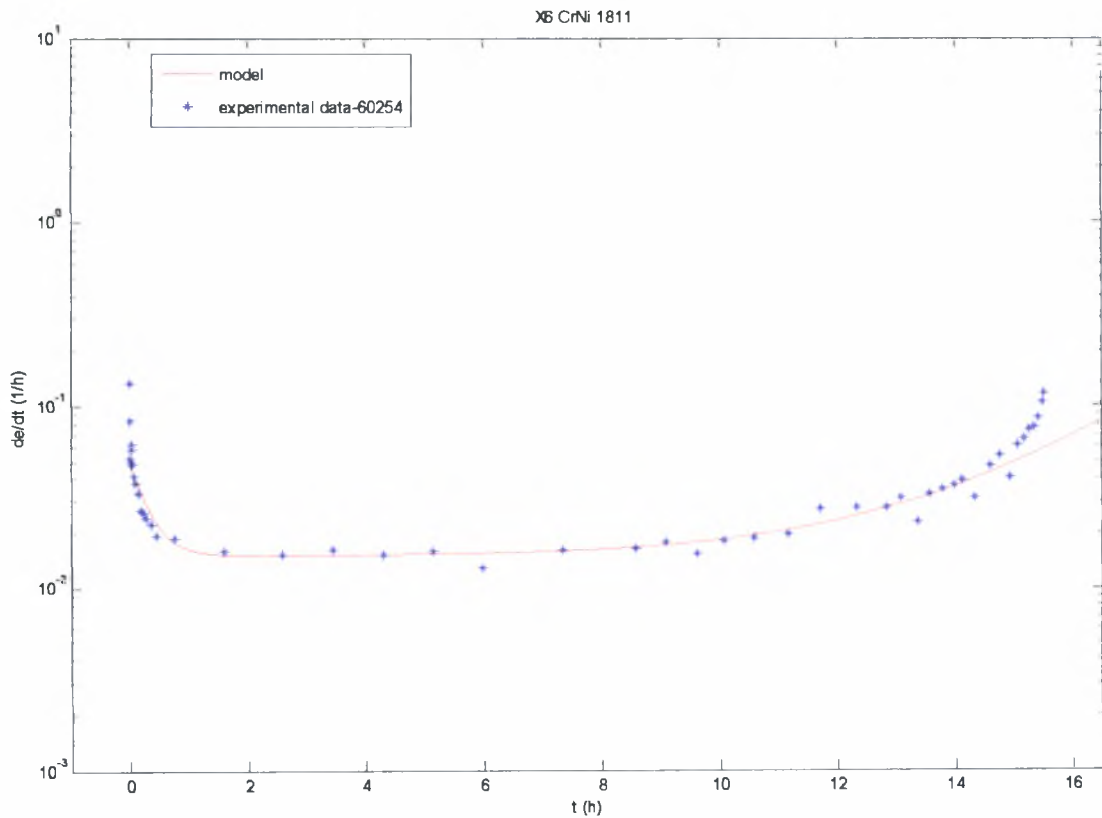
**Σχ 4.78 α)** Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συνάρτησε του χρόνου σε τάση 160Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συνάρτησε του χρόνου.



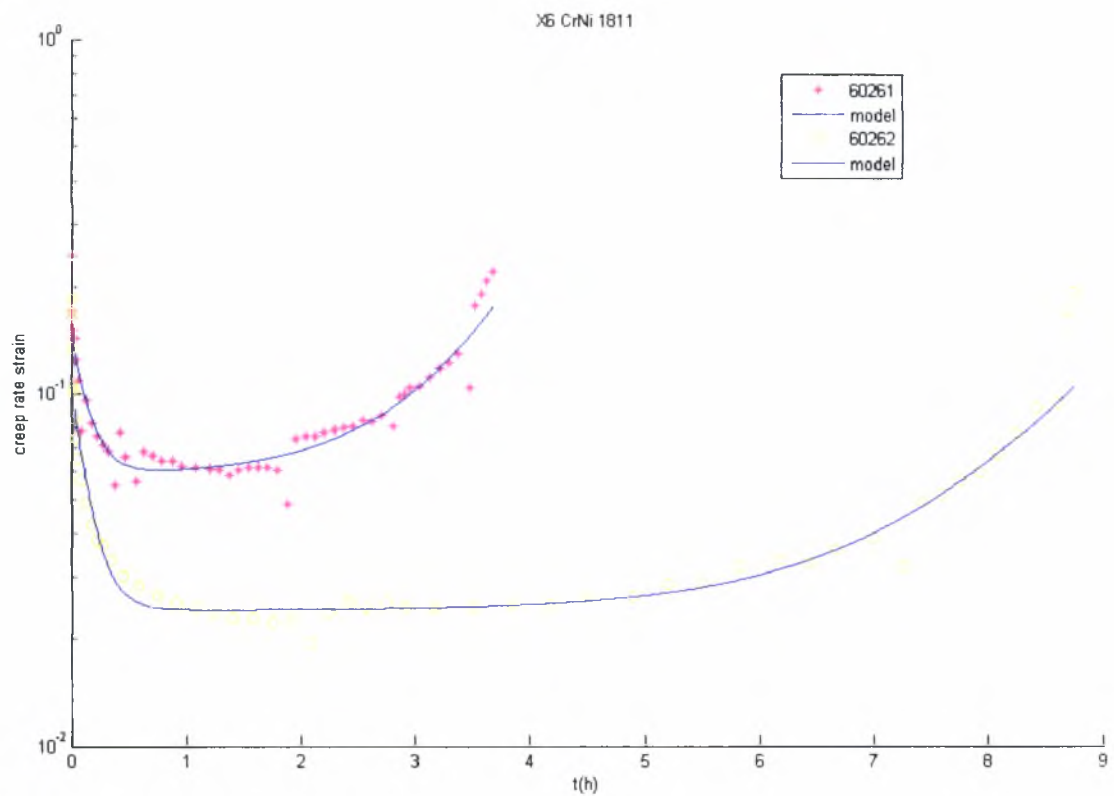
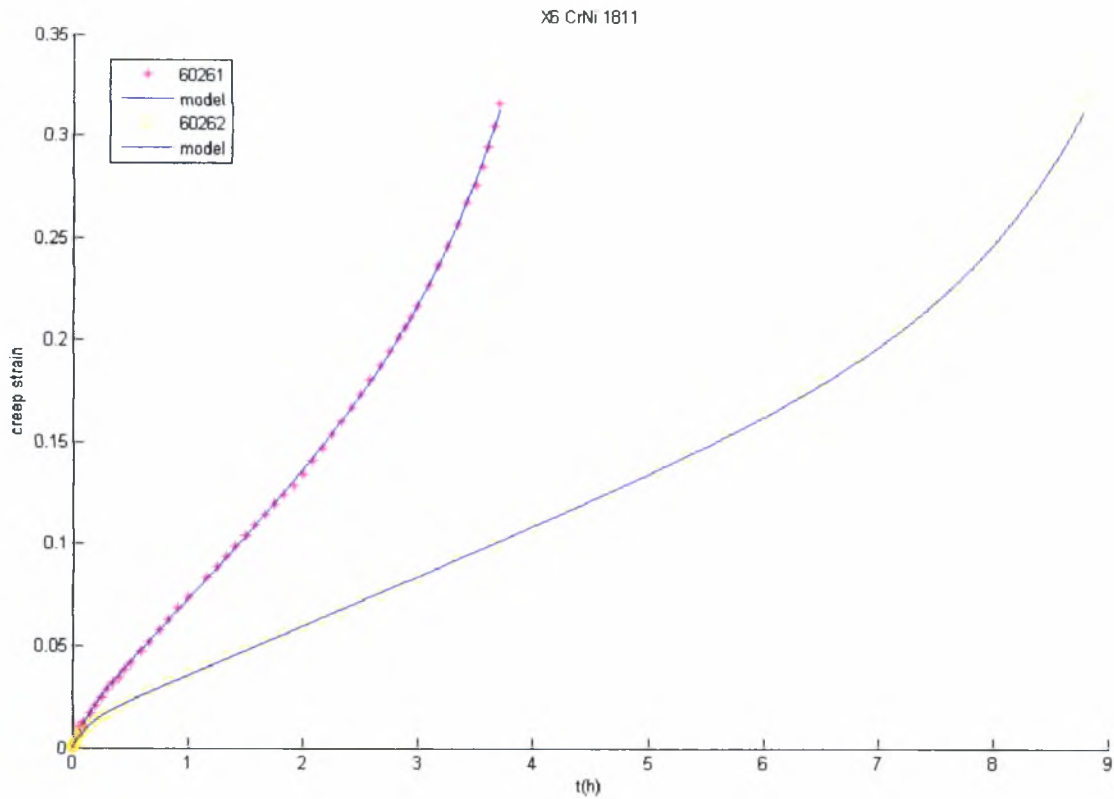


(α)

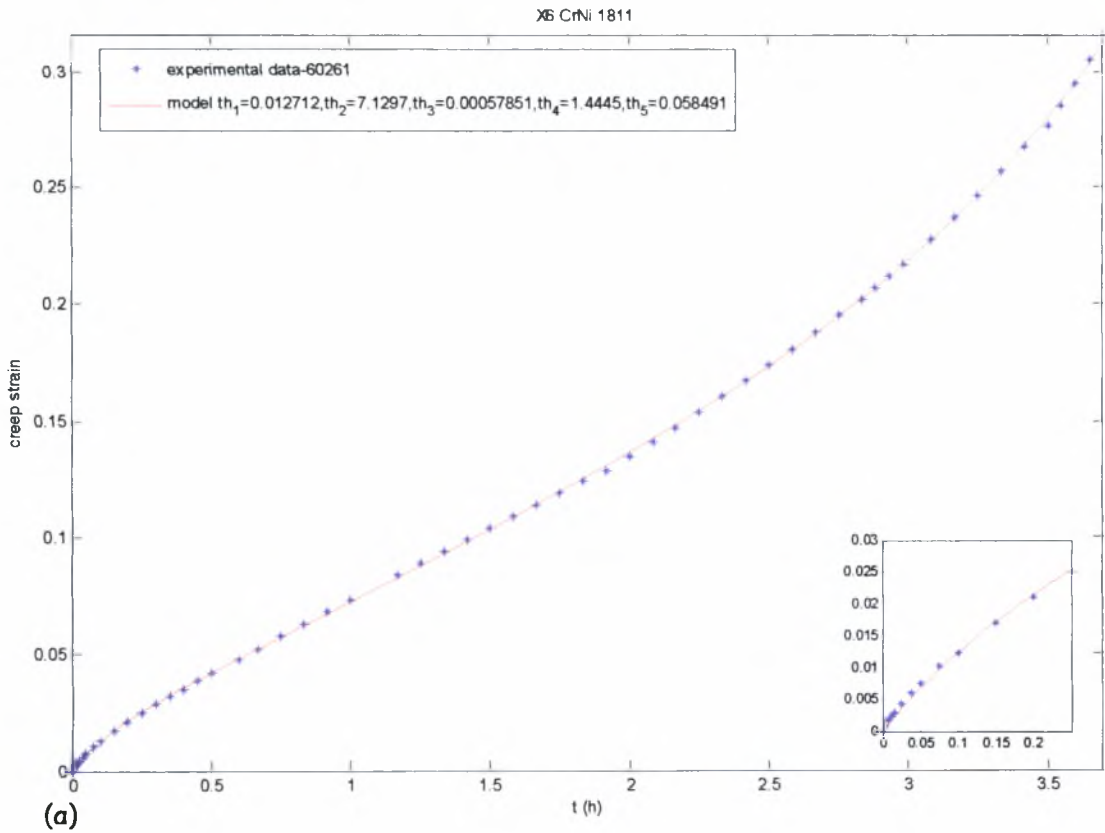


(β)

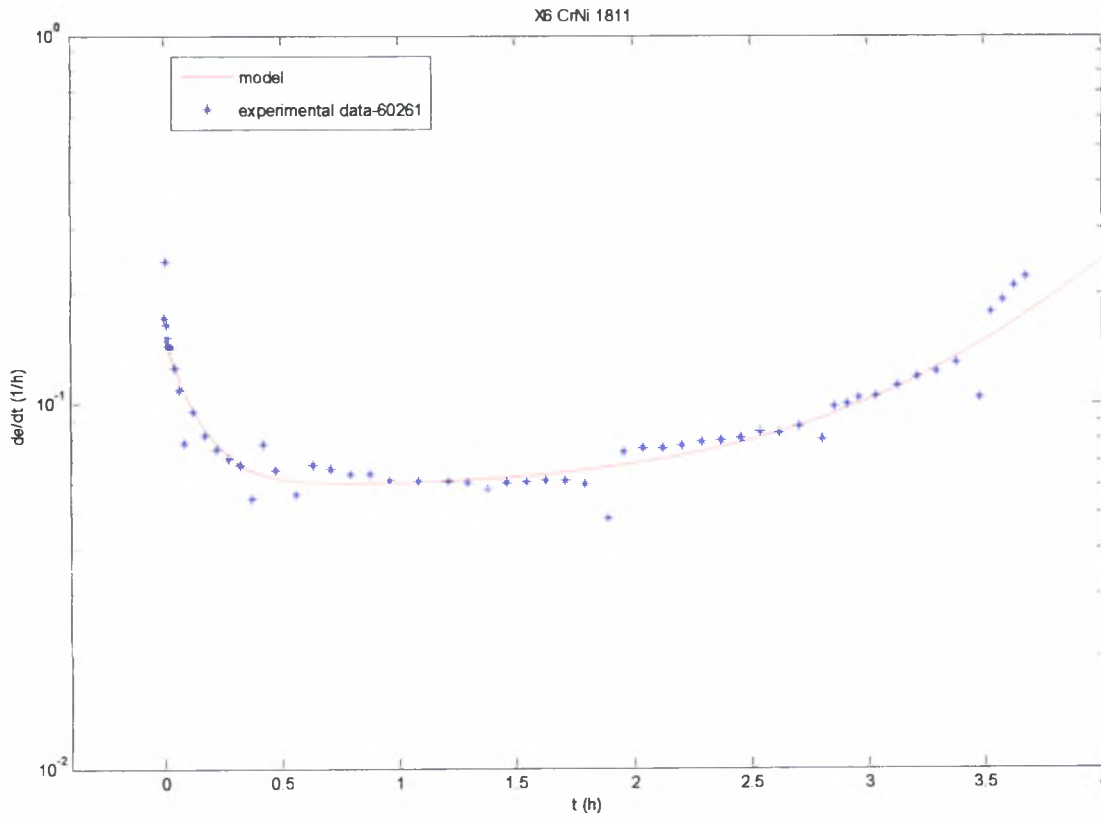
Σχ 4.79 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 160Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



Σχ 4.80 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 180Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.

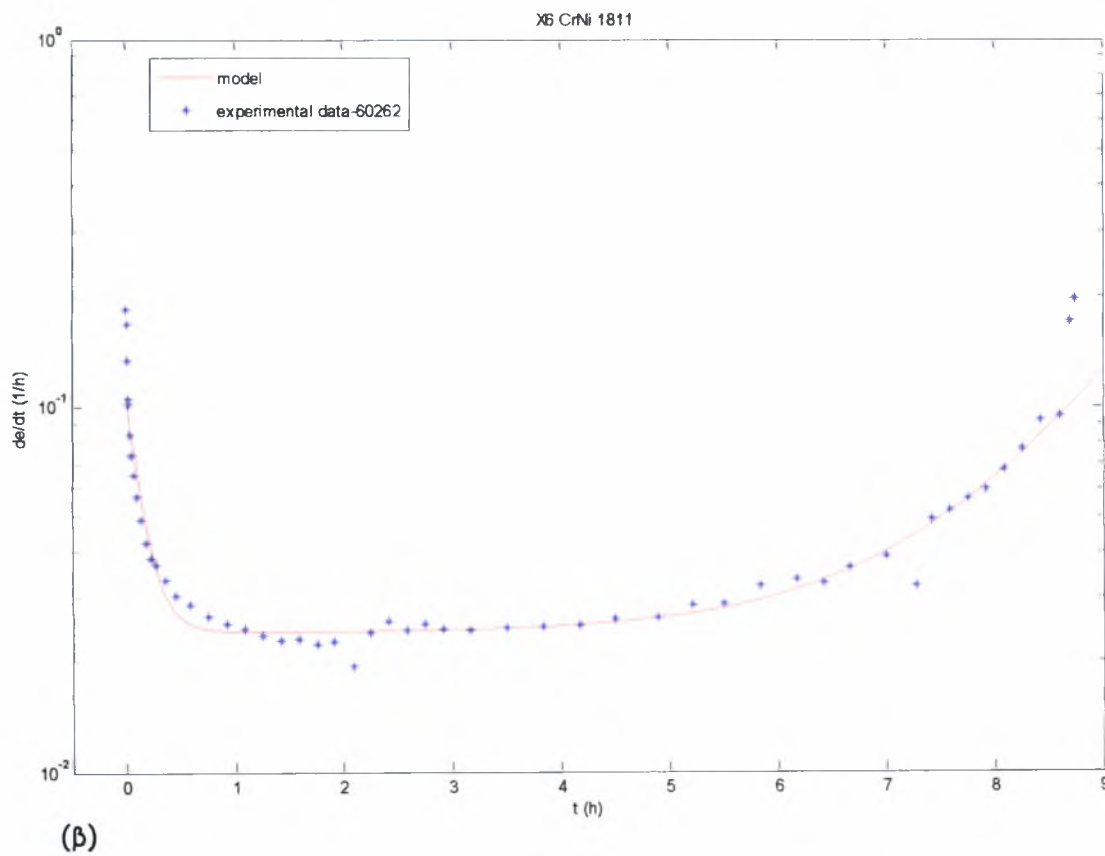
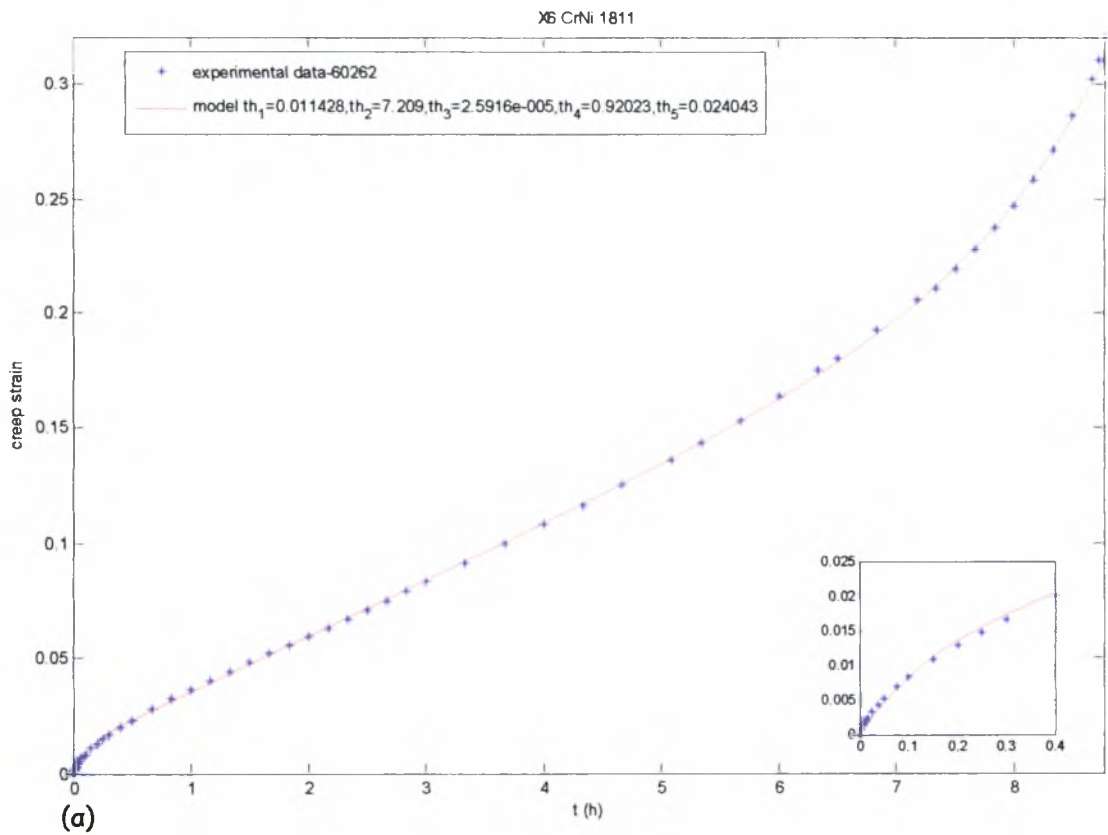


(α)



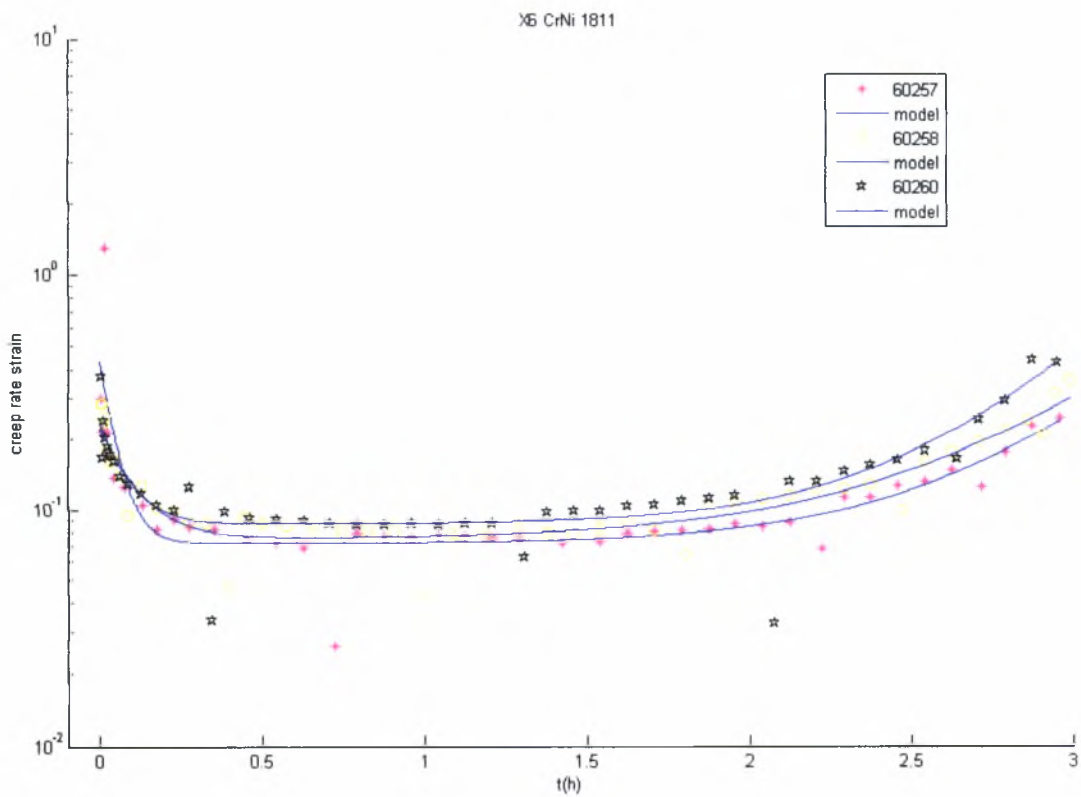
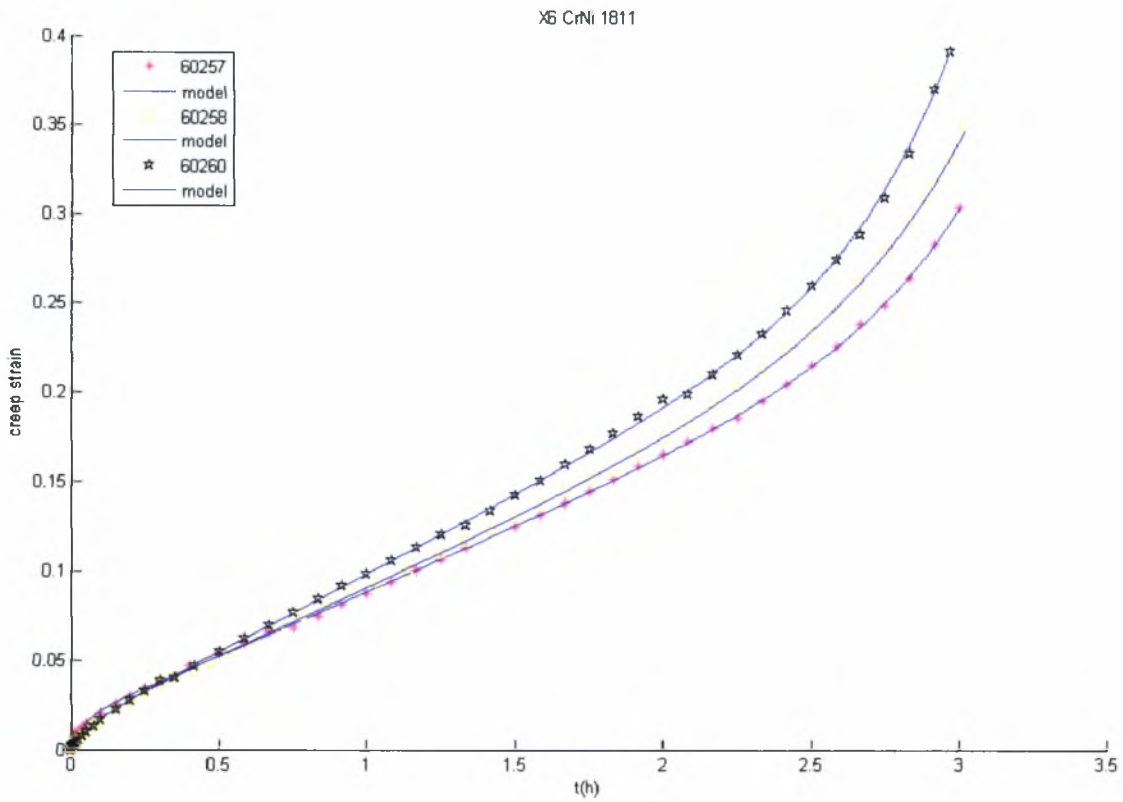
(β)

**Σχ 4.81** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 180Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

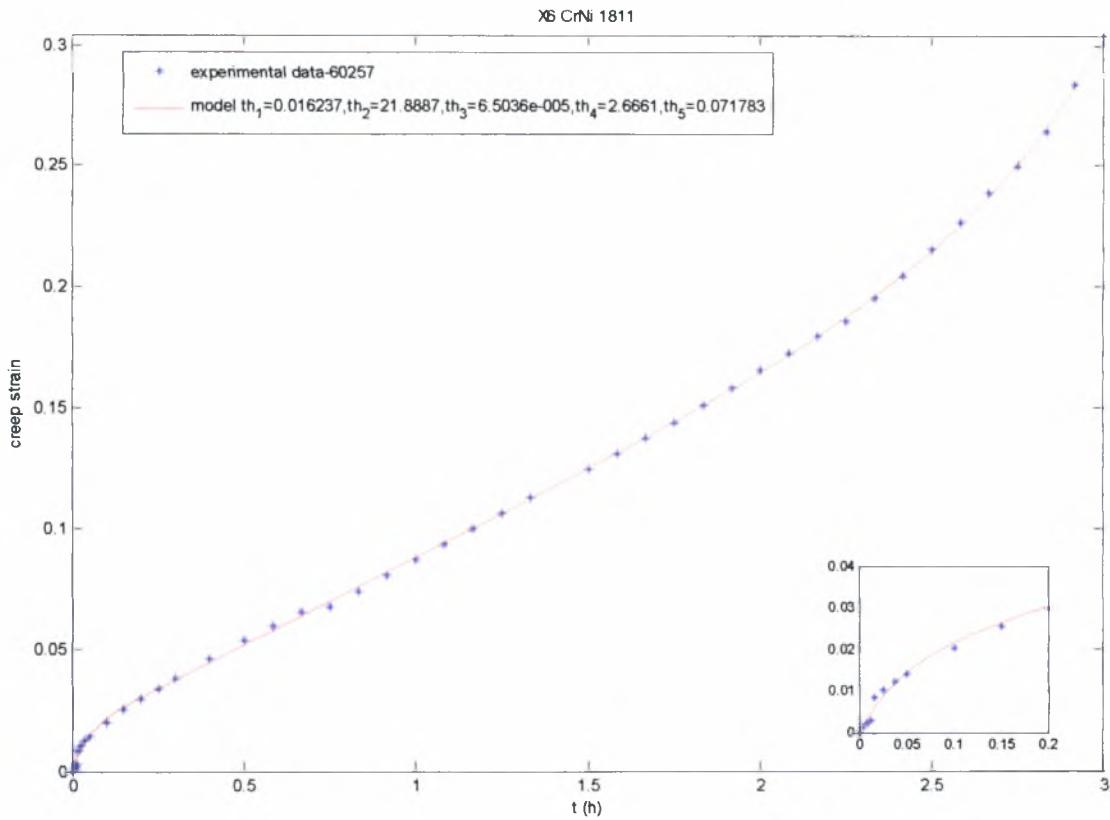


Σχ 4.82 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 180Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .

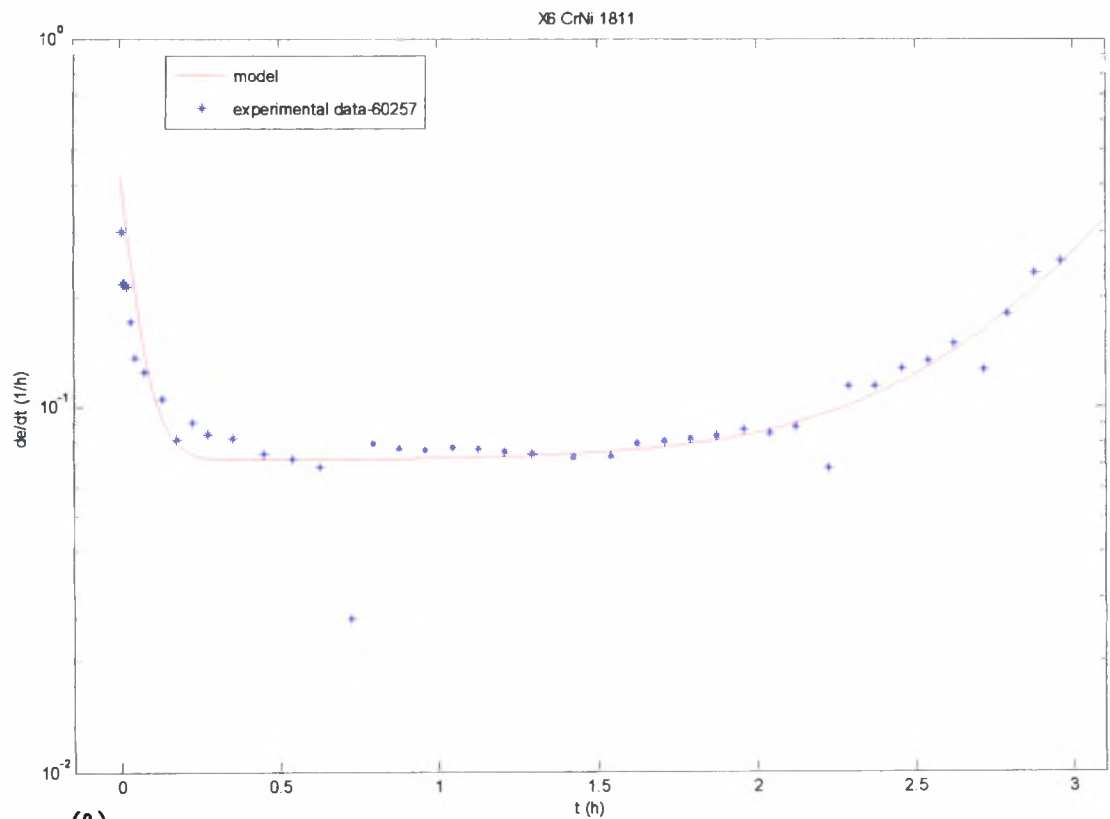
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



Σχ 4.83 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 190Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811.

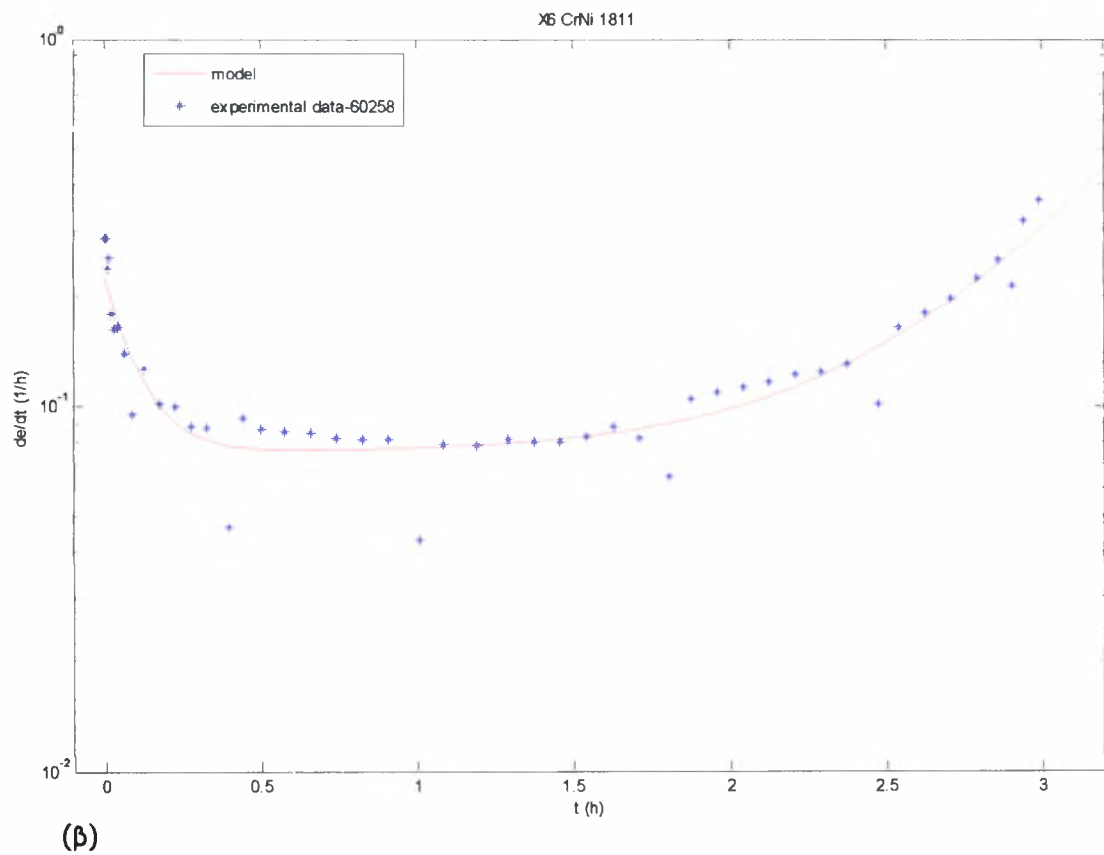
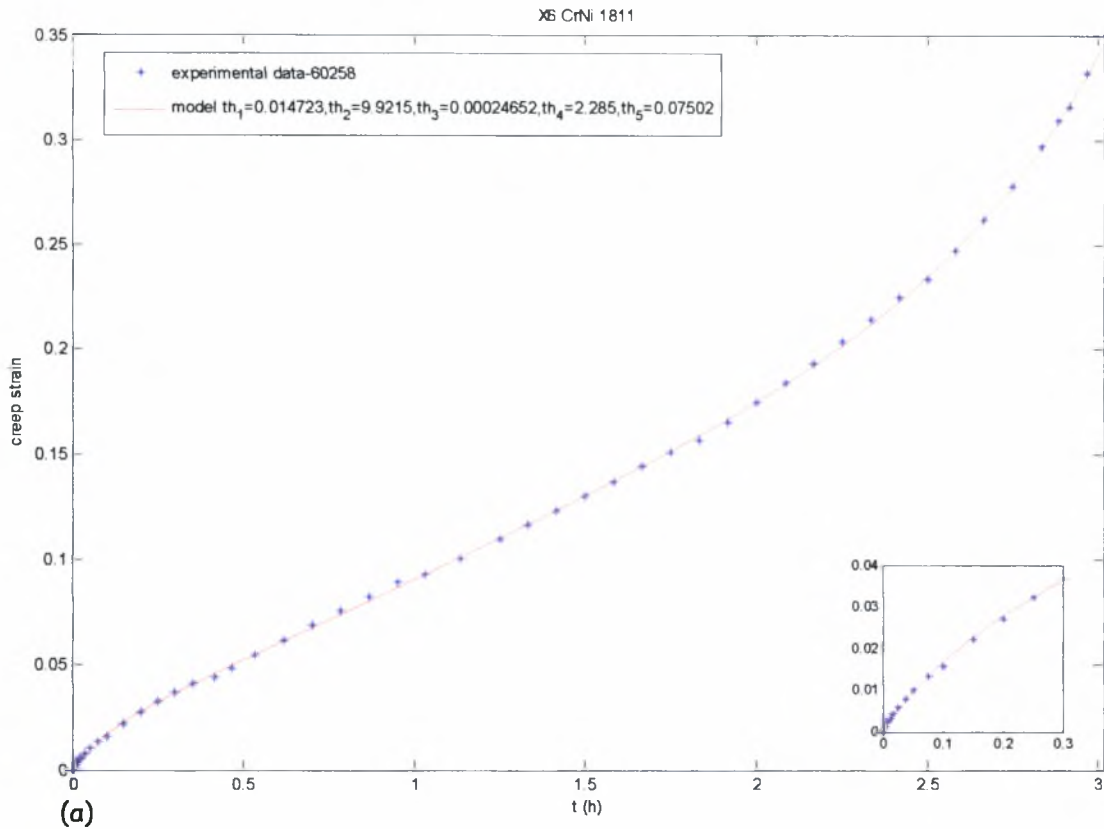


(α)

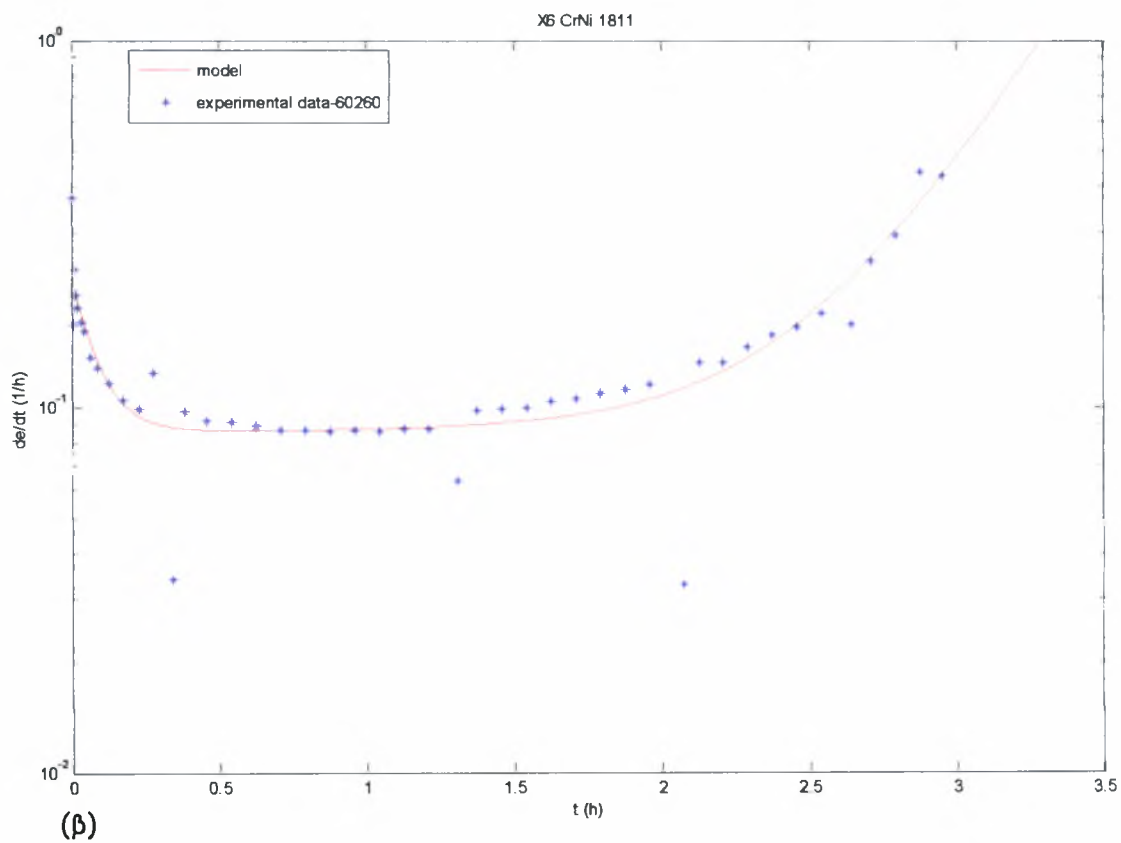
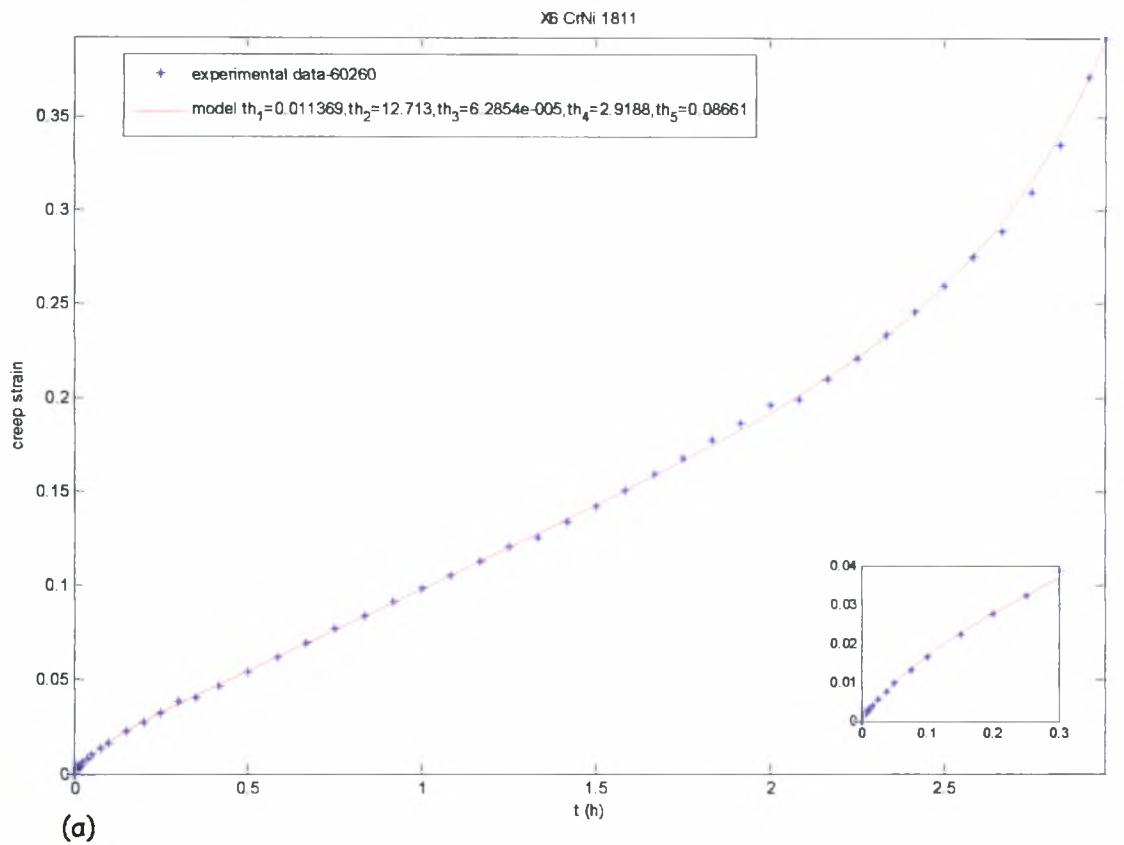


(β)

Σχ 4.84 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 190Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

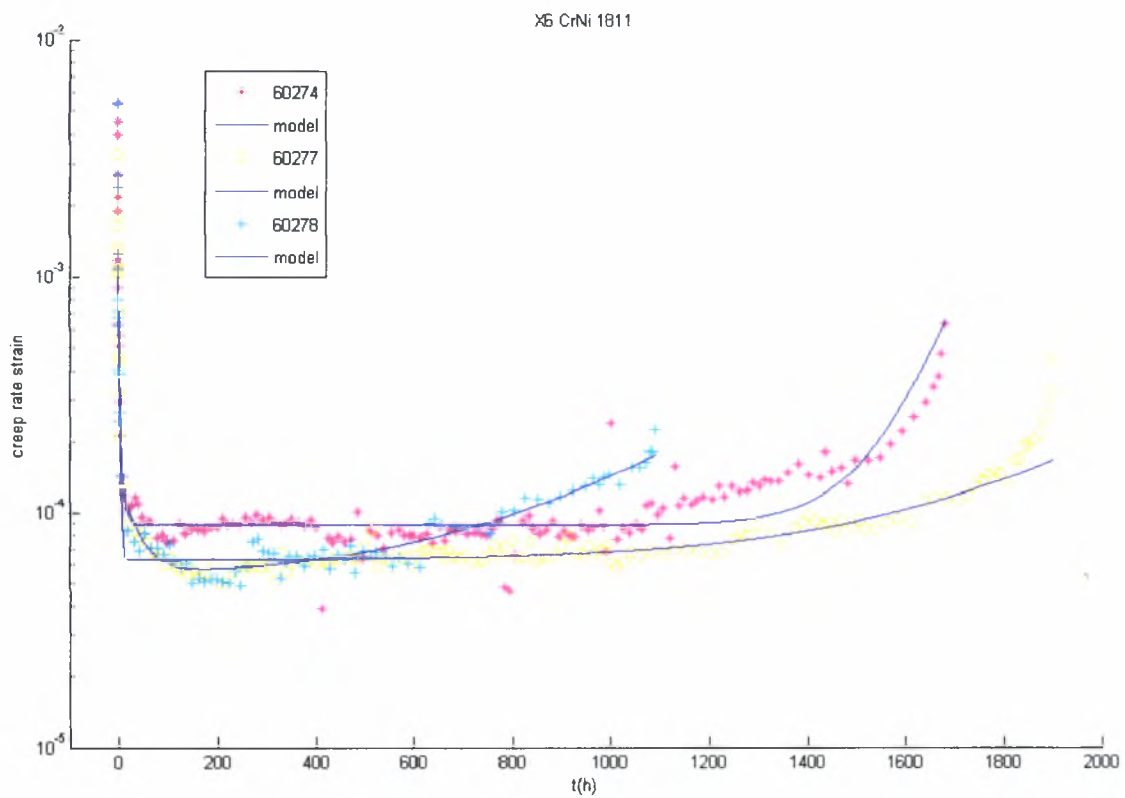
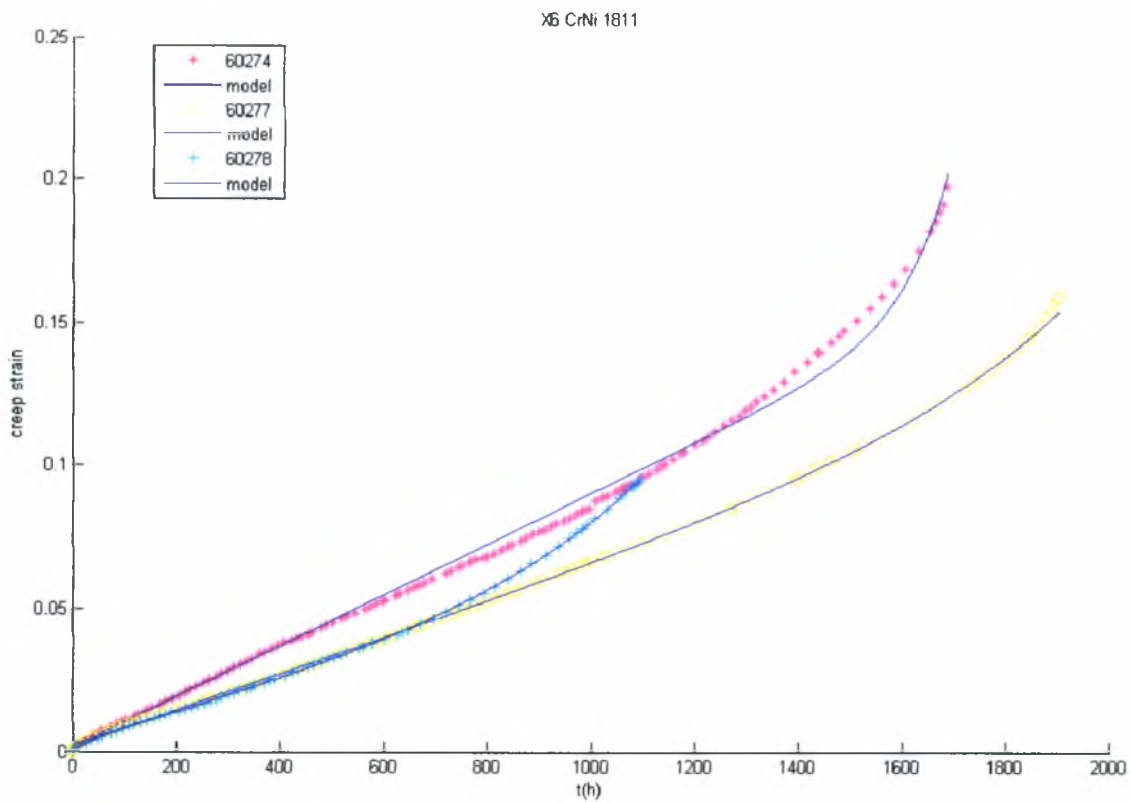


Σχ 4.85 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 190Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

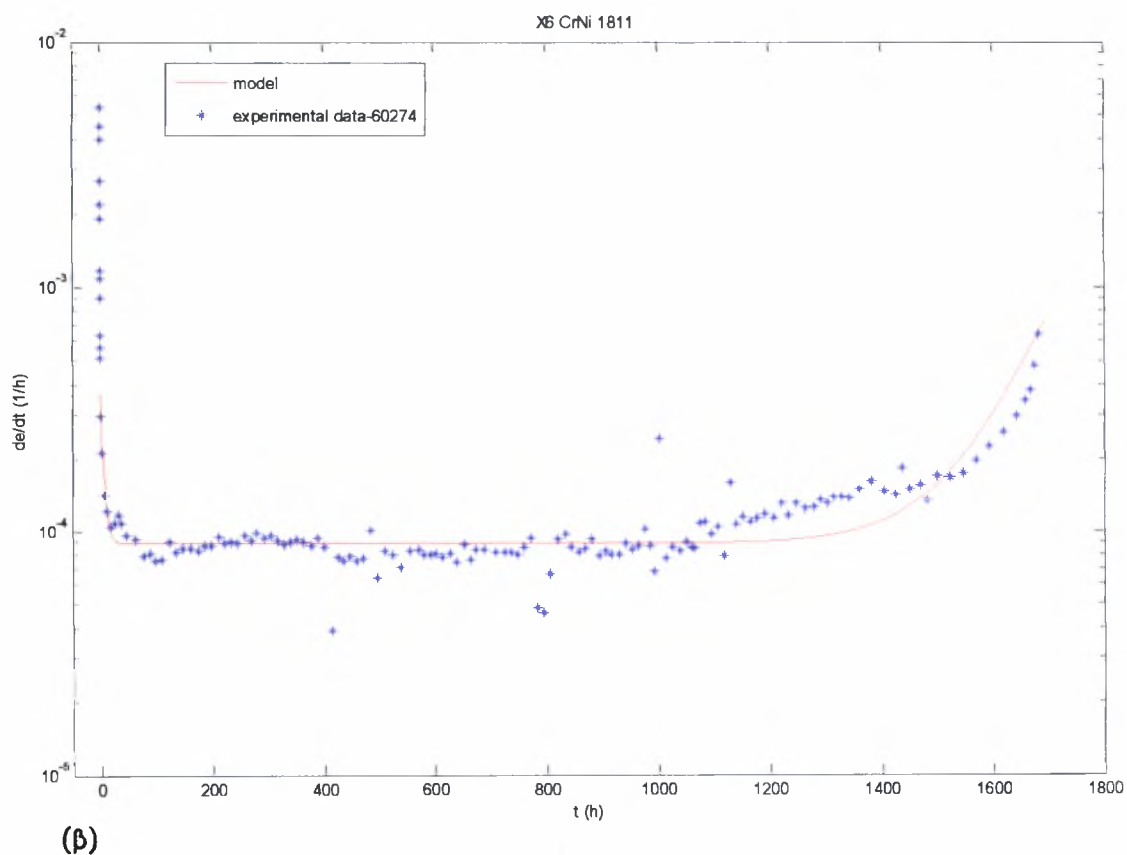
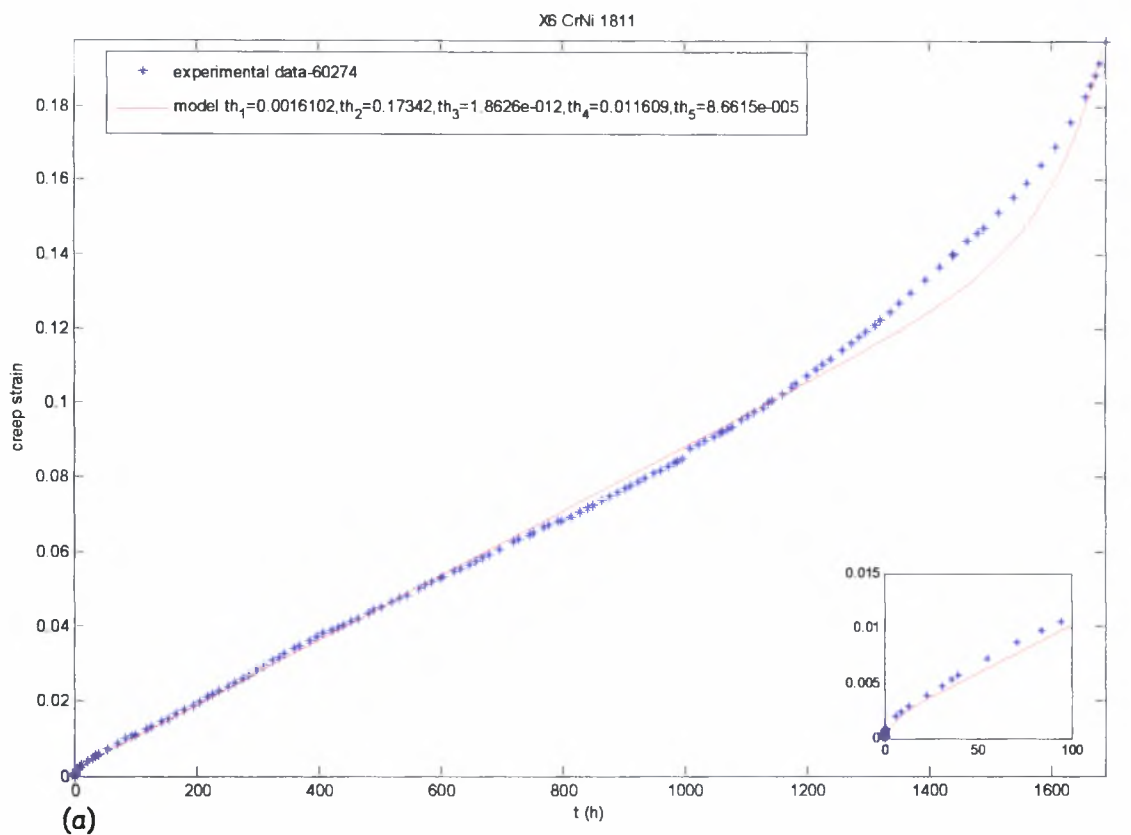


**Σχ 4.86** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 190Μρα και θερμοκρασία 700 °C για το X6 CrNi 1811 .  
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



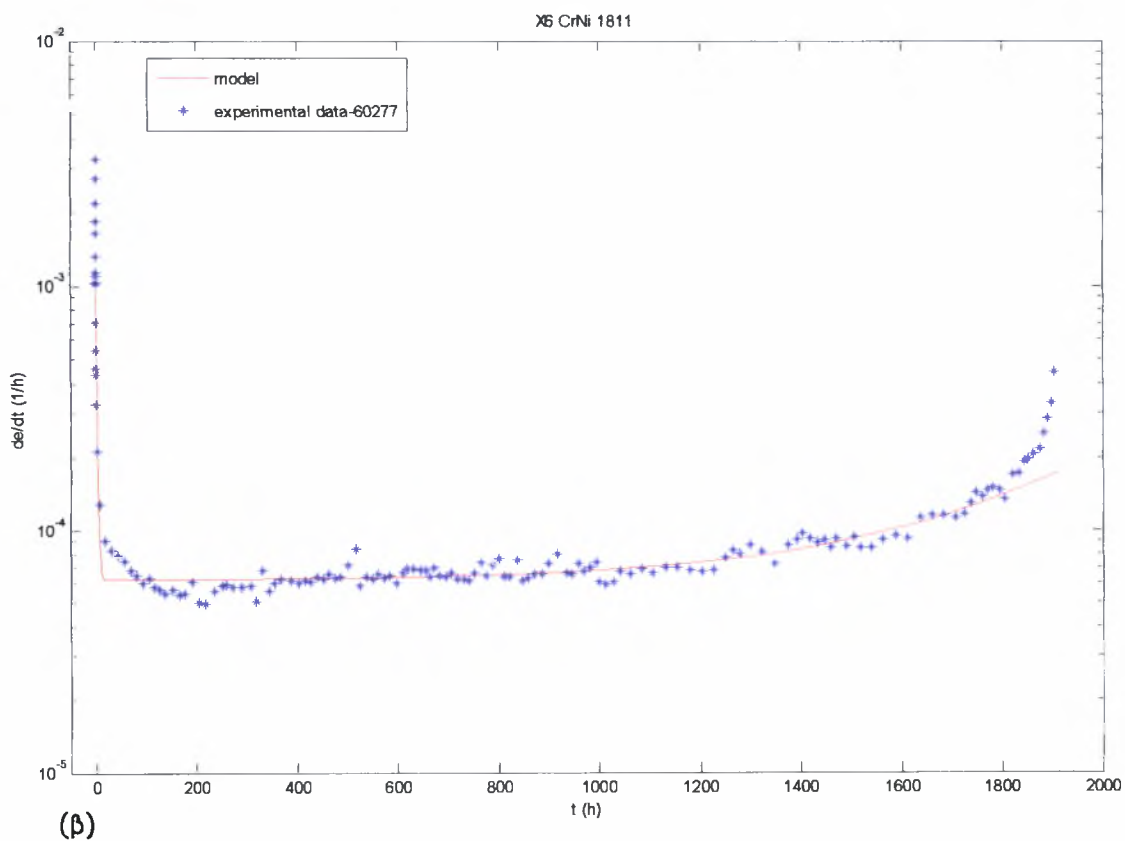
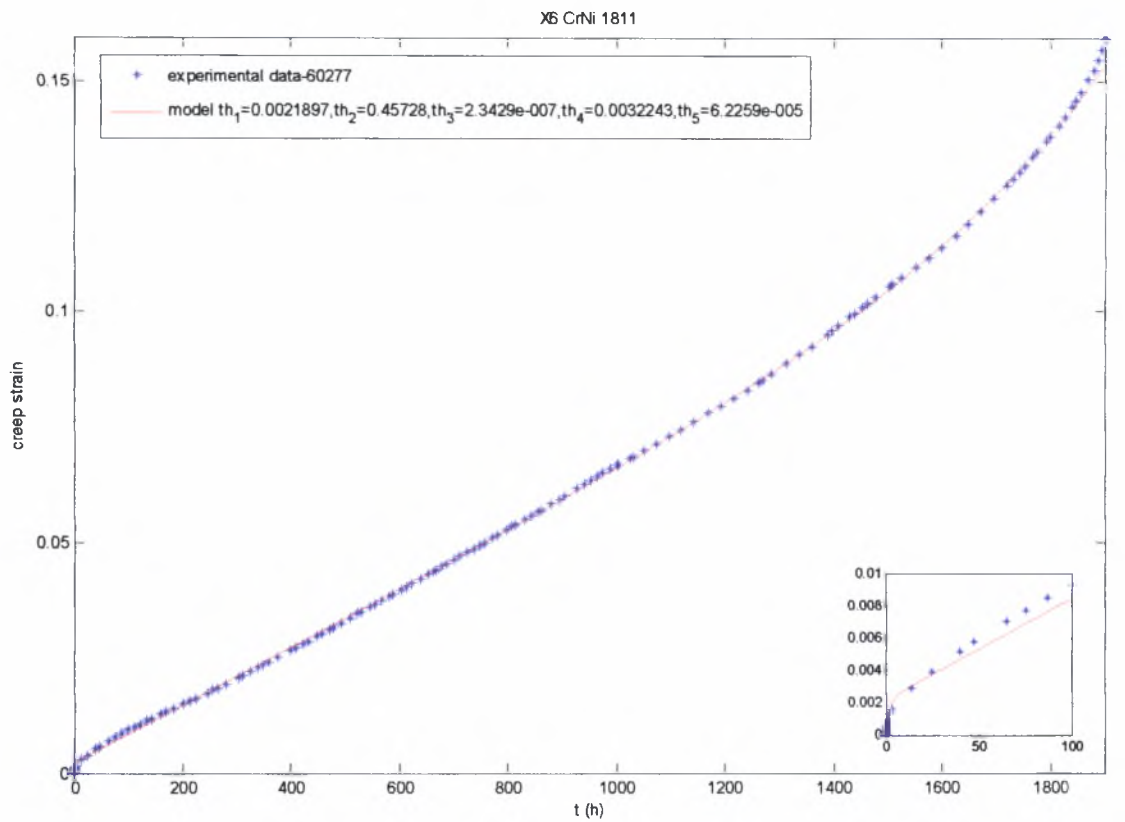


Σχ 4.87 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 650 °C για το X6 CrNi 1811.



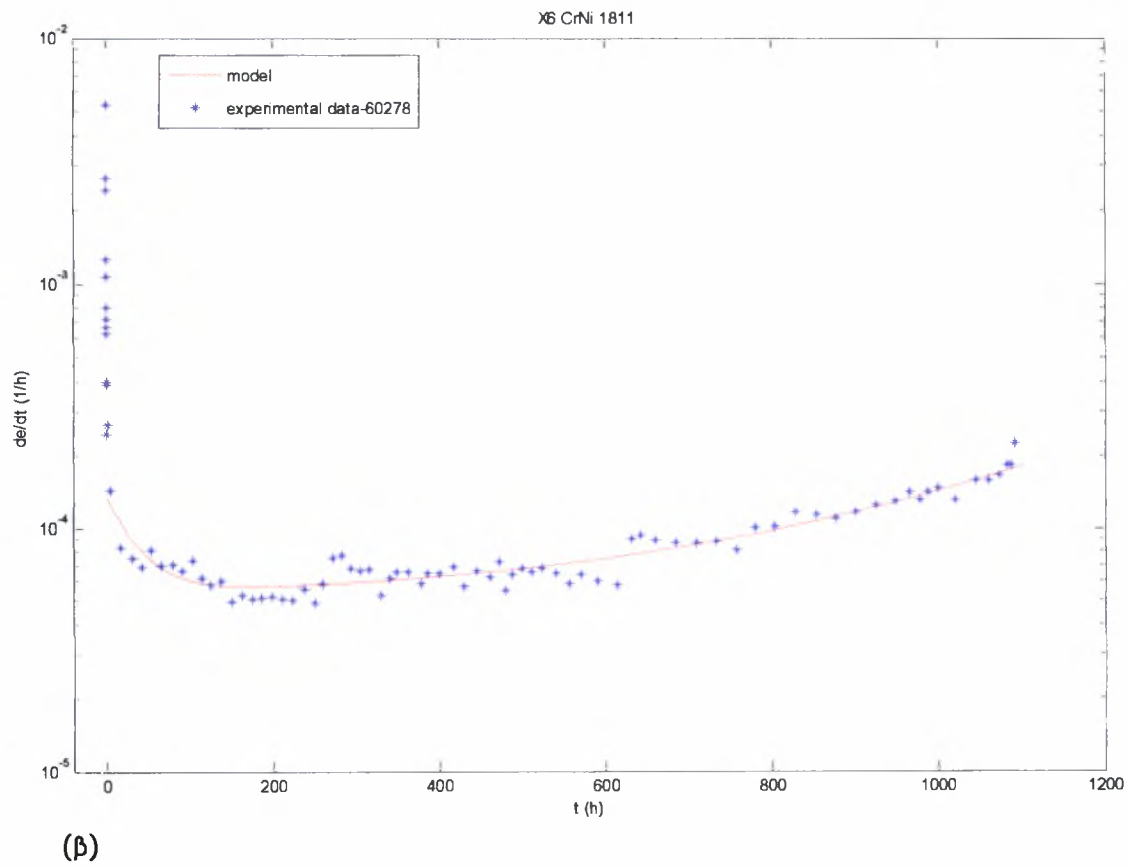
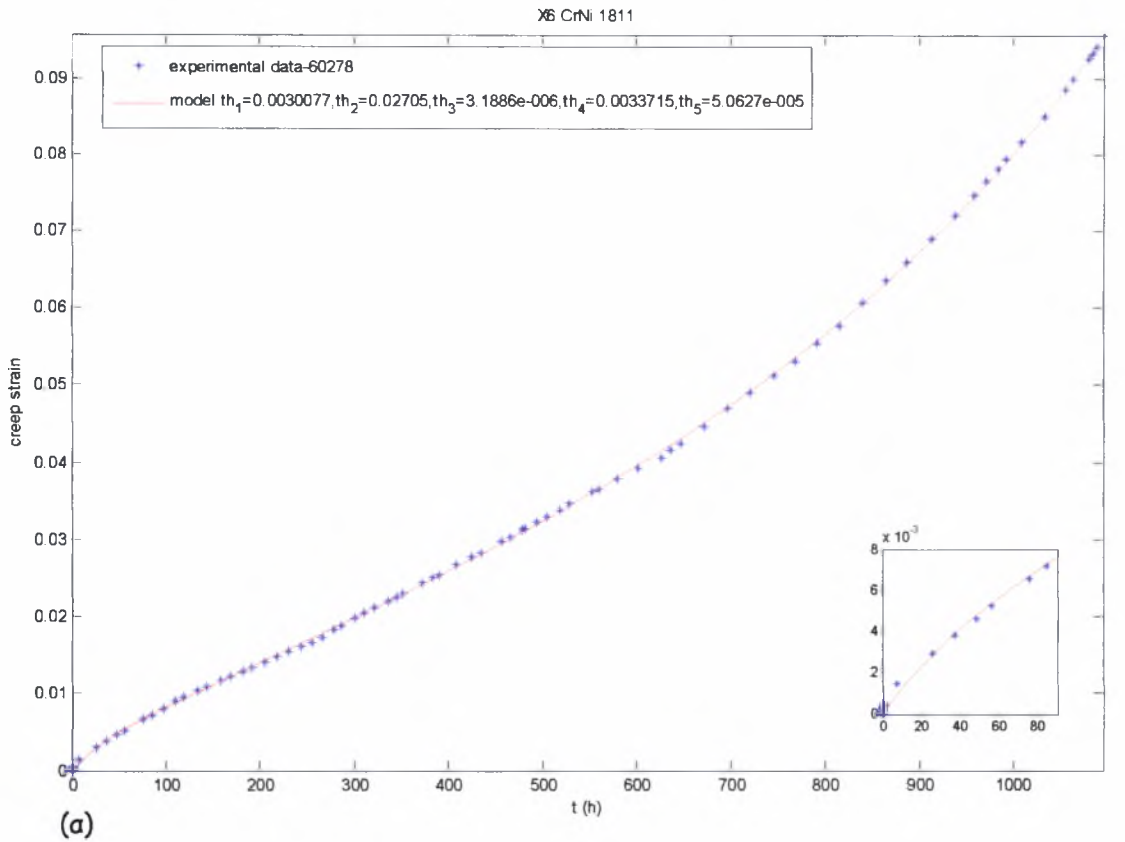
Σχ 4.88 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 650 °C για το X6 CrNi 1811 .

β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

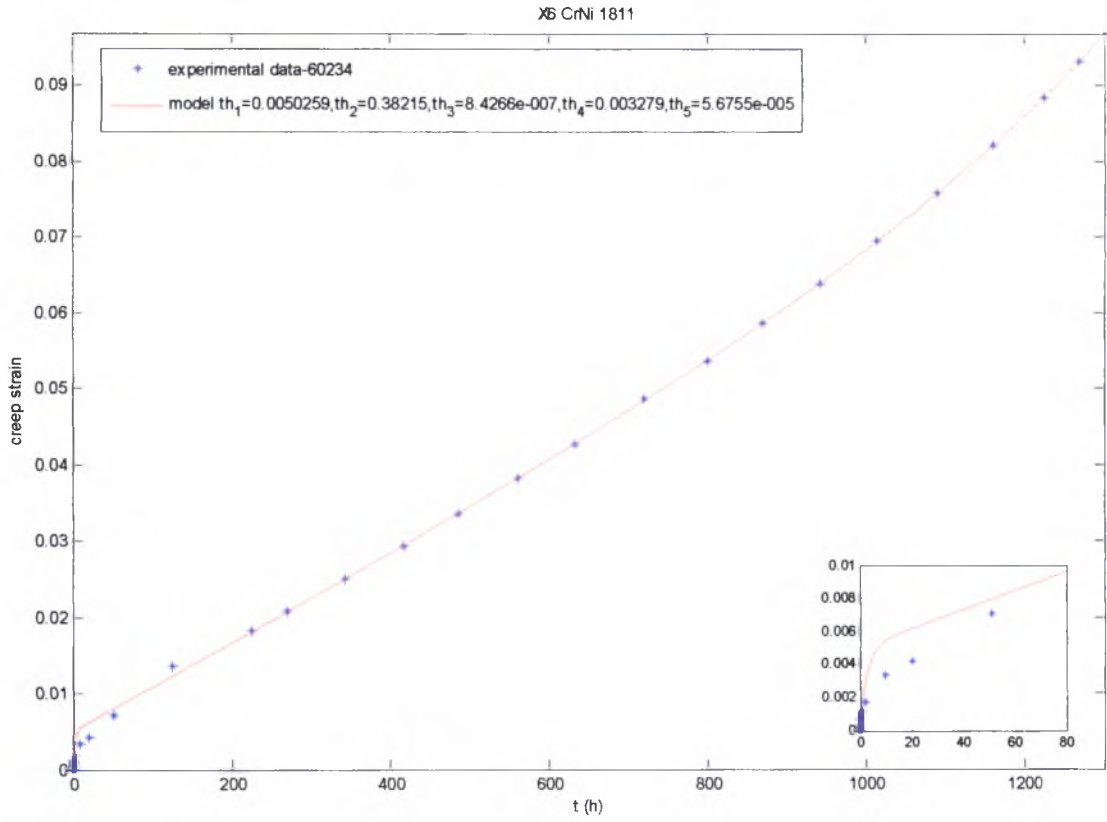


**Σχ 4.89** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 650 °C για το X6 CrNi 1811 .

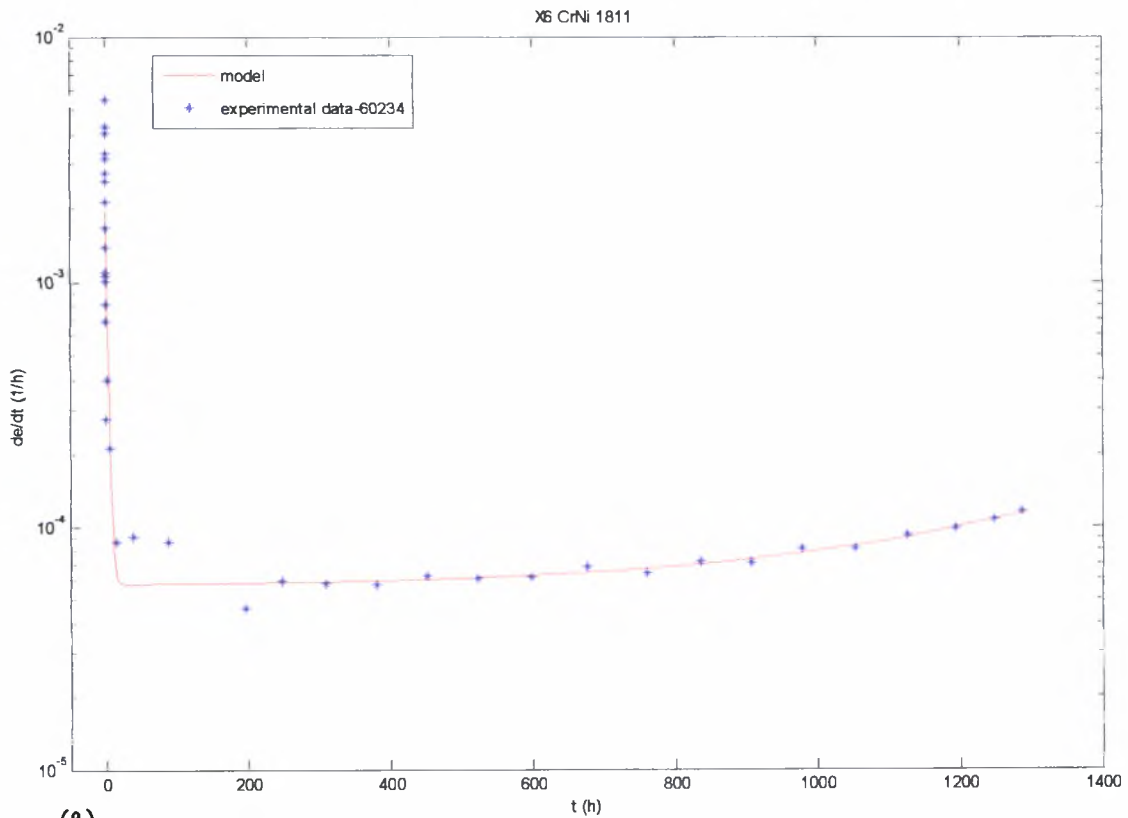
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



Σχ 4.90 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 650 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



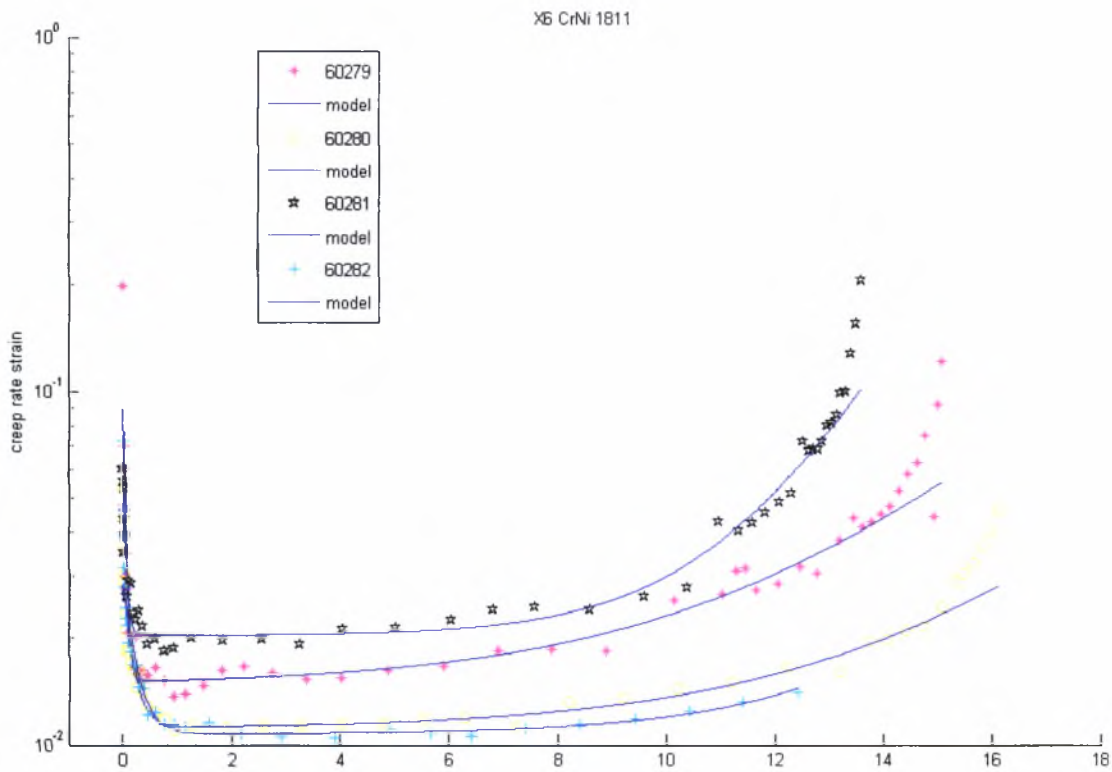
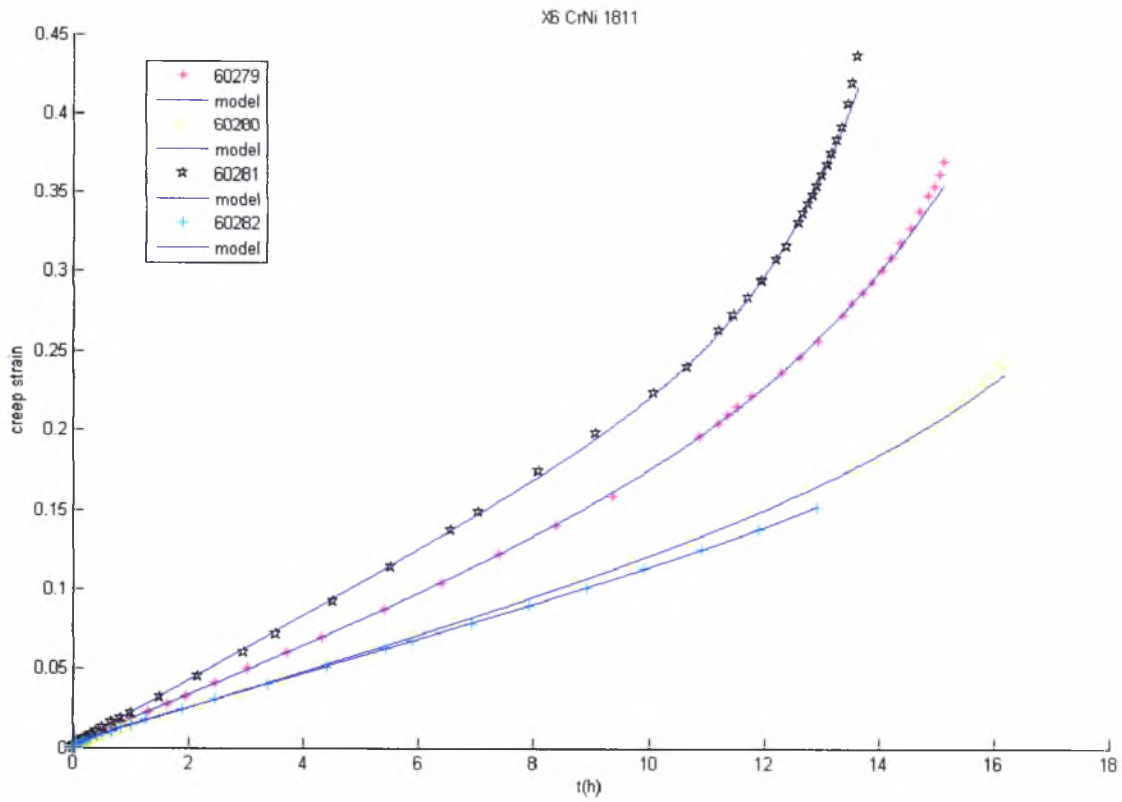
(α)



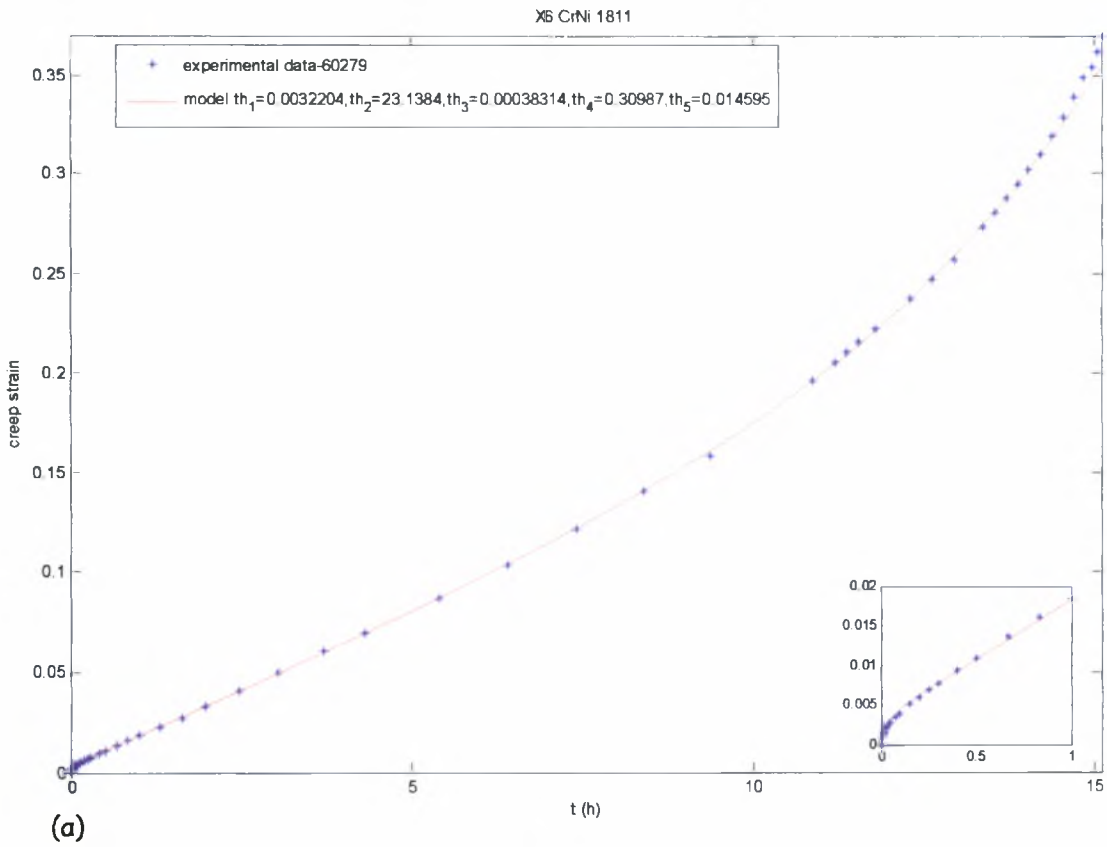
(β)

Σχ 4.91 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120Μρα και θερμοκρασία 650 °C για το X6 CrNi 1811 .

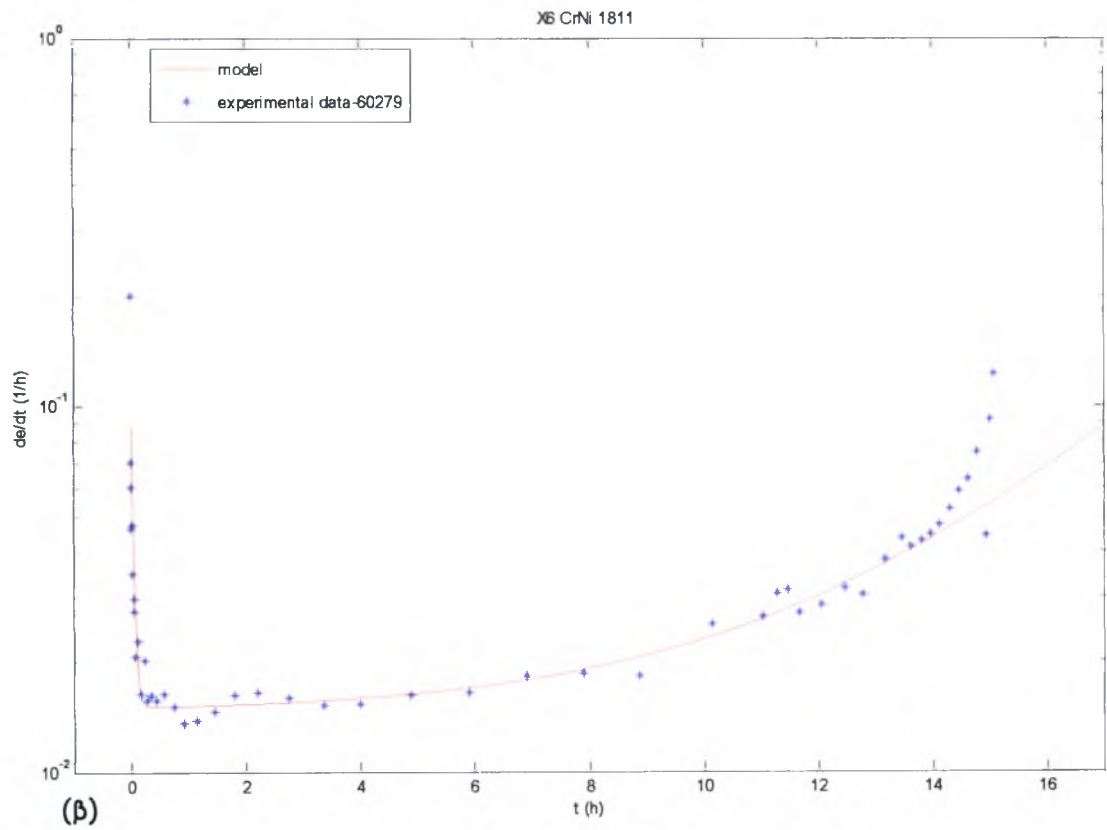
β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



Σχ 4.92 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μονοαξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ρυθμού παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 750 °C για το X6 CrNi 1811.

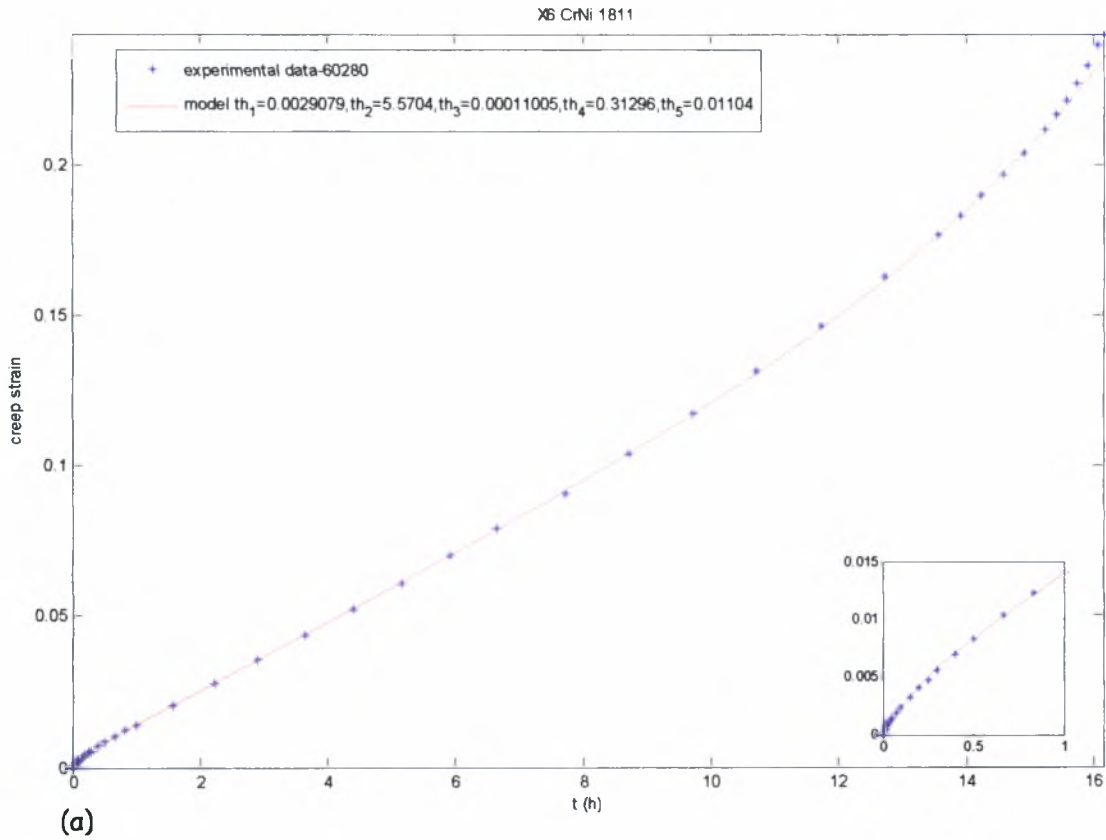


(a)

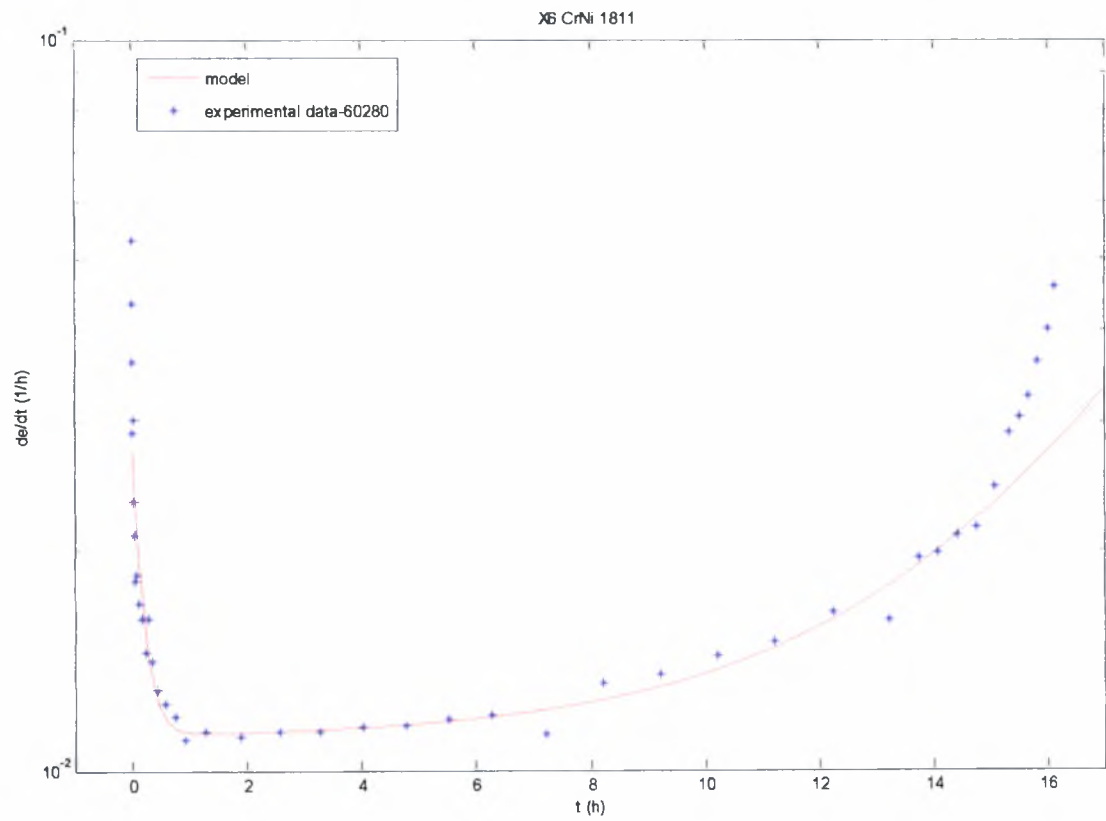


(b)

**Σχ 4.93** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 750 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



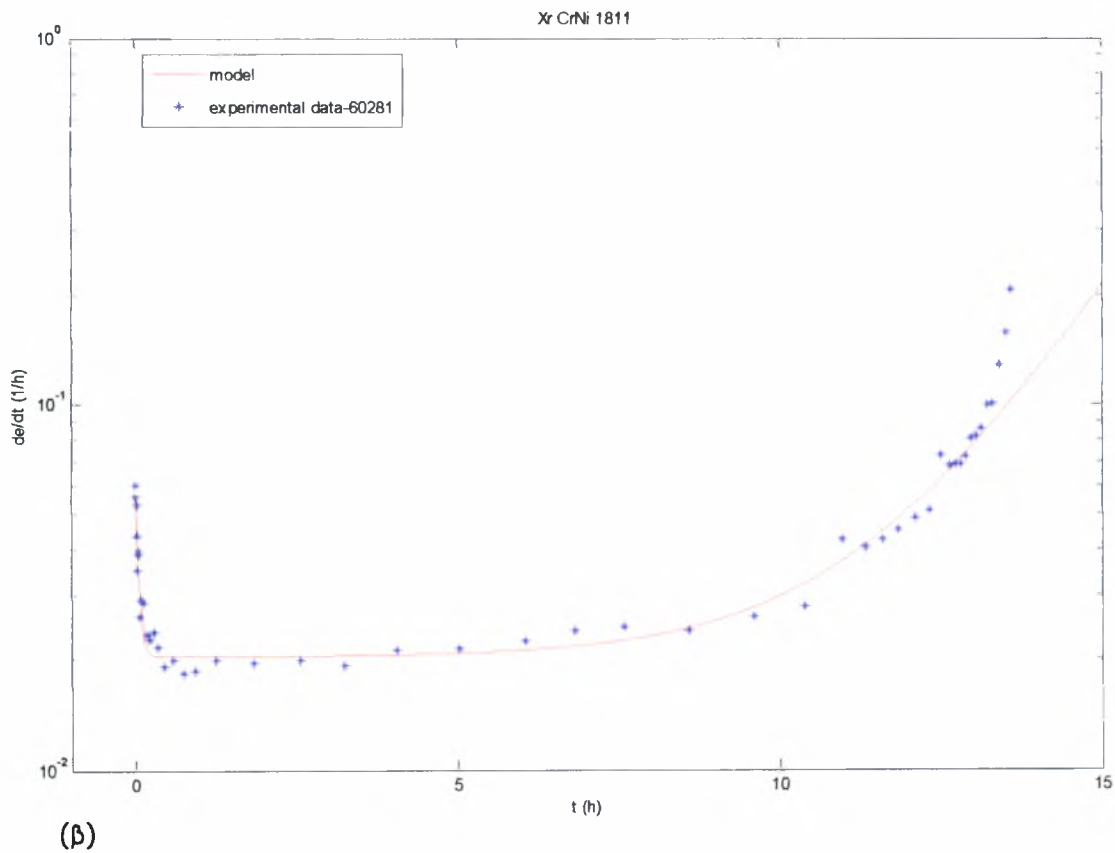
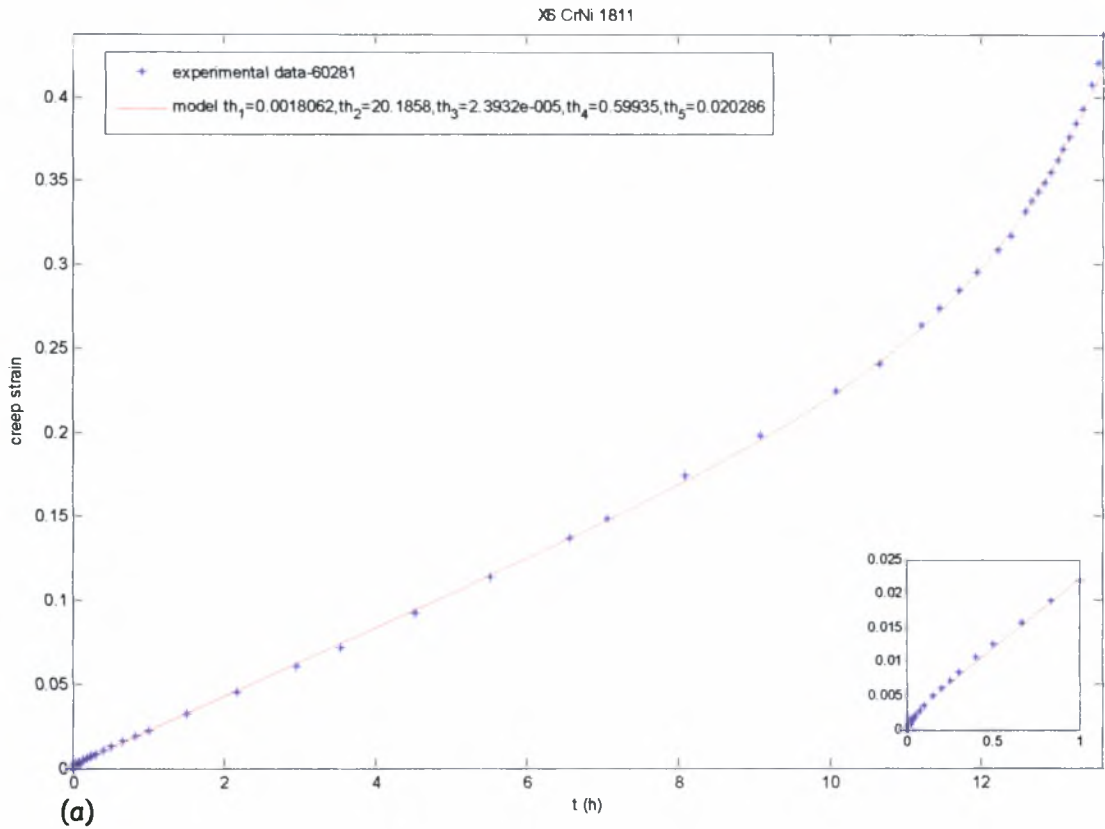
(a)



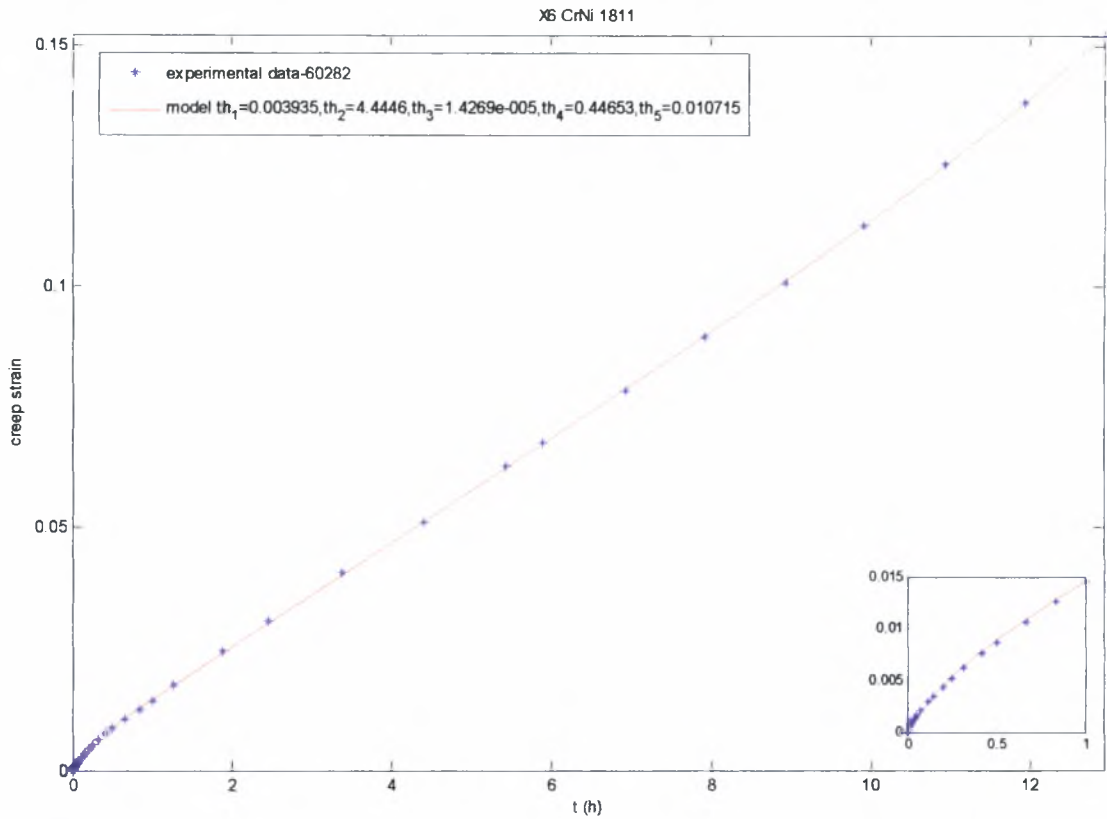
(β)

**Σχ 4.94** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 750 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

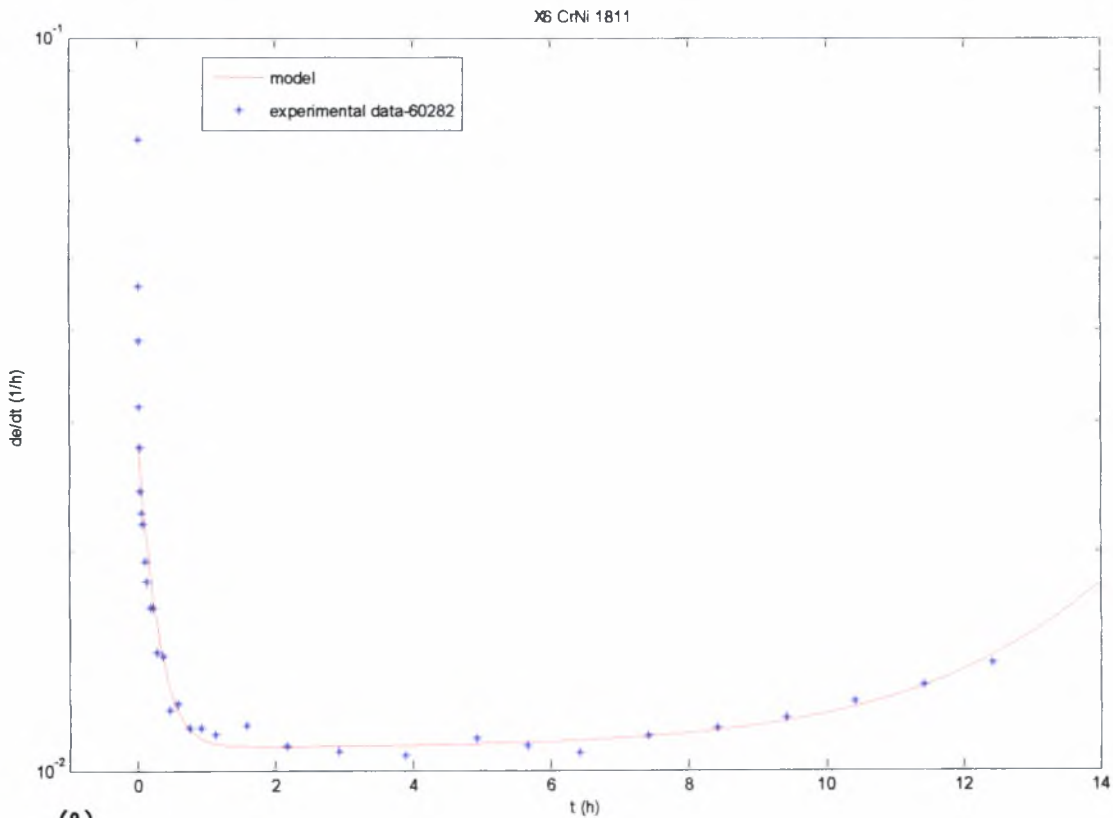




**Σχ 4.95** α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 750 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.



(α)



(β)

Σχ 4.96 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 110Μρα και θερμοκρασία 750 °C για το X6 CrNi 1811 .  
 β) ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το φαινόμενο του ερπυσμού είναι ένα πολύπλοκο και σύνθετο φαινόμενο που αφορά όλα τα υλικά. Στην προσπάθεια επιλογής του κατάλληλου υλικού για μία κατασκευή θα πρέπει να προβλεφθεί η συμπεριφορά του υλικού σε βάθος χρόνου για να αποφευχθούν απρόβλεπτες συνέπειες. Για το λόγο αυτό γίνεται επιτακτική η ανάγκη αξιόπιστης προσέγγισης των πειραματικών δεδομένων.

Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε προσπάθεια προσέγγισης των πειραματικών δεδομένων για το υλικό Χ6 CrNi 1811, με το παραμετρικό μοντέλο των 5-θ:

$$\varepsilon_c(t) = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_5 t + (\theta_3/\theta_4)(e^{\theta_4 t} - 1)$$

Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων έδωσε χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την συμπεριφορά ερπυσμού για το συγκεκριμένο υλικό. Η συγκεκριμένη εξίσωση προσεγγίζει ικανοποιητικά και τα τρία στάδια του ερπυσμού ιδιαίτερα σε τάσεις μεγαλύτερες των 130Μρα. Η συνάρτηση των 5-θ είναι μια αξιόπιστη λύση στην προσπάθεια προσέγγισης του φαινομένου και παράλληλα μια συνάρτηση της οποίας ο προσδιορισμός των παραμέτρων γίνεται με σχετικά εύκολο τρόπο. Η διαπίστωση αυτή το καθιστά ιδιαίτερα «ελκυστικό», σε αντίθεση με κάποιες άλλες μορφές οι οποίες στην προσπάθειά τους να προσεγγίσουν το φαινόμενο ικανοποιητικά, περιπλέκουν το πρόβλημα με αποτέλεσμα η επίλυσή τους να καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη.

Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση φυσικής σημασίας στους συντελεστές θ έχει ως αποτέλεσμα τον ευκολότερο και πιο αξιόπιστο υπολογισμό τους. Η φυσική σημασία που αποδίδεται στους συντελεστές θ όπως ταχύτητα εκκίνησης ,ρυθμός παραμόρφωσης αποτελεί από μόνη της ένα ακόμη έλεγχο αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Harry Kraus, *Creep Analysis*, John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [2] Γ.Δ Χρυσουλάκης Δ.Ι. Παντελής, *Επιστήμη και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών*, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.
- [3] Ιωάννης Πρασιανάκης, Ιωάννης Μήλιος, *Εργαστήρια Πειραματικής Αντοχής Υλικών*, Αθήνα 1987.
- [4] Γ. Παπαδημητρίου, *Γενική Μεταλλογνωσία Ι*, Αθήνα 1989
- [5] R.W. Evans and B. Wilshire, *Introduction to Creep*, The Institute of Materials, London 1993.
- [6] H. K. D. H. Bhadeshia: *ISIJ International* 39 (1999) 966-979.
- [7] H. K. D. H. Bhadeshia: *ISIJ International* 41 (2001) 626-640.
- [8] T. G. Langdon: *Dislocations and creep*, *Dislocations and Properties of Real Materials*, Institute of Metals, London (1985) 221-238.
- [9] H. K. D. H. Bhadeshia and T. Sourmail, *Design of creep-resistant steels: success & failure of models*, Vol. 44(2003) 299-314.
- [10] R. G. Thiessen: *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7*, published by T.U.Graz, Austria 2003.
- [11] R. Sedlacek, W. Blum, *Comput. Mater. Sci.* 25 (2002) 200.
- [12] H. Mughrabi, *Acta Metall.* 31 (1983) 1367.
- [13] M. Meier, W. Blum, *Mater. Sci. Eng. A* 164 (1993) 290.
- [14] Y. F. Yin and R. G. Faulkner: 6th International Charles Parsons and Turbine Conference, *Engineering Issues in Turbine Machinery, Power Plant Renewables*, eds A. Strang, R. D. Conroy, W. M. Banks, M. Blackler, J. Leggett, G. M. McColvin, S. Simpson, M. Smith, F. Starr and R. Vanstone, Institute of Materials, London (2003) 525-535.
- [15] D. Venugopalan and J. S. Kirkaldy: *Hardenability Concepts with*

- Applications to Steels, eds D. V. Doane and J. S. Kirkaldy, TMS-AIME, Warrendale, Pennsylvania, USA(1978) 249-267
- [16] F. Abe: Fourth International Conference on Recrystallisation and Related Phenomena, eds T. Sakai and H. G. Suzuki, The Japan Institute of Metals (1999) 289-294.
- [17] M. Evans: *Materials Science and Technology* 15 (1999) 647-658.
- [18] R. W. Evans and B. Wilshire: *Creep of Metals and Alloys*, The Institute of Metals, London (1985)
- [19] B. J. Cane: *Metal Science*, 13 (1981) 287-294.
- [20] S. M. Beech, D. J. Gooch and A. Strang: Third International Charles Parsons Conference on Materials Engineering in Turbines and Compressors, Newcastle-upon-Tyne, U. K. (1995) 277-291.
- [21] K. Maruyama, H. Kushima and T. Watanabe, *Prediction of Long Term Creep and Rupture Life of 2.25Cr-1Mo Steel*, ISIJ International, Vol. 30 (1990) 817-822.
- [22] K. Maruyama and H. Oikawa, *Trans ASME, J. Pressure Vessel Technology*, 109 (1987) 142.
- [23] K. Maruyama, C. Harada and H. Oikawa, *Trans. Iron Steel Inst. Japan*, 26 (1986) 212.
- [24] D. J. C. Mackay, *Bayesian Non-linear Modelling with Neural Networks*, eds H. Cerjak and H. K. D. H. Bhadeshia, The Institute of Materials, London (1997) 359-389.
- [25] D. J. C. Mackay, *Neural Computation*, 4 (1992a) 415-447.
- [26] D. J. C. Mackay, *Neural Computation*, 4 (1992b) 448-472.
- [27] H. H. D. H. Bhadeshia, D. J. C. Mackay and L. E. Svensson, *Bayesian Neural Network Modelling of Weld Toughness*, *Materials Science and Technology*, (1995).
- [28] T. Cool, H. K. D. H. Bhadeshia and D. J. C. Mackay, *Modelling The*

- Mechanical Properties in The Haz of Power Plant Steels I: Bayesian Neural Network Analysis of Proof Strength*, eds H. Cerjak and H. K. D. H. Bhadeshia, The Institute of Materials, London (1997) 403-442.
- [29] H. K. D. H. Bhadeshia, *ISIJ International* **39** (1999) 966-979.
- [30] D. Cole, C. Martin-Moran, A. G. Sheard, H. K. D. H. Bhadeshia and D. J. C. MacKay, *Modelling Creep Rupture Strength of Ferritic Steel Welds*, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. **5** (2000) No.2 81-89.
- [31] M. Evans, A stochastic lifing method for materials operating under long service conditions: with application to the creep life of a commercial titanium alloy, *Journal of Materials Science* **36** (2001) 4927-4941.
- [32] M Evans, Predicting times to low strain for a 1CrMoV rotor steel using a 6- $\theta$  projection technique, *Journal of Materials Science* **36** (2001) 4927-4941.
- [33] Ν. Βασίλας, Ανάπτυξη μηχανικού μοντέλου δομής μιας παραμέτρου για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ερπυσμού μεταλλικών υλικών, 1994, Πανεπιστήμιο Πατρών.



ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	
ΤΙΤΛΟΣ	
ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
15/07/11	

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
 ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
 Τηλ.: 24210 06300-1



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
 ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085939