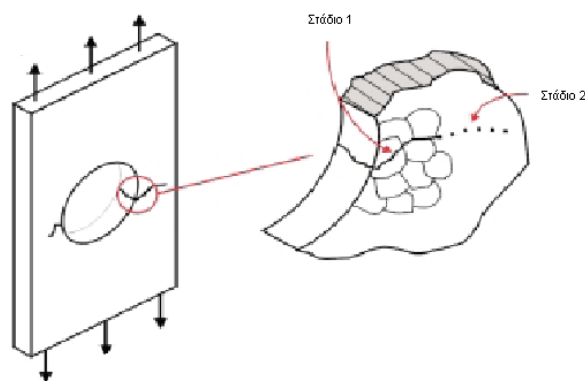




ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ (ΤΕΙ) ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ-ΥΛΙΚΩΝ-ΜΗΧΑΝΩΝ

# ΚΟΠΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΕ ΤΥΧΑΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Σπουδαστής:  
Αναγνωστόπουλος Πέτρος

Εισηγητής:  
Δρ. Μπατσούλας Νικόλαος

Μεσολόγι 2011

Αφιερωμένο στην οικογένειά μου και στην κοπέλα μου

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κόπωση ορίζεται, σύμφωνα με τον ορισμό ASTM, ως «η διαδικασία των προοδευτικών τοπικών μονίμων δομικών μεταβολών που συμβαίνουν στα υλικά που υποβάλλονται σε συνθήκες μεταβαλλόμενων τάσεων σε ένα ή περισσότερα σημεία και που μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές ή πλήρη θραύση μετά από ένα επαρκή αριθμό μεταβολών του φορτίου». Η διαδικασία της κόπωσης αποτελείται από τρία στάδια τα οποία είναι το αρχικό στάδιο της ρωγμής, η προοδευτική αύξηση της ρωγμής σε όλη την πλευρά του υλικού και η τελική ξαφνική θραύση του αρχικού κομματιού.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κόπωσης. Ένας τύπος είναι ο «μηδέν-προς το μέγιστο-προς το μηδέν», ένας άλλος τύπος κόπωσης είναι ο «ένα διαφορετικό φορτίο πάνω σε ένα σταθερό φορτίο». Η χειρότερη περίπτωση της κόπωσης ενός υλικού είναι η περίπτωση γνωστή ως «πλήρης αναστροφή του φορτίου».

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τη βελτίωση των επιδόσεων κόπωσης είναι οι βελτιώσεις στο σχεδιασμό, οι οποίες είναι η εξάλειψη ή η μείωση τάσης με τον εξορθολογισμό του τμήματος, η αποφυγή των απότομων επιφανειακών σχισμών που προκύπτουν από διάτρηση, σφράγιση, κοπή ή άλλες διεργασίες, η αποτροπή της ανάπτυξης των ασυνεχειών επιφάνειας κατά την επεξεργασία, η μείωση ή η εξάλειψη εφελκυσμού υπολειμματικών τάσεων που προκαλούνται από την κατασκευή του υλικού και, η βελτίωση στις λεπτομέρειες της κατασκευής και στερέωσης των διαδικασιών που εκτελούνται ώστε να επέλθει κόπωση του συγκεκριμένου υλικού.

Ο κανόνας του Miner έχει υπολογιστεί από τον ίδιο εμπειρικά και χρησιμοποιείται ευρέως σε συνδυασμό με την καμπύλη του Wohler ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε, ανάλογα με το είδος του υλικού κάθε

φορά, τον αριθμό των κύκλων του υλικού μέχρι να επέλθει αυτό σε κόπωση.

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής σε τυχαία ιστορικά φόρτισης, ακολουθείται κατά κανόνα η παρακάτω διαδικασία που αποτελείται από τρία στάδια. Αυτά είναι η αναγωγή του τυχαίου ιστορικού καταπόνησης σε ένα σύνολο διακεκριμένων κύκλων, η αποτίμηση της φθοράς κάθε διακεκριμένου κύκλου με κάποιον κανόνα συσσώρευσης φθοράς και, η πρόσθεση της φθοράς όλων των διακεκριμένων κύκλων.

Οι μέθοδοι μέτρησης κύκλων που χρησιμοποιούνται για τα τυχαία ιστορικά φόρτισης, είναι η Μέτρηση Διέλευσης Βαθμίδας (Level Crossing Counting), η Μέτρηση Κορυφών (Peak Counting), η Απλή Μέτρηση Εύρους (Simple Range Counting), η Μέθοδος Των Ζευγών Εύρους (Range – Pair Method) και, η Μέτρηση Ροής Της Βροχής (Rainflow Counting).

Ο αλγόριθμος καταμέτρησης της ροής της βροχής (γνωστό και ως «μέθοδος καταμέτρησης rainflow») χρησιμοποιείται για την ανάλυση δεδομένων κόπωσης προκειμένου να μειωθεί το φάσμα των ποικίλων τάσεων σε ένα σύνολο απλών αντίστροφων τάσεων.

Η διαδικασία εφαρμογής της ροής της βροχής σε ένα υλικό που έχει υποστεί σε ένα τυχαίο ιστορικό φόρτισης έχει ως εξής. Μειώνεται το ιστορικό χρόνου σε μια αλληλουχία (εφελκυσμού) κορυφών και (θλιπτική) κοιλάδων, υποτίθεται ότι το ιστορικό του χρόνου είναι ένα πρότυπο για ένα άκαμπτο φύλλο (οροφή παγόδας), γυρίζεται το φύλλο προς τα δεξιά κατά 90 μοίρες (πρώτη φορά στην κορυφή), κάθε εφελκυστική κορυφή φαντάζεται ως πηγή του νερού που «στάζει» προς τα κάτω στην παγόδα, μετριέται ο αριθμός των κύκλων ψάχνοντας για τερματισμό κατά τη φορά της ροής.

Αυτά συμβαίνουν στην περίπτωση που φτάνει το τέλος του ιστορικού του χρόνου, θα συγχωνεύεται με μια ροή που ξεκίνησε σε προγενέστερη εφελκυστική κορυφή, ή ρέει απέναντι από εφελκυστική κορυφή της μεγαλύτερης εμβέλειας, αντιστοιχείται ένα μέγεθος για κάθε μισό κύκλο ίσο με τη διαφορά τάσης μεταξύ της έναρξης και λήξης του και αντιστοιχούνται οι ημικύκλοι του ίδιου μεγέθους για να μετρήσει ο αριθμός των πλήρων κύκλων.

Στο έκτο κεφάλαιο που έχει ως αναφορά του τις εφαρμογές, στις εφαρμογές που έγιναν χρησιμοποιήθηκαν σχήματα από όλα τα παραπάνω κεφάλαια και από την βιβλιογραφία που αναφέρεται στο τέλος αυτής της πτυχιακής εργασίας με σκοπό την εύρεση των λύσεων του καθενός σχήματος και, στις περισσότερες περιπτώσεις, στην επαλήθευση του αποτελέσματος που έχει βρεθεί προηγουμένως. Όλα τα σχήματα επιλύθηκαν ξεχωριστά το καθένα ώστε να βρεθεί μία ορθή λύση ώστε από τυχαία ιστορικά φόρτισης, εφαρμόζοντας την κατάλληλη μέθοδο που αναλογεί στο κάθε σχήμα κάθε φορά, να μετατραπούν σε ομαλοποιημένα (απλά) ιστορικά φόρτισης έτσι ώστε να μπορούν να επιλυθούν με τον κανόνα του Miner όπως αναφέρθηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, βρίσκοντας έτσι ένα ορθό αποτέλεσμα.

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Μηχανικής, Υλικών και Μηχανών υπό την επίβλεψη του καθηγητή Νικόλαου Μπατσούλα, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε, για τον χρόνο που αφιέρωσε και για την υπομονή που έδειξε μέχρι να ολοκληρωθεί η παρούσα πτυχιακή εργασία.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:**

1. ΚΟΠΩΣΗ.....	1
1.1.Εισαγωγή στην κόπωση.....	1
1.2. Χαρακτηριστικά στην κόπωση.....	6
1.3. Εκτίμηση της αντίστασης κόπωσης.....	15
1.4. Πρόληψη αστοχίας της κόπωσης.....	32
1.5. Είδη κόπωσης.....	33
2. ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΟΥ MINER.....	36
3. ΤΥΧΑΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	40
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΥΚΛΩΝ.....	47

5. ΜΕΘΟΔΟΣ RAINFLOW.....	54
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	73
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	130

# 1. ΚΟΠΩΣΗ

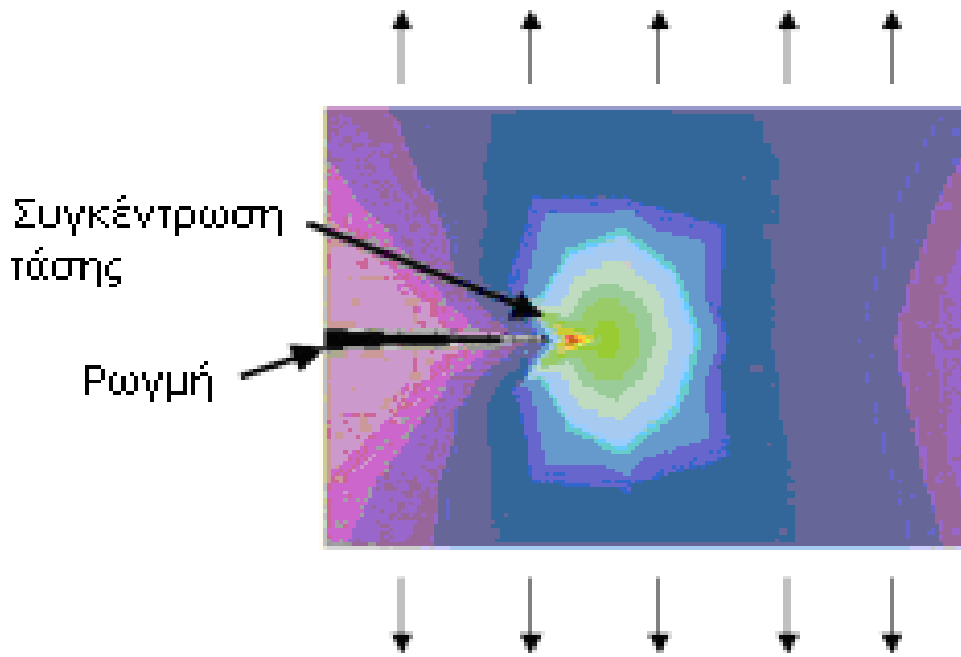
## 1.1.Εισαγωγή στην κόπωση

Σύμφωνα με ανεξάρτητες μελέτες από τον Battelle το 1982, μεταξύ 80-90% του συνόλου των δομικών αστοχιών συμβαίνουν μέσω ενός μηχανισμού κόπωσης, με εκτιμώμενο ετήσιο κόστος στις ΗΠΑ περίπου 1.5 δισεκατομμύρια δολάρια.

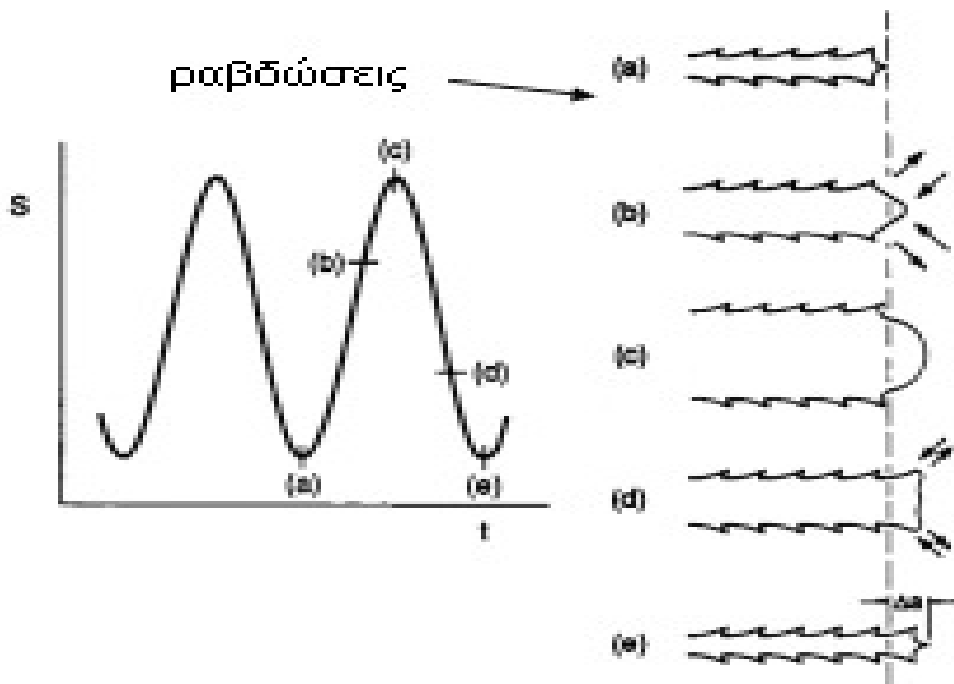
Επιπλέον ο Battelle κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αυτό θα μπορούσε να μειωθεί κατά 29% από την εφαρμογή της τρέχουσας τεχνολογίας της κόπωσης.

Κόπωση ορίζεται, σύμφωνα με τον ορισμό ASTM, ως «η διαδικασία των προοδευτικών τοπικών μονίμων δομικών μεταβολών που συμβαίνουν στα υλικά που υποβάλλονται σε συνθήκες μεταβαλλόμενων τάσεων σε ένα ή περισσότερα σημεία και που μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές ή πλήρη θραύση μετά από ένα επαρκή αριθμό μεταβολών του φορτίου». Οι ρωγμές λόγω της κόπωσης πάντα αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της κυκλικής-πλαστικής παραμόρφωσης σε μια εντοπισμένη περιοχή (Σχήμα 1.1). Αυτή η πλαστική παραμόρφωση προκύπτει συχνά, παρόλα αυτά δεν οφείλεται σε θεωρητική τάση υπό ιδανικές συνθήκες, αλλά μάλλον λόγω της παρουσίας της δημιουργείται μια μικρή ρωγμή ή προϋπάρχουσα βλάβη στην επιφάνεια ενός στοιχείου, η οποία είναι πρακτικά ανιχνεύσιμη και σαφώς ανέφικτη να εντοπιστεί με ένα διαφορετικό μοντέλο. Στο σχήμα 1.2 απεικονίζεται η 2<sup>η</sup> φάση της ανάπτυξης της ρωγμής.



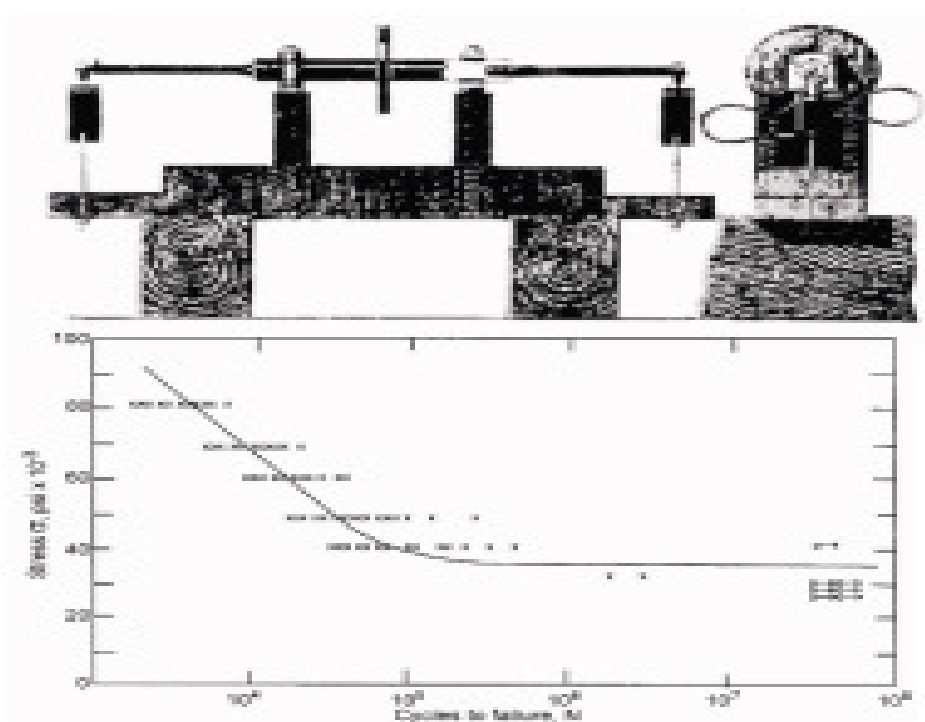


Σχ. 1.1 Υψηλή πλαστική συγκέντρωση τάσεων σε μία φάση της ρωγμής του σταδίου II.



Σχ. 1.2 Απεικόνιση της φάσης II της ανάπτυξης ρωγμής.

Ο August Wöhler ήταν ο πρώτος που μελέτησε την κόπωση και πρότεινε μια εμπειρική προσέγγιση. Μεταξύ του 1852 και του 1870, ο Wöhler μελέτησε την προοδευτική βλάβη των αξόνων των σιδηροδρομικών γραμμών. Κατασκεύασε τη διάταξη δοκιμής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η οποία υποβάλλεται σε δύο άξονες σιδηροδρομικών γραμμών και ταυτοχρόνως σε μία δοκιμή περιστροφικής κάμψης. Ο Wöhler απεικόνισε το πλάτος τάσης συναρτήσει του αριθμού των κύκλων έως την αστοχία του υλικού που έχει γίνει γνωστή ως καμπύλη S-N. Κάθε καμπύλη αναφέρεται ακόμα ως καμπύλη Wöhler. Η μέθοδος S-N εξακολουθεί να είναι η πιο χρησιμοποιούμενη ευρέως μέθοδος έως και σήμερα και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της καμπύλης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 1.3).

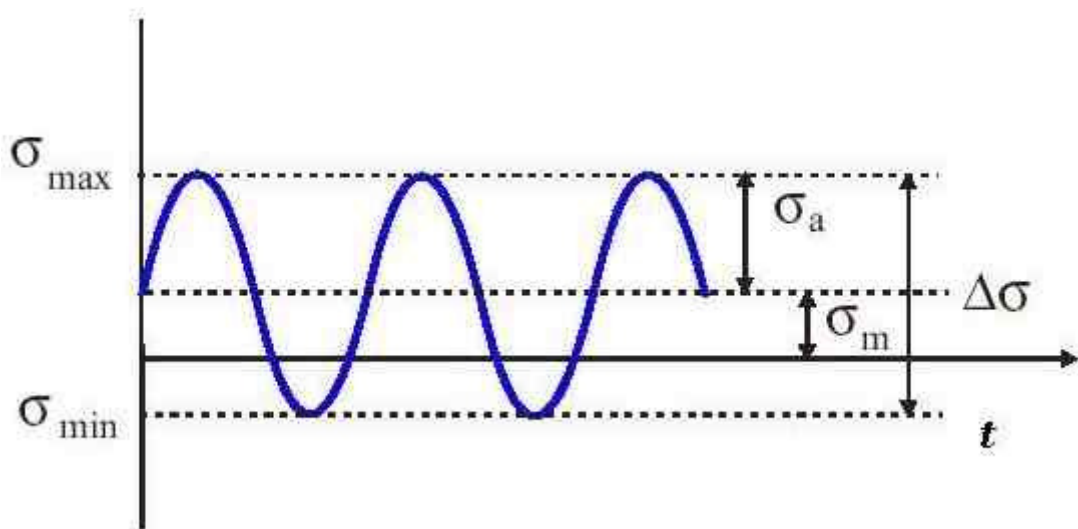


Σχ. 1.3 Δοκιμή κόπωσης της ικανότητας περιστροφικής κάμψης του Wöhler.

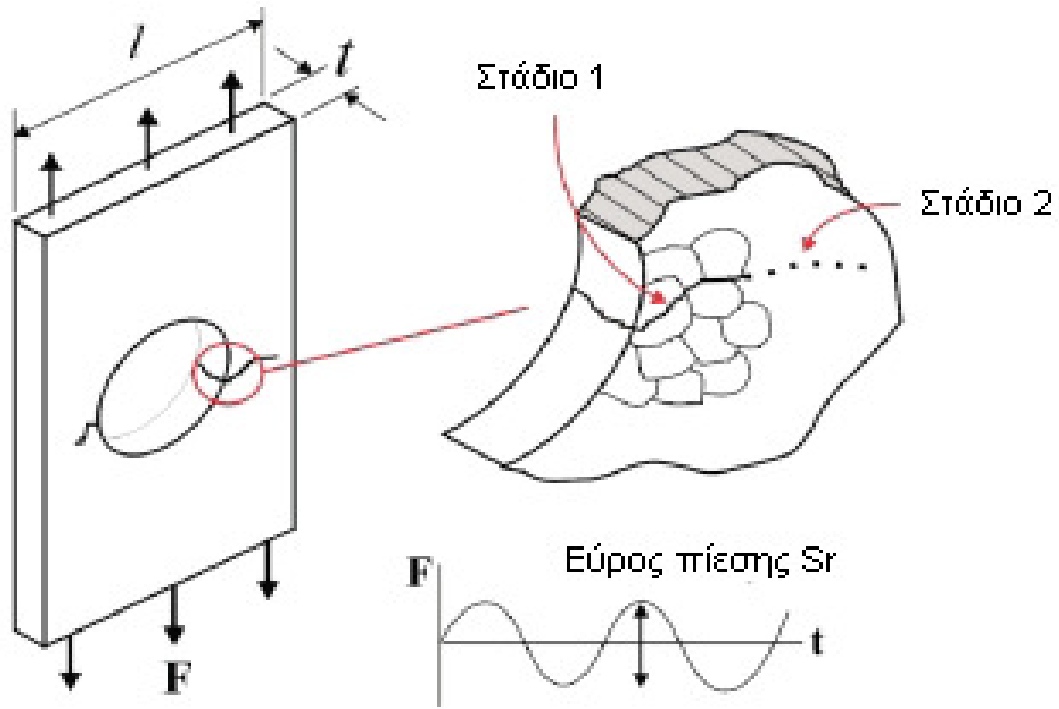
Η διαδικασία της κόπωσης αποτελείται από τρία στάδια (Σχήμα 1.5), τα οποία είναι:

1. Αρχικό στάδιο της ρωγμής,
2. Προοδευτική αύξηση της ρωγμής σε όλη την πλευρά του υλικού και,
3. Τελική ξαφνική θραύση του αρχικού κομματιού.

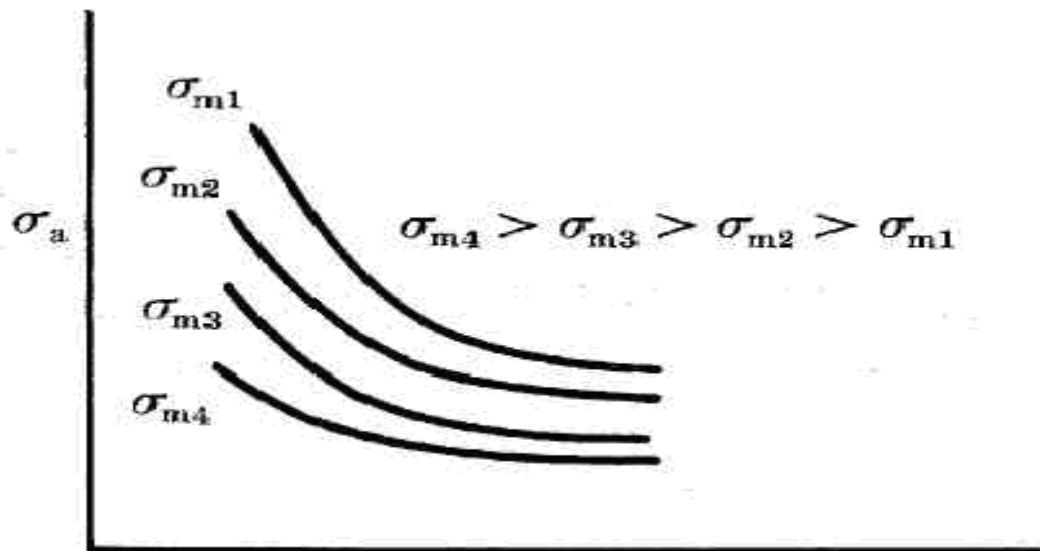
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.4) απεικονίζονται οι επιμέρους τάσεις ενός ομαλοποιημένου ιστορικού φόρτισης, ενώ στο σχήμα 1.6 απεικονίζεται ένα εύρος τάσεων και ο τρόπος που κατατάσσονται μεταξύ τους.



Σχ.1.4 Ομαλό ιστορικό φόρτισης.



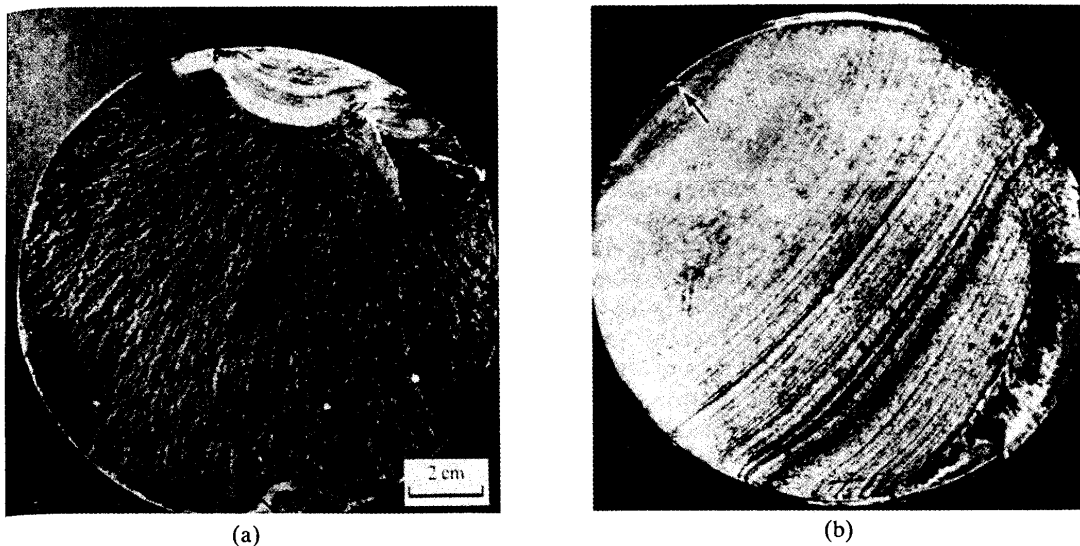
Σχ. 1.5 Εικονογράφηση του σταδίου I και του σταδίου II και επιμέρους ανάπτυξη ρωγμής.



Σχ. 1.6 Απεικόνιση τάσεων.

## 1.2. Χαρακτηριστικά στην κόπωση

Οι επιφάνειες των μετάλλων που έχουν αστοχήσει από κόπωση έχουν συχνά διακριτικά χαρακτηριστικά, και αυτά χρησιμοποιούνται συχνά για να προσδιορίσουν την κόπωση ως πιθανή αιτία αστοχίας. Όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.7) υπάρχει αστοχία που δημιουργείται στην πάνω άκρη (a). Η ομαλή περιοχή με τα χαρακτηριστικά σημάδια «όστρακου μυδιού» αντιστοιχεί στην περιοχή της αργής ανάπτυξης της ρωγμής της κόπωσης και το θαμπό, ινώδες τμήμα είναι η περιοχή γρήγορης θραύσης (b). Η θραύση ξεκινάει από τη θέση που σημειώνεται με το βέλος, μια παύση συνέχειας από ένα κομμένο νήμα. Σε αυτήν την περίπτωση, η περιοχή αργής ανάπτυξης των ρωγμών καταλαμβάνει σχεδόν όλο το σύνολο της επιφάνειας θραύσης. Η περιοχή γρήγορης θραύσης, στη χαμηλότερη δεξιά γωνία, περιλαμβάνει μόνο περίπου δέκα τοις εκατό της επιφάνειας θραύσης.



Σχ. 1.7 Μικρογραφίες των επιφανειών κόπωσης-θραύσης στις ράβδους χάλυβα. .

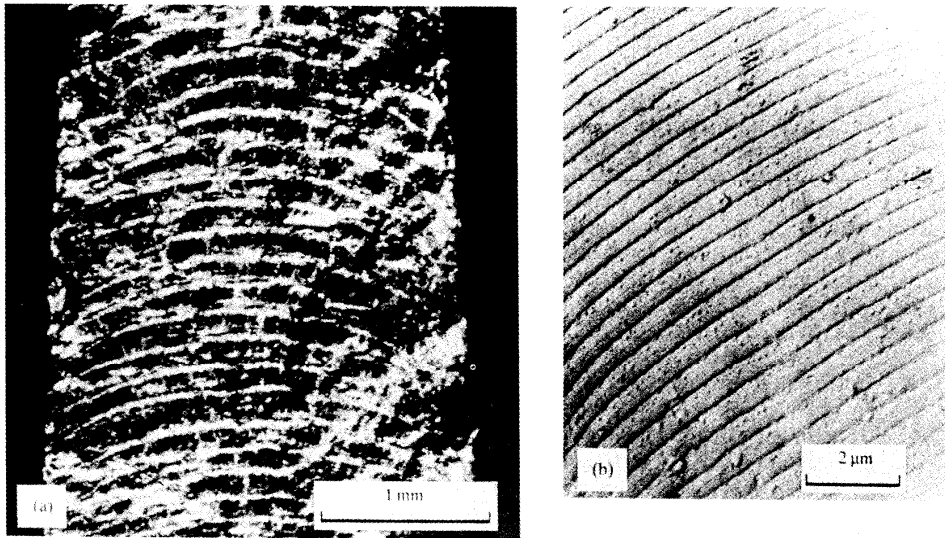
Τα μικρογραφήματα των επιφανειών της θραύσης κόπωσης δίνονται στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 1.7). Σε αυτό το παρατηρητικό επίπεδο, η μορφολογία επιφάνειας έχει δύο ευδιάκριτα χαρακτηριστικά. Το ένα, σημειωμένως ως όστρακο μυδιού ή σημάδια παραλίας, αντιπροσωπεύει εκείνη την μερίδα της επιφάνειας θραύσης πάνω στην οποία η ρωγμή προχώρησε με τον τρόπο αργής ανάπτυξης που είναι χαρακτηριστικός των αποτυχιών κόπωσης.

Τα παραδείγματα που παρουσιάζονται δίνουν αποκαλυπτικά στοιχεία της διαλείπουσας ανάπτυξης των ρωγμών, και τα εγχειρίδια παρουσιάζουν συνήθως τέτοιες ευδιάκριτες εικόνες για να απεικονίσουν την θραύση κόπωσης. Στην πραγματικότητα, οι περιοχές θραύσης σε μια επιφάνεια κόπωσης-θραύσης δεν μπορούν πάντα να σκιαγραφηθούν τόσο εύκολα. Παραδείγματος χάριν, τα προϊόντα διάβρωσης μπορούν να είναι παρόντα στην περιοχή αργής ανάπτυξης, και μπορούν να την κρύψουν. Ομοίως, η επιφάνεια μπορεί, ελλείψει ενός διαβρωτικού μέσου, να είναι λαμπερή στην οποία τα χαρακτηριστικά σημάδια οστράκου μυδιού να εξαλειφθούν ως αποτέλεσμα του διαλείποντος τριψίματος των ζευγαρωτών τμημάτων της επιφάνειας. Αφ' ετέρου, καθένα αυτών των ατελειών είναι επίσης μια σαφής ένδειξη ότι μια ρωγμή έχει διαδοθεί περιοδικά.

Η τραχιά, ινώδης περιοχή της υπόλοιπης μερίδας της επιφάνειας θραύσης αντιστοιχεί στην τελική διαδικασία θραύσης. Είναι μια εκδήλωση μιας μικροσκοπικά όλκιμης θραύσης που συνοδεύει την γρήγορη επέκταση των ρωγμών. Οι σχετικές περιοχές των περιοχών αργής και γρήγορης θραύσης είναι ένα πρόχειρο μέτρο του μεγέθους της μέγιστης κυκλικής τάσης και της ανθεκτικότητας της θραύσης του υλικού ή της εκτατή δύναμης. Παραδείγματος χάριν, σε μια δεδομένη ανθεκτικότητα θραύσης (η τελική πρόοδος των ρωγμών υπαγορεύεται από τις εκτιμήσεις της μηχανικής της θραύσης) ή εκτατή δύναμη (η

γρήγορη θραύση προκαλείται από την υπερφόρτωση), η περιοχή γρήγορης θραύσης αυξάνεται με τη μέγιστη εφαρμοσμένη τάση. Επιπλέον, για μια σταθερή μέγιστη τάση, η σχετική περιοχή που αντιστοιχεί στην αργή επέκταση των ρωγμών αυξάνεται με την ανθεκτικότητα θραύσης του υλικού ή την εκτατή δύναμη.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι αποστάσεις μεταξύ των «σημαδιών δαχτυλιδιών», που είναι μακροσκοπικά ορατές στην επιφάνεια αργής θραύσης, δεν είναι ένα μέτρο της προόδου των ρωγμών ανά κύκλο τάσης ή τάσης. Αφού οι αστοχίες κόπωσης εμφανίζονται χαρακτηριστικά μόνο μετά από πολλές χιλιάδες (μερικές φορές εκατομμύρια) τέτοιους κύκλους, είναι σαφές ότι η αργά αναπτυσσόμενη ρωγμή προχωρά μόνο σε μικροσκοπικές αποστάσεις σε κάθε κύκλο. Υπό τον όρο ότι μια επιφάνεια θραύσης κόπωσης είναι καθαρή, δηλαδή σχετικά απαλλαγμένη από τη διάβρωση ή τα υπολείμματα οξείδωσης, και δεν κηλιδώνεται από το γδάρισμα από τις ζευγαρωμένες επιφάνειες θραύσης, η μικροσκοπική εξέταση αποκαλύπτει συχνά χαρακτηριστικές ραβδώσεις κόπωσης. Το διάστημα μεταξύ αυτών είναι ένα μέτρο της αργής προόδου των ρωγμών ανά κύκλο τάσης. Όταν η κόπωση προκαλείται από την εφαρμογή ενός σταθερού κύκλου τάσης, όπως ισχύει συχνά σε μια εργαστηριακή δοκιμή, τα διαστήματα των ραβδώσεων είναι σχετικά σταθερά.



Σχ. 1.8 Χαρακτηριστικές ραβδώσεις κόπωσης.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 1.8) απεικονίζεται ένα δείγμα χαλκού (a) που υποβάλλεται σε ένα υψηλό εύρος τάσης, και (b) ένα κράμα αργιλίου που υποβάλλεται σε ένα πολύ χαμηλότερο εύρος πίεσης. Το σχετικό διάστημα ανάμεσα στις ραβδώσεις απεικονίζει τα διαφορετικά εύρη τάσεων, που είναι πολύ μεγαλύτερα για το κράμα χαλκού (παρατηρούνται οι διαφορές στην μεγέθυνση).

Κατά τη διάρκεια της κόπωσης των στοιχείων, το διάστημα ραβδώσεων ποικίλλει, απεικονίζοντας τη λίγο-πολύ τυχαία εφαρμογή της κυκλικής τάσης που προκαλεί την αργή ανάπτυξη των ρωγμών. Το ποσοστό διάδοσης των ρωγμών συσχετίζεται πολύ με το πλάτος τάσης (δηλαδή στην αλγεβρική διαφορά των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων) σε κάθε κύκλο· όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό προόδου των ρωγμών. Επίσης, σημειώνεται ότι η παρουσία σημαδιών όστρακου μυδιού και ραβδώσεων είναι αυτό καθ' εαυτό στοιχεία μόνο της διαλείπουσας ανάπτυξης των ρωγμών, και δεν σημαίνει απαραίτητως ότι η αστοχία προκαλείται από κόπωση. Άλλα φαινόμενα (π.χ., κόπωση διάβρωσης, ράγισμα διάβρωσης τάσης, και άλλες μορφές "στατικής" κόπωσης) μπορούν να προκαλέσουν επίσης τη



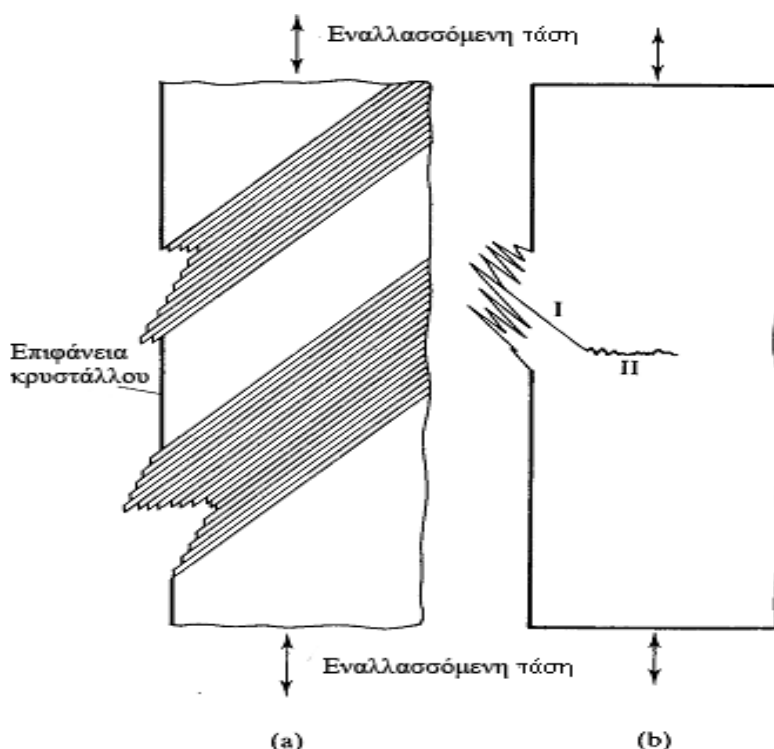
διαλείπουσα ανάπτυξη των ρωγμών, και μπορούν να παράγουν χαρακτηριστικά επιφάνειας θραύσης παρόμοια με εκείνα που συνδέονται με την κόπωση. Ως εκ τούτου, ενώ είναι λογικό σε πολλές περιπτώσεις να προσδιοριστεί η κόπωση ως αιτία της αστοχίας βάσει των σημαδιών όστρακου μυδιού, των ραβδώσεων, κ.λ.π., αυτό δεν πρέπει να γίνεται πάντα.

Τα υλικά μπορούν να αστοχήσουν από μια διαδικασία κόπωσης και να μην εκδηλώσουν ραβδώσεις επιφάνειας θραύσης. Σε μερικές περιπτώσεις, που σημειώνονται ανωτέρω, αυτές εξαλείφονται από άλλες διαδικασίες. Σε άλλες περιπτώσεις, δεν διαμορφώνονται ποτέ. Αυτό συμβαίνει όταν η αργή πρόοδος ρωγμών ανά κύκλο είναι σχετικά μεγάλη (ως αποτέλεσμα ενός μεγάλου πλάτους τάσης και μιας υψηλής μέγιστης τάσης). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η πρόοδος των ρωγμών επηρεάζεται από τη μικροσκοπική σύνδεση των ρωγμών του είδους σχετικά με την μηχανική της θραύσης. Κατά συνέπεια, η περιοχή θραύσης αργής ανάπτυξης μοιάζει με μια όλκιμη θραύση. Επιπλέον, οι ραβδώσεις κόπωσης αυτές καθ' εαυτές συχνά δεν αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κόπωσης του πολυμερούς σώματος.

Η έναρξη θραύσης-κόπωσης δεν έχει συζητηθεί μέχρι αυτό το σημείο. Υπάρχει κάποιος λόγος για αυτό δεδομένου ότι, τουλάχιστον από μια ποσοτική σκοπιά, το γεγονός του σχηματισμού πυρήνων είναι η λιγότερο καλά κατανοητή των διάφορων πτυχών της κόπωσης. Ένας μεγάλος αριθμός μελετών στις μικροδομικές παρατηρήσεις έχει πραγματοποιηθεί, εντούτοις, και αυτές επιτρέπουν σε μας να περιγράψουμε ποιοτικά την έναρξη κόπωσης όπως βρίσκεται να πραγματοποιείται στα μεταλλικά υλικά.

Οι θραύσεις κόπωσης σε αυτά τα υλικά δημιουργούνται σχεδόν αποκλειστικά στις εσωτερικές ή εξωτερικές επιφάνειες, με τις τελευταίες να είναι πιο κοινές. Σε όλα τα υλικά υπάρχουν περιοχές τοπικής

ανομοιογένειας, που οδηγούν στην τοπική «χαλάρωση», δηλαδή σε ρωγμές επιφάνειας που προκαλούν τις τοπικές συγκεντρώσεις τάσης. Καθένας ή και οι δύο παράγοντες μπορούν να οδηγήσουν στην εντοπισμένη πλαστική ροή, η οποία, στο πλαίσιο της δράσης μιας κυκλικής τάσης, μπορεί να παράγει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα επιφάνειας που έχουν, υπό κάποια έννοια, μια ομοιότητα με μια ρωγμή ή μια ατέλεια. Ένας χαρακτηρισμός αυτού του είδους απεικονίζεται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.9), όπου «εξοχές» και «εσοχές» της επιφάνειας προκύπτουν από την ανομοιογένεια της μικροσκοπικής πλαστικής ροής. Η συνεχής κυκλική τάση ενισχύει αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα επιφάνειας και, σε κάποιο σημείο, μια ρωγμή επιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει σχηματισμένους πυρήνες. Σημειώνεται ότι αυτό το στάδιο σχηματισμού πυρήνων, το στάδιο I της θραύσης κόπωσης, είναι κρυσταλλογραφικής φύσης.



Σχ. 1.9 Εσοχές και εξοχές επιφάνειας σε ένα κρύσταλλο που υποβάλλεται σε μια εναλλασσόμενη τάση.

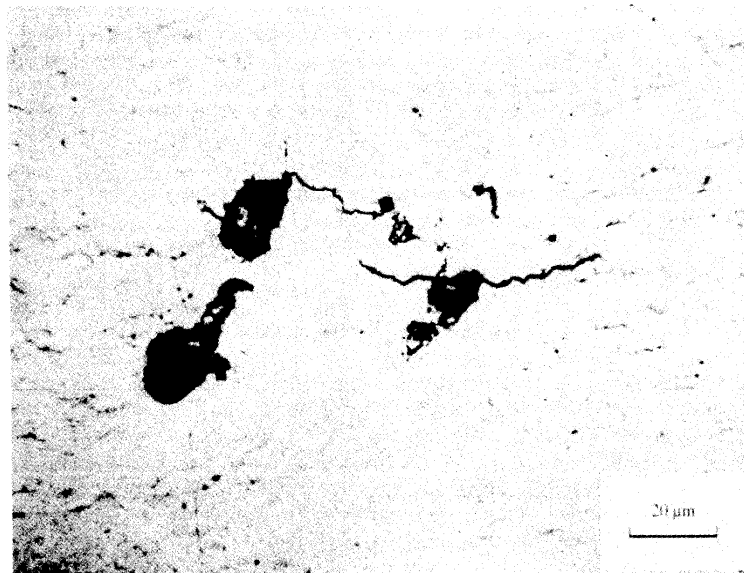
Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 1.9) διαφαίνεται η μορφολογία επιφάνειας, λόγω της ετερογενούς πλαστικής παραμόρφωσης που πραγματοποιείται στις ζώνες ολίσθησης, όπου δεν παρατηρείται κατά τη διάρκεια της μονοτονικής φόρτισης. Σε κάποιο σημείο η εξοχή παίρνει μια μορφή που μοιάζει με ρωγμή, και μια ρωγμή κόπωσης Σταδίου I θεωρείται με σχηματισμένους πυρήνες (b). Η κατεύθυνση της διάδοσης ρωγμής κόπωσης Σταδίου I υπαγορεύεται από τις εκτιμήσεις διαρροής.

Κατά συνέπεια, το αρχικό επίπεδο κόπωσης-ρωγμών δεν είναι παράλληλο στον κύριο άξονα, και η ρωγμή με σχηματισμένους πυρήνες διαδίδεται αρχικά διαγωνίως σε αυτόν τον άξονα. Μετά από αυτά τα γεγονότα σχηματισμού πυρήνων και της αρχικής διάδοσης ρωγμών, η αργή ανάπτυξη ρωγμών (Στάδιο II της κόπωσης) ακολουθεί αφότου έχει αναπτυχθεί η ρωγμή Σταδίου I σε κάποιο κρίσιμο μέγεθος που καθορίζεται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και το επίπεδο και την κατάσταση εφαρμοσμένης τάσης. Όπως θα παρουσιαστεί, οι ρυθμοί ανάπτυξης ρωγμών (αργής) Σταδίου II μπορεί να συσχετιστεί με τις ανωτέρω παραμέτρους. Το τελευταίο συσχετίζεται με τις εκ των προτέρων ποσοτικά απρόβλεπτες μικροσκοπικές μορφολογίες ροής που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κυκλικής τάσης και με την ροή κυκλικής τάσης.

Αφού η έναρξη κόπωσης-ρωγμής συσχετίζεται με τις συγκεντρώσεις τάσης, δεν είναι παράξενο που η επιφάνεια και οι εσωτερικές ατέλειες μπορούν εμφανώς να αλλάξουν τη ζωή της κόπωσης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν ο χρόνος που απαιτείται για μια ρωγμή να σχηματίσει πυρήνες είναι ένα σημαντικό μέρος της ζωής του υλικού. Κατά συνέπεια, ένα υλικό με μια ομαλή, γυαλισμένη επιφάνεια έχει συνήθως μια μεγαλύτερη αντίσταση στην κόπωση από ένα με μια τραχιά επιφάνεια. Επιπλέον, οι περιοχές των μακροσκοπικών συγκεντρώσεων τάσεων (όπως οι εγκοπές) μικραίνουν αξιοσημείωτα τη

ζωή κόπωσης. Η έναρξη κόπωσης-ρωγμών μπορεί επίσης να διευκολυνθεί από τα εγκλείσματα, τα οποία χρησιμεύουν ως εσωτερικοί συμπυκνωτές τάσης. Οι μικροσκοπικές διαδικασίες που οδηγούν στην ανάπτυξη μιας ρωγμής Σταδίου I σε ένα έγκλεισμα, ή άλλη περιοχή της συγκέντρωσης τάσης, είναι αναμφισβήτητα παρόμοιες με εκείνες που συνδέονται με τον σχηματισμό πυρήνων ρωγμών που ξεκινά από την επιφάνεια.

Για να συνοψίσουμε, η θραύση κόπωσης πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Στον πρώτο, ο σχηματισμός πυρήνων ρωγμών προκύπτει από την ετερογενή μικροσκοπική πλαστική ροή. Η ρωγμή του Σταδίου I που διαμορφώνεται έτσι διαδίδεται σε μια κατεύθυνση που υπαγορεύεται από τις εκτιμήσεις ολίσθησης. Όταν φθάνει σε ένα ορισμένο μέγεθος, μια ρωγμή Σταδίου II αναπτύσσεται από αυτόν, και αυτή η ρωγμή διαδίδεται

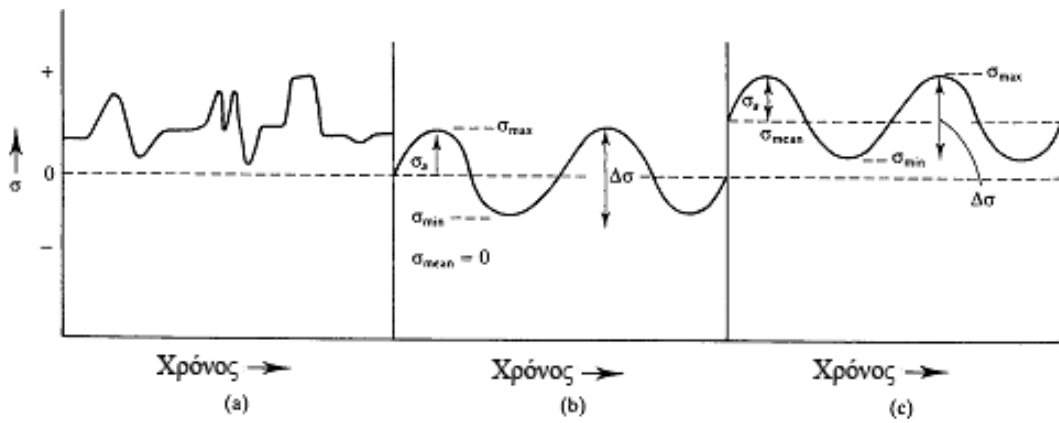


*Σχ. 1.10 Μια ρωγμή κόπωσης που σχηματίζει πυρήνες σε ένα έγκλεισμα σε έναν χάλυβα 4140.*

σε ένα ποσοστό που καθορίζεται κυρίως από τη κλίμακα των εναλλασσόμενων τάσεων και το κάνει αυτό σε μια κατεύθυνση κανονική προς τον κύριο άξονα. Τις περαιτέρω πτυχές των ποσοστών ανάπτυξης ρωγμής Σταδίου II μπορούμε να τις δούμε και στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 1.10). Η τελική θραύση κόπωσης (Στάδιο III) πραγματοποιείται όταν η αργή ανάπτυξη ρωγμών έχει προχωρήσει μέχρι το σημείο η διατομική περιοχή να είναι ανίκανη να στηρίξει το μέγιστο φορτίο που εφαρμόστηκε σε αυτήν. Κατά συνέπεια, η τελική θραύση είναι μια θραύση υπερφόρτωσης που προκαλείται από τη μέγιστη τάση.

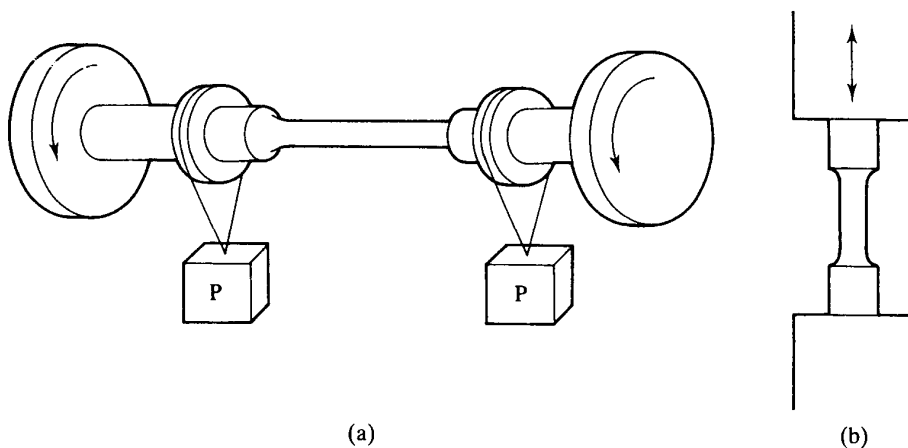
### 1.3. Εκτίμηση της αντίστασης κόπωσης

Όπως αναφέρεται στην εισαγωγή σε αυτό το κεφάλαιο, τα στοιχεία αστοχούν από την κόπωση το κάνουν συνήθως αυτό ως αποτέλεσμα της φόρτισης. Το μέρος κάτω από την πτέρυγα ενός αεροσκάφους χρησιμεύει ως ένα παράδειγμα. Η τάση που φέρει αυτή κατά τη διάρκεια της ομαλής πτήσης μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από τη δομική ανάλυση, και αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να ελεγχθούν από τις πειραματικές δοκιμές. Εντούτοις, εξ αιτίας των ελιγμών και επίσης ως αποτέλεσμα της αναταραχής αέρα, το πραγματικό ιστορικό τάσης-χρόνου της επιφάνειας της πτέρυγας είναι πιθανό να ποικίλει. Επιπλέον, το ιστορικό της συγκεκριμένης κυκλικής τάσης που εικονίζεται θα είναι μοναδικό σε ένα συγκεκριμένο αεροσκάφος· άλλα θα έχουν διαφορετικές, αλλά ακόμα ουσιαστικά τυχαίες, παραλλαγές στην τάση. Είναι σαφές ότι η συστηματική ανάλυση της αντίστασης κόπωσης ενός υλικού απαιτεί την εφαρμογή ενός καλά χαρακτηρισμένου κύκλου τάσης, ακόμα κι αν αυτός ο τύπος δοκιμής δεν μιμείται την λειτουργία πολύ καλά. Ίσως η παλαιότερη τέτοιων αξιολογήσεων είναι η δοκιμή κόπωσης περιστρεφόμενης δοκού. Σε αυτήν την δοκιμή ένα φορτίο εφαρμόζεται ώστε να παραχθεί μια τάση  $\pm \sigma$  στις εκτατές και συμπιεστικά πρεσαρισμένες επιφάνειες της δοκού.



Σχ. 1.11 Οι χαρακτηριστικές παραλλαγές τάσης-χρόνου.

Παραπάνω (Σχήμα 1.11) απεικονίζεται η τάση συναρτήσει του χρόνου σε ένα στοιχείο που υπόκειται σε μια θετική μέση τάση πάνω στην οποία εναπόκειται τυχαία φόρτιση, (b) μια δοκιμή κόπωσης μιας περιστρεφόμενης δοκού στην οποία το υλικό δοκιμάζει εναλλασσόμενες ελλειπτικές και εφελκυστικές τάσεις ίσου μεγέθους, και (c) μια δοκιμή κυκλικής τάσης στην οποία μια ποικίλλουσα με το χρόνο ημιτονοειδής τάση επιβάλλεται σε μια σταθερά μέση τάση. Η διαφορά τάσης, το πλάτος τάσης, και η μέση τάση υποδεικνύονται στα (b) και (c).



Σχ. 1.12 Μια δοκιμή κόπωσης περιστρεφόμενης δοκού.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 1.12) διαφαίνεται ένα σταθερό φορτίο που εφαρμόζεται. Η περιστροφή του δοκιμίου οδηγεί σε μια παραλλαγή τάσης-χρόνου στην επιφάνειά του δηλαδή, εναλλασσόμενη θλίψη και τάση με  $R = -1$  και  $\sigma_a = \Delta\sigma/2 = \sigma_{max}$  (b). Μια δοκιμή κυκλικής τάσης μιμείται τη συμπεριφορά κόπωσης για  $R = -1$ . Σε αυτήν την δοκιμή, μια κυκλική τάση επιβάλλεται σε μια σταθερά μέση τάση έτσι ώστε η τάση να ποικίλλει με το χρόνο.

Καθώς η ακτίνα περιστρέφεται, οι αντίστοιχες επιφάνειες εναλλάσσονται έτσι ώστε κάθε μέρος της επιφάνειας της δοκού να δοκιμάζει έναν κύκλο εναλλασσόμενης τάσης.

Αυτές περιλαμβάνουν τη μέση τάση  $\sigma_{mean} [= 1/2(\sigma_{max} + \sigma_{min})]$ , την διαφορά τάσης  $\Delta\sigma (= \sigma_{max} - \sigma_{min})$ , και το εύρος τάσης  $\sigma_a [= 1/2(\sigma_{max} - \sigma_{min}) = (\Delta\sigma)/2]$ . Συχνά, ο λόγος τάσης  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  χρησιμοποιείται επίσης παραμετρικά. Σαφώς, το  $R$  είναι περιττό με την προϋπόθεση ότι τα  $\sigma_{mean}$  και  $\sigma_a$  είναι γνωστά. Για τη δοκιμή κόπωσης περιστρεφόμενης δοκού, βλέπουμε ότι  $\sigma_{mean} = 0$ ,  $\Delta\sigma = 2\sigma_{max}$ ,  $\sigma_a = \sigma_{max}$  και  $R = -1$ .

Μόνο μερικά από τα στοιχεία επιρρεπή στην αστοχία κόπωσης δοκιμάζουν κύκλους που προσομοιώνονται από τις εναλλασσόμενες τάσεις θλίψης και εφελκυσμού ίσου μεγέθους. Κατά συνέπεια, οι δοκιμές εκτός από τη δοκιμή περιστρεφόμενης δοκού ταιριάζουν καλύτερα για την αξιολόγηση της αντίστασης κόπωσης άλλων μερών. Μια κυκλική εκτατή δοκιμή είναι συχνά κατάλληλη για αυτόν το λόγο. Σε αυτό, ένα καθορισμένο πλάτος τάσης επιβάλλεται κυκλικά σε μια πεπερασμένη μέση τάση.

Η συχνότητα της εφαρμοσμένης τάσης μπορεί να έχει μια επίδραση στην αντίσταση κόπωσης ενός υλικού. Πράγματι, θα δούμε ότι αυτό ισχύει για τα πολυμερή υλικά ακόμη και στις σχετικά χαμηλές συχνότητες. Εντούτοις, για τα μέταλλα και τα κράματά τους, η συμπεριφορά κόπωσης εξαρτάται από την κυκλική συχνότητα μόνο στις

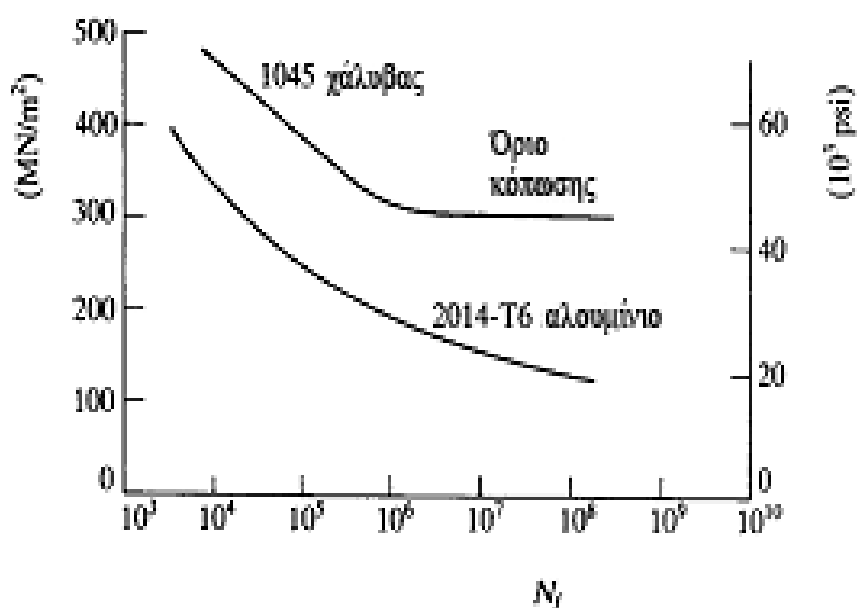


υψηλές συχνότητες. Εάν η συχνότητα παραμένει κάτω από περίπου 200 Hz, η ανταπόκριση κόπωσης μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από την συχνότητα. Δεδομένου ότι οι συχνότητες 200 Hz ή λιγότερο καλύπτουν τη μεγάλη πλειοψηφία των εφαρμογών, μόνο αυτό το φάσμα συχνότητας, στο οποίο η ανταπόκριση κόπωσης ενός υλικού δεν εξαρτάται από τη συχνότητα, εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο.

Λόγω του σημαντικού ρόλου της πλαστικότητας στην κόπωση, είναι θεμελιωδώς πιο βάσιμο να αξιολογηθεί η ανταπόκριση κόπωσης ενός υλικού υπό συνθήκες μιας καθορισμένης κυκλικά εφαρμοσμένης τάσης. Οι δοκιμές αυτού του είδους περιγράφονται αργότερα σε αυτό το τμήμα. Εν τούτοις, οι ελεγχόμενες από την τάση δοκιμές είναι παραδοσιακές και εκτελούνται βολικά. Τα αποτελέσματα από αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως στο σχέδιο της εφαρμοσμένης μηχανικής ενάντια στην κόπωση. Αυτό που γίνεται συνήθως είναι να εκτελείται μια σειρά δοκιμών στην οποία το πλάτος τάσης είναι ποικίλο (σε μια σταθερή μέση τάση), και να μετρηθεί ο αριθμός κύκλων αστοχίας ( $N_f$ ) που είναι απαραίτητοι για να προκαλέσουν την θραύση κόπωσης. Οι συντεταγμένες αυτού του σχήματος είναι  $\sigma_a$  (γραμμική κλίμακα) και  $N_f$  (λογαριθμική κλίμακα). Όπως αναμένεται διαισθητικά, το  $N_f$  αυξάνεται καθώς το  $\sigma_a$  μειώνεται. Για το χάλυβα προφανώς υπάρχει ένα εύρος τάσης κάτω από το οποίο η θραύση δεν θα πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα από τον αριθμό κύκλων τάσης. Αυτό καλείται όριο κόπωσης (μερικές φορές όριο αντοχής) του χάλυβα: μια καλή "εμπειροτεχνική μέθοδος" είναι ότι το όριο κόπωσης είναι περίπου το 40 τοις εκατό της τάσης εφελκυσμού ενός χάλυβα όταν το όριο λαμβάνεται για  $\sigma_{\text{mean}} = 0$  ( $R = -1$ ). Το κράμα αλουμινίου η ανταπόκριση κόπωσης προφανώς δεν φανερώνει ένα όριο κόπωσης. Δηλαδή αυτό το υλικό θα σπάει πάντα με τη διαδικασία κόπωσης υπό τον όρο ότι υποβάλλεται σε έναν αρκετά μεγάλο αριθμό αντιστροφών τάσης, αν και, για να είναι σίγουρο, ο

αριθμός κύκλων για να προκαλέσει αυτό μπορεί να είναι πολύ μεγάλος πράγματι.

Παρακάτω (Σχήμα 1.13) διαφαίνονται οι σχέσεις αριθμού κύκλων προς την αποτυχία για έναν χάλυβα 1045 και ένα κράμα αλουμινίου. Ο χάλυβας δείχνει ένα όριο κόπωσης, ενώ το κράμα αλουμινίου 2014-T6 όχι. Τα στοιχεία για αυτό το σχήμα λήφθηκαν για μια μέση τάση.



Σχ. 1.13 Πλάτος τάσης συναρτήσει του αριθμού κύκλων.

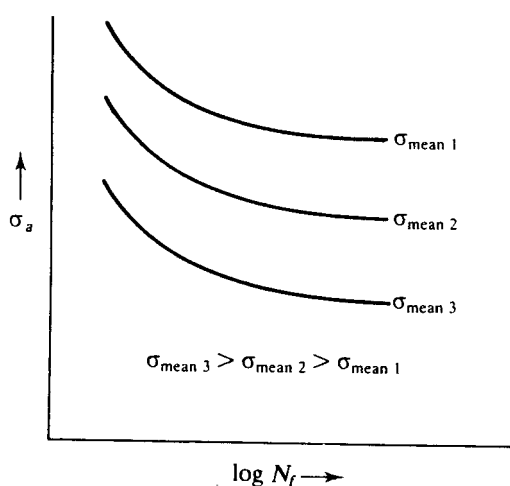
Για τα υλικά που παρουσιάζουν όριο κόπωσης, αυτό χρησιμοποιείται συχνά ως μια παράμετρος σχεδιασμού κόπωσης, ακριβώς όπως το όριο διαρροής στο σχεδιασμό έναντι πλαστικής διαρροής. Για τα υλικά που δεν επιδεικνύουν ένα τέτοιο όριο, μια εναλλακτική παράμετρος σχεδιασμού πρέπει να χρησιμοποιηθεί: συχνά αυτό λαμβάνεται ως πλάτος τάσης που απαιτείται για να προκαλέσει την αστοχία σε έναν πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων (π.χ.,  $N_f = 10^8$ ).

Και αυτό το κρίσιμο πλάτος τάσης και, εάν κριθεί απαραίτητο, το όριο κόπωσης αλλάζουν από το μέγεθος της μέσης τάσης. Αναμένεται ότι καθώς το  $\sigma_{\text{mean}}$  αυξάνει, το όριο κόπωσης ή το κρίσιμο πλάτος τάσης

πρέπει να μειωθεί, και στην πραγματικότητα αυτό συμβαίνει. Διάφορες εμπειρικές εκτιμήσεις έχουν αναπτυχθεί που συσχετίζουν το όριο κόπωσης (ή το κρίσιμο εύρος τάσης) με τη μέση τάση. Μια απλή εκτίμηση, που έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι είναι μια συντηρητική προσέγγιση, οφείλεται στον Goodman. Η εξίσωση Goodman γράφεται ως εξής :

$$\sigma_a = \sigma_{fat} \left( 1 - \frac{\sigma_{mean}}{T.S.} \right) \quad (1.1)$$

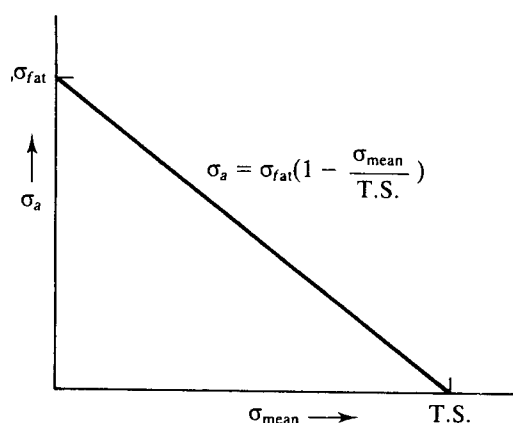
όπου  $\sigma_{fat}$  είναι το όριο κόπωσης (ή το κρίσιμο εύρος τάσης) κατάλληλο για το  $\sigma_{mean} = 0$ , και T.S. είναι το όριο θραύσης του υλικού. Μια γραφική αναπαράσταση είναι μια ευθεία γραμμή σε ένα σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιεί τους άξονες των  $\sigma_a$  και  $\sigma_{mean}$ . Άλλες εξισώσεις έχουν αναπτυχθεί που επιτρέπουν την παρέκταση των δεδομένων κόπωσης που λαμβάνονται για  $\sigma_{mean} = 0$ .



Σχ. 1.14 Πλάτος τάσης (γραμμική κλίμακα) έναντι αριθμού κύκλων ( $N_f$ )(λογαριθμική κλίμακα).

Το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 1.14) παρουσιάζει την επίδραση της μέσης τάσης στη σχέση  $\sigma_a / N_f$ . Καθώς το  $\sigma_{\text{mean}}$  αυξάνεται, το  $N_f$  μειώνεται σε ένα σταθερό  $\sigma_a$ . Επιπλέον, το όριο κόπωσης, εάν υπάρχει, μειώνεται επίσης με την αύξηση του  $\sigma_{\text{mean}}$ .

Οι δοκιμές κυκλικής παραμόρφωσης και κυκλικής τάσης συσχετίζονται. Παραδείγματος χάριν, κατά τη διάρκεια της πολυκυκλικής κόπωσης (όταν ο αριθμός κύκλων μέχρι την αστοχία είναι πολύ μεγάλος ( $\gg 10^3$ )) το επίπεδο μακροσκοπικής παραμόρφωσης είναι τέτοιο που το στοιχείο συνολικά υποβάλλεται μόνο σε ελαστική παραμόρφωση, και, σε αυτήν την περίπτωση, η διαφορά ελαστικής παραμόρφωσης ( $\Delta\epsilon_{el}$ ) συνδέεται με την διαφορά τάσης με το  $\Delta\epsilon_{el} = \Delta\sigma/E$ , όπου το  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

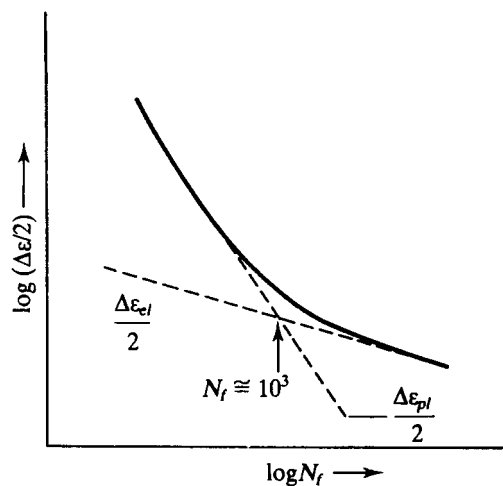


Σχ. 1.15 Διάγραμμα που αναπαριστά την σχέση Goodman.

Η σχέση Goodman αναπαριστάται γραφικά ως ευθεία γραμμή στην οποία το επιτρεπόμενο εύρος τάσης μειώνεται γραμμικά με τη μέση τάση. Για να κατασκευάσουν το διάγραμμα (Σχήμα 1.15), μόνο δύο στοιχεία απαιτούνται: το όριο κόπωσης (ή το επιτρεπόμενο εύρος τάσης) σε μια μέση τάση μηδενική, και το όριο θραύσης του υλικού. Η υπόθεση Goodman δηλώνει ότι το επιτρεπόμενο πλάτος τάσης (ή όριο κόπωσης)

μειώνεται γραμμικά με το  $\sigma_{\text{mean}}$  έτσι ώστε  $\sigma_a = 0$  σε  $\sigma_{\text{mean}} = \text{T.S.}$  Η κατασκευή Goodman είναι συντηρητική για τις εφαρμογές.

Αντιθέτως, στην ολιγοκυκλική κόπωση ( $N_f < 10^3$ ), το υλικό υπόκειται χαρακτηριστικά στη μακροσκοπική, καθώς επίσης και μικροσκοπική, πλαστική παραμόρφωση. Για τις σχετικά χαμηλές τιμές του  $N_f$ , η διαφορά πλαστικής παραμόρφωσης είναι πολύ μεγαλύτερη από την ελαστική, έτσι ώστε  $\Delta\epsilon \cong \Delta\epsilon_{pl}$  · η  $\Delta\epsilon_{pl}$  σχετίζεται με την  $\Delta\sigma$  με τη γνώση της κυκλικής ανταπόκρισης σκλήρυνσης του υλικού. Στη γενική περίπτωση, η συνολική διαφορά  $\Delta\epsilon$ , είναι το σύνολο των  $\Delta\epsilon_{el}$  και  $\Delta\epsilon_{pl}$  με, όπως σημειώνεται, το τελευταίο να κυριαρχεί στις περιοχές χαμηλών κύκλων, και το πρώτο στις περιοχές υψηλών κύκλων. Μια γενική εμπειροτεχνική μέθοδος που χωρίζει τις περιοχές κόπωσης χαμηλών και υψηλών κύκλων για τα μέταλλα είναι ότι η μετάβαση πραγματοποιείται όταν  $N_f \approx 10^3$ , για την οποία υπόθεση  $\Delta\epsilon_{el} \cong \Delta\epsilon_{pl}$ . Τα παραπάνω λεγόμενα της παραγράφου αυτής μπορούν να διαπιστωθούν και από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.16).

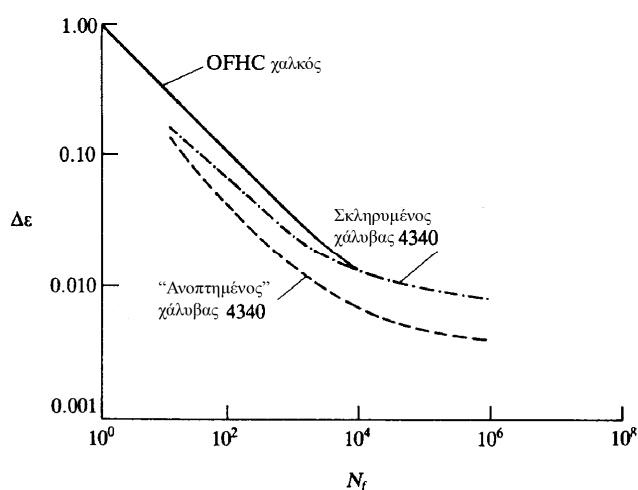


Σχ.1.16 Διάγραμμα που απεικονίζει την  $\log(\Delta\epsilon/2)$  συναρτήσει  $\log N_f$ .

$$\frac{1}{2}\Delta\epsilon_{el} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^{-b} \quad (1.2)$$

Αυτή η σχέση (Σχέση 1.2) ισχύει μόνο σε μακροσκοπικό επίπεδο. Όλες οι διαδικασίες κόπωσης περιλαμβάνουν την πλαστική παραμόρφωση στο μικροσκοπικό επίπεδο, ανεξάρτητα από τη μακροσκοπική τάση.

Σε μια ελεγχόμενη από την τάση δοκιμή κόπωσης το πλάτος κυκλικής παραμόρφωσης ( $\Delta\epsilon/2$ ) μπορεί να σχετίζεται με τον αριθμό κύκλων μέχρι την αποτυχία,  $N_f$ . Κατά τη διάρκεια της κόπωσης υψηλών κύκλων ( $N_f > 10^3$ ) το μεγαλύτερο μέρος της μακροσκοπικής παραμόρφωσης είναι ελαστική, και η κλίση του λογάριθμου ( $\Delta\epsilon/2$ ) συναρτήσει του λογάριθμου  $N_f$  είναι λιγότερο αρνητική από ότι είναι κατά τη διάρκεια της κόπωσης χαμηλών κύκλων ( $N_f < 10^3$ ). Για το τελευταίο, το μεγαλύτερο μέρος της εφαρμοσμένης κυκλικής παραμόρφωσης είναι μόνιμη. Ας σημειωθεί ότι  $\Delta\epsilon/2 = (\Delta\epsilon_{el} + \Delta\epsilon_{pl})/2$ , με  $\Delta\epsilon_{el}$  να κυριαρχεί στην κόπωση υψηλών κύκλων, και το  $\Delta\epsilon_{pl}$  κατά τη διάρκεια της κόπωσης χαμηλών κύκλων.



Σχ. 1.17 Σχέση μεταξύ της διαφοράς παραμόρφωσης ( $\Delta\epsilon$ ) και  $N_f$  για διάφορα μέταλλα.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 1.17), η συμπεριφορά κόπωσης χαμηλών κύκλων των διαφορετικά υποβαλλόμενων σε θερμική επεξεργασία χαλύβων δεν διαφέρει ουσιαστικά. Εντούτοις, ο χάλυβας 4340 φανερώνει ανώτερη συμπεριφορά κόπωσης κατά τη διάρκεια της κόπωσης υψηλών κύκλων. Επιπλέον, το όλκιμο κράμα χαλκού, που έχει έναν συντελεστή υψηλής τάσης σκλήρυνσης, είναι ένα ανώτερο ανθεκτικό στην κόπωση υλικό για τις εφαρμογές χαμηλών κύκλων. Εντούτοις, θα ήταν ένα κατώτερο υλικό έναντι καθενός των χαλύβων (ιδιαίτερα του 4340) για την κόπωση υψηλών κύκλων

Διάφοροι εμπειρικοί συσχετισμοί που αφορούν το πλάτος τάσης και το  $N_f$  έχουν προωθηθεί κατά τη διάρκεια των ετών, και με ποικίλους βαθμούς επιτυχίας. Παραδείγματος χάριν, για την κόπωση υψηλών κύκλων ( $\Delta\epsilon \equiv \Delta\epsilon_{el}$ ), η διαφορά ελαστικής τάσης συσχετίζεται στο  $N_f$  μέσω της παραπάνω εξίσωσης όπου το  $E$  είναι ο συντελεστής, και το  $\sigma_f'$  και το  $b$  μπορούν να καθοριστούν μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων. Η παράμετρος  $\sigma_f'$  έχει βρεθεί να κλιμακώνεται και είναι πράγματι κοντά, στο μονοαξονικό όριο θραύσης. Η προκύπτουσα επίπτωση είναι, επομένως, ότι ένα ισχυρό υλικό είναι καλύτερο στις εφαρμογές κόπωσης υψηλών κύκλων (δηλαδή για μια δεδομένη  $\Delta\epsilon$ , το  $N_f$  αυξάνει με το  $\sigma_f'$ ). Αυτό είναι σύμφωνο με την άποψη ότι ένα σημαντικό μέρος της ζωής κόπωσης ενός υλικού κατά τη διάρκεια της κόπωσης υψηλών κύκλων ξοδεύεται στο σχηματισμό πυρήνων των ρωγμών.

Ο μηχανολογικός σχεδιασμός αναγνωρίζει αυτήν την πτυχή της κόπωσης υψηλών κύκλων. Δεδομένου ότι ο σχηματισμός πυρήνων ρωγμών προκαλείται από την τοπική πλαστική παραμόρφωση, συνήθως στην επιφάνεια του υλικού, οι αυξήσεις στη δύναμη επιφάνειας μπορούν

να καθυστερήσουν το σχηματισμό πυρήνων. Κατά συνέπεια, η σφυρηλάτηση με βολή της επιφάνειας (επεξεργασία στο κρύο) χρησιμοποιείται για να βελτιώσει τη συμπεριφορά κόπωσης υψηλών κύκλων και το ίδιο συμβαίνει και με τις εξειδικευμένες χημικές και θερμικές επεξεργασίες επιφάνειας (π.χ., ανθρακοποίηση, εναζώτωση, και σχηματισμός μαρτενσίτη επιφάνειας στους χάλυβες), οι οποίες αυξάνουν τη σκληρότητα επιφάνειας.

Ο εκθέτης  $b$  μπορεί να σχετίζεται με τον κυκλικό συντελεστή σκλήρυνσης του υλικού, το  $n'$  καθορίζεται μέσω της εμπειρικής σχέσης  $(\Delta\sigma I_2) = K'(\Delta\epsilon I_2)^{n'}$ , κατάλληλη για αυτό το είδος φόρτισης. Ο συντελεστής  $b$  ποικίλλει με το  $n'$  ως  $b \cong n' (1 + 5n')$ . Δεδομένου ότι μια μεγαλύτερη τιμή του  $b$  παράγει μια πιο αρνητική κλίση στην γραφική παράσταση  $\Delta\epsilon/2-N_f$  (Σχήμα 1.17), είναι σαφές ότι ένα υλικό που έχει έναν υψηλό κυκλικό συντελεστή σκλήρυνσης δεν είναι τόσο χρήσιμος για την κόπωση υψηλών κύκλων όπως είναι ένα με μια χαμηλή τιμή του  $n'$ . Ας σημειωθεί εντούτοις, ότι το  $n'$  είναι δευτερεύουσας σπουδαιότητας για το  $\sigma_f'$  στον καθορισμό της αντίστασης κόπωσης υψηλών κύκλων. Όπως σημειώθηκε, η κατάλληλη χρήση της σχέσης μεταξύ των  $b$  και  $n'$  απαιτεί τη γνώση της ανταπόκρισης κυκλικής σκλήρυνσης ενός μετάλλου. Ελλείψει τέτοιων στοιχείων, ο μονοαξονικός συντελεστής εργασίας σκλήρυνσης,  $n$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του  $n'$  ως μια πρώτη εκτίμηση του  $b$ . Εντούτοις οι περιορισμοί σε αυτήν την προσέγγιση πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Οι εμπειρικές σχέσεις μεταξύ των  $\Delta\epsilon_{pl}$  και  $N_f$  έχουν αναπτυχθεί επίσης για την κόπωση χαμηλών κύκλων. Μια τέτοια έκφραση χαρακτηρίζεται από τον παρακάτω τύπο :

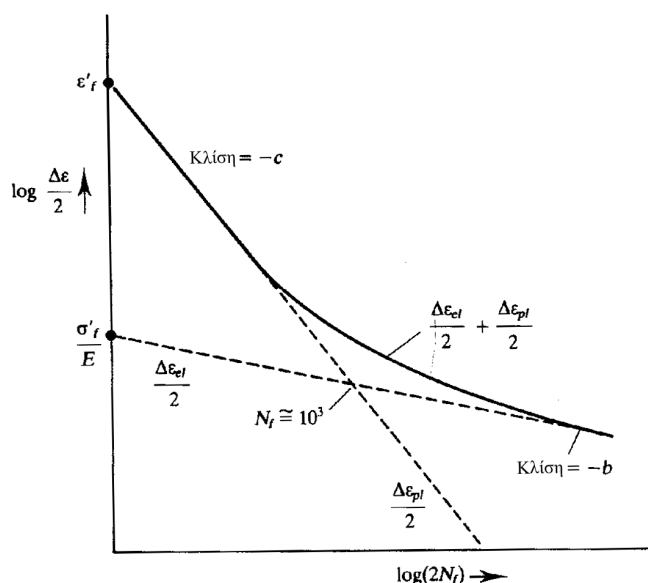
$$\frac{1}{2}\Delta\epsilon_{pl} = \epsilon_f'(2N_f)^{-c} \quad (1.3)$$



όπου το  $c$  είναι χαρακτηριστικά 0.5-0.7 και συσχετίζεται περίπου με το  $n'$  μέσω του  $c \cong 1/(1+5n)$ . Επιπλέον, το  $\epsilon'_f$  είναι κοντά στην εκτατή ολκιμότητα. Κατά συνέπεια, για το σχέδιο ενάντια στην κόπωση χαμηλών κύκλων είναι επιθυμητό να υπάρξει ένα υλικό που να φανερώνει και την καλή ολκιμότητα και την υψηλή εργασία σκλήρυνσης, γιατί κάθε ένα από αυτά οδηγεί σε αυξανόμενες τιμές του  $N_f$ .

Αφού οι παραπάνω εξισώσεις έχουν βρεθεί επαρκώς να αντιπροσωπεύουν την σχέση πλάτους παραμόρφωσης προς τους κύκλους αστοχίας στα «άκρα» της συμπεριφοράς κόπωσης (κόπωση υψηλών κύκλων και χαμηλών κύκλων), είναι λογικό να υποθεθεί ότι η γενική σχέση μεταξύ των  $\Delta\epsilon (= \Delta\epsilon_{el} + \Delta\epsilon_{pl})$  είναι το σύνολό τους. Δηλαδή μπορούμε να γράψουμε :

$$\frac{1}{2}\Delta\epsilon = \frac{1}{2}\Delta\epsilon_{el} + \frac{1}{2}\Delta\epsilon_{pl} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^{-b} + \epsilon'_f(2N_f)^{-c} \quad (1.4)$$



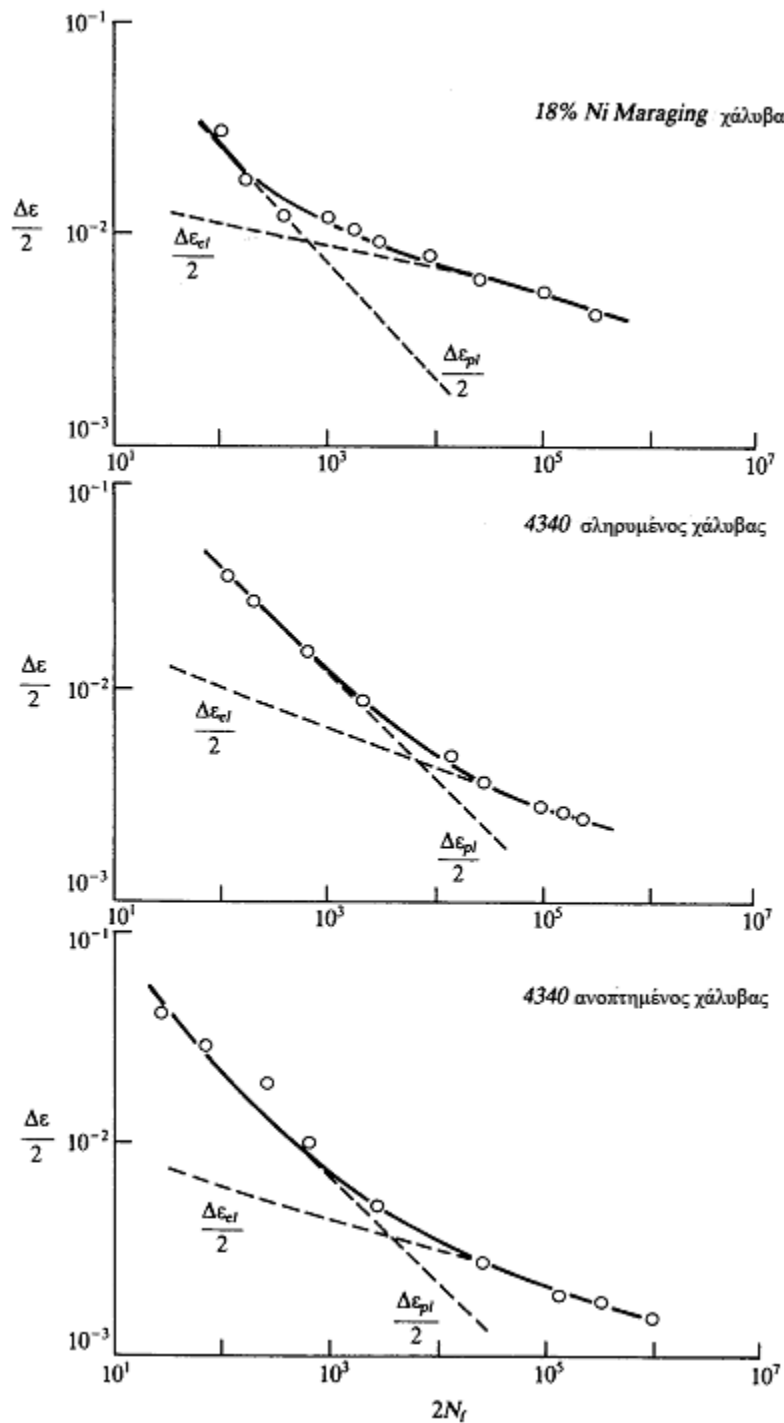
Σχ. 1.18 Μια σχηματική αναπαράσταση πλάτους παραμόρφωσης συναρτήσεως αντιστροφών αστοχίας.

Στο σχήμα 1.18, απεικονίζονται οι χαμηλές τιμές  $N_f$ , όπου  $\Delta\epsilon \equiv \Delta\epsilon_{pl}$  και η κλίση των λογαριθμικών συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται είναι  $-c$  και η παρεμπόδιση της γραμμής είναι  $\mathcal{E}'_f$ . Στους υψηλούς κύκλους η λογαριθμική κλίση είναι  $-b$  (με  $b < c$ ), και η παρέκταση αυτού του μέρους της καμπύλης (όπου  $\Delta\epsilon \equiv \Delta\epsilon_{el}$ ) παράγει την παρεμπόδιση  $\sigma'_f/E$ .

Καταλήγουμε με μια υπενθύμιση ότι διαφορετικές υλικές ιδιότητες είναι επιθυμητές για τις εφαρμογές κόπωσης χαμηλών κύκλων έναντι των υψηλών κύκλων. Μια υψηλή ολκιμότητα είναι επιθυμητή για τις εφαρμογές χαμηλών κύκλων, επειδή οι ρωγμές κόπωσης σχηματίζουν πυρήνες νωρίς στη ζωή του υλικού. Δεδομένου ότι η αργή πρόοδος των ρωγμών εμποδίζεται από ένα υλικό που σκληραίνει κατά την εργασία επαρκώς, αυτές οι ιδιότητες απαιτούνται για την εφαρμογή κόπωσης χαμηλών κύκλων. Αντίθετα, ο σχηματισμός πυρήνων των ρωγμών πρέπει να καθυστερήσει για τα υλικά που προορίζονται για να αποδώσουν ακίνδυνα πέρα από έναν μεγάλο αριθμό αντιστροφών τάσης ή παραμόρφωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση των υλικών υψηλής αντοχής.

Αυτές οι παρατηρήσεις "συνοψίζονται" σχηματικά σκιαγραφώντας τις καμπύλες  $\Delta\epsilon/2 - N_f$  και για τα "ισχυρά" και τα όλκιμα υλικά, όπως γίνεται στο σχήμα 1.17. Από τις αναφορές ανωτέρω, τα ισχυρά υλικά είναι καλύτερα για τις εφαρμογές κόπωσης στις υψηλές, και τα όλκιμα για τις χαμηλές, τιμές του  $N_f$ . Το σημείο «διασταυρώσεων» πραγματοποιείται χαρακτηριστικά στο  $N_f \cong 10^3$ , για το οποίο  $\Delta\epsilon_{el} \equiv \Delta\epsilon_{pl}$ . Η βέλτιστη απόδοση των υλικών σε ολόκληρη την κλίμακα των τάσεων λαμβάνεται μέσω του «σκληρού» υλικού η συμπεριφορά του οποίου επίσης φαίνεται στο σχήμα 1.17. Ένα τέτοιο υλικό μπορεί να γίνει με τη

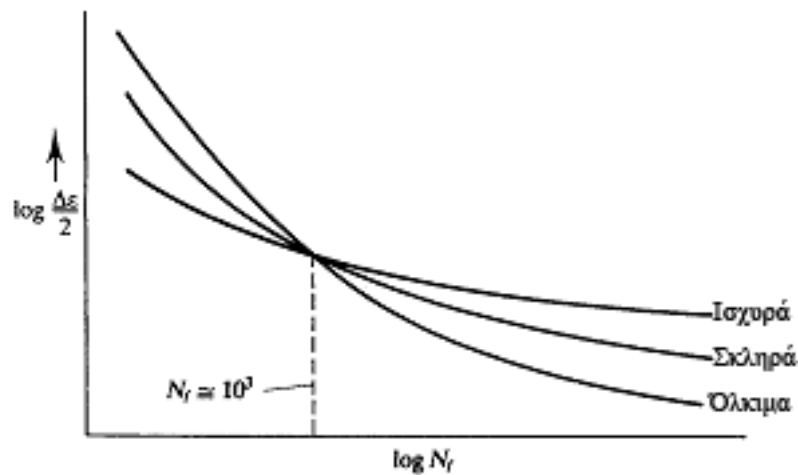
μείωση του ορίου διαρροής και την ενίσχυση της ολκιμότητας του «ισχυρού» υλικού ή με την αύξηση του ορίου διαρροής (συνήθως εις βάρος της ολκιμότητας) του «όλκιμου». Είναι σαφές ότι το «ιδανικό» ανθεκτικό στην κόπωση υλικό φανερώνει υψηλό όριο και ολκιμότητα και, με βάση τα στοιχεία αυτά, τα κριτήρια στην επιλογή ενός υλικού ανθεκτικού στην θραύση κόπωσης δεν διαφέρουν από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την επιλογή ενός υλικού ανθεκτικού στην εκτατή θραύση.



Σχ. 1.19 Σχήματα πλάτους τάσης ( $\Delta \epsilon / 2$ ) – αριθμών αντιστροφών ( $2N_f$ ) για διάφορα σιδηρούχα υλικά.

Στο σχήμα 1.19, η συνεχής γραμμή είναι η σχέση που προβλέπεται από την εξίσωση 1.4 και οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά στοιχεία. Οι γραμμές με παύλες αντιπροσωπεύουν τα πλάτη ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης και όπως αναμένεται, αυτά είναι συγκρίσιμα όταν  $N_f \approx 10^3$ . Είναι σαφές ότι η παραπάνω εξίσωση 1.4

αντιπροσωπεύει επαρκώς τα πειραματικά αποτελέσματα του σχήματος 1.19.

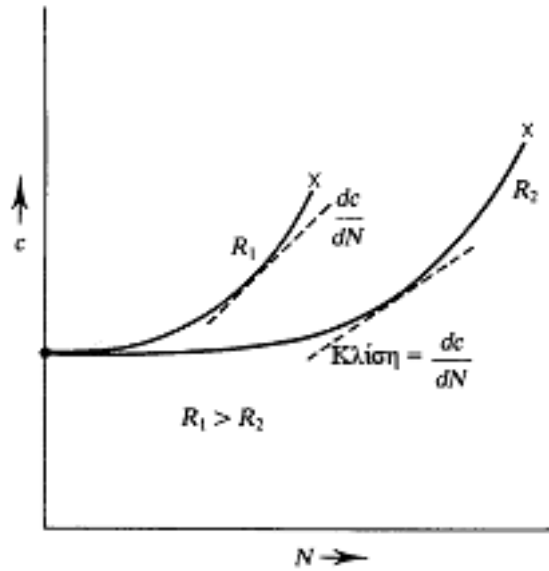


Σχ. 1.20 Σχηματική αναπαράσταση που επεξηγεί τις σχέσεις πλάτους τάσης-αριθμού αντιστροφών για διάφορα υλικά.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 1.20) μπορεί να διαπιστωθεί ότι τα ισχυρά κράματα είναι καλύτερα για τις εφαρμογές κόπωσης υψηλών κύκλων, δεδομένου ότι είναι δυσκολότερο να σχηματίσουν πυρήνες στις ρωγμές κόπωσης. Τα όλκιμα κράματα είναι καλύτερα για τις εφαρμογές κόπωσης χαμηλών κύκλων επειδή είναι δυσκολότερο να διαδοθούν οι ρωγμές σε αυτά και η διάδοση ρωγμών σταδίου II καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της ζωής κόπωσης χαμηλών κύκλων. Ένα "σκληρό" κράμα είναι ένας καλός συμβιβασμός όταν και η αντίσταση κόπωσης υψηλών κύκλων και χαμηλών κύκλων είναι απαραίτητη.

Έχει διαπιστωθεί ότι η αργή ανάπτυξη των ρωγμών καταλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος της ζωής ολιγοκυκλικής κόπωσης. Λόγω αυτού, διάφορες δοκιμές έχουν αναπτυχθεί για να ελέγξουν το ποσοστό ανάπτυξης ρωγμών σταδίου II καθώς αυτό εξαρτάται από το μέγεθος των ρωγμών και την διαφορά τάσης (Σχήμα 1.21). Τα αποτελέσματα

παρέχουν τα στοιχεία κατάλληλα για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής κόπωσης, ιδιαίτερα στις εφαρμογές κόπωσης χαμηλών κύκλων.



Σχ. 1.21 Γραφική παράσταση του  $c$  συναρτήσει των  $N$  κύκλων που φέρνει ένα υλικό μέχρι την κόπωση.

#### 1.4. Πρόληψη αστοχίας της κόπωσης

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τη βελτίωση των επιδόσεων κόπωσης είναι οι βελτιώσεις στο σχεδιασμό, οι οποίες είναι:

- Εξάλειψη ή μείωση τάσης με τον εξορθολογισμό του στοιχείου,
- Αποφυγή των επιφανειακών διαμορφώσεων που προκύπτουν από διάτρηση, σφράγιση, κοπή ή άλλες διεργασίες,
- Αποτροπή της ανάπτυξης των ασυνεχειών επιφάνειας κατά την επεξεργασία,
- Μείωση ή εξάλειψη παραμενουσών τάσεων που προκαλούνται από την κατασκευή του υλικού,
- Βελτίωση στις λεπτομέρειες της κατασκευής και στερέωσης των διαδικασιών που εκτελούνται ώστε να επέλθει κόπωση του συγκεκριμένου υλικού.

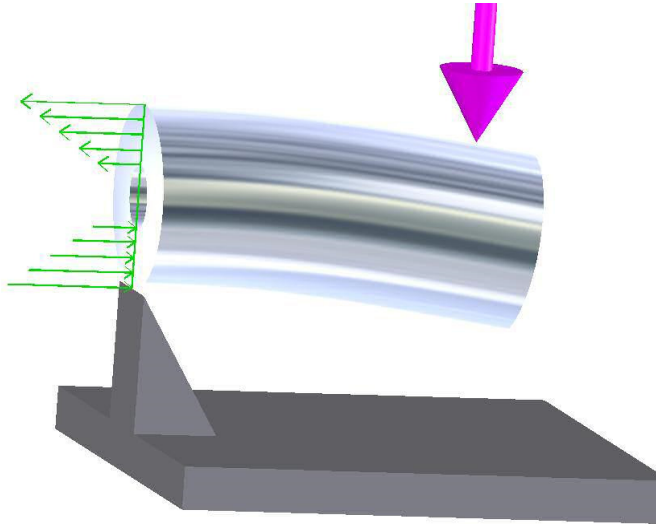
## 1.5. Είδη κόπωσης

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κόπωσης. Ένας τύπος είναι ο «μηδέν-προς το μέγιστο-προς το μηδέν», το οποίο ισχύει όταν ένα μέρος του υλικού που δεν μεταφέρει φορτίο, στη συνέχεια υπόκειται σε φορτίο, και αργότερα, αφαιρείται αυτό το φορτίο, έτσι ώστε το υλικό γυρίζει πίσω στη μη φορτιζόμενη κατάστασή του. Ένα παράδειγμα αυτού του τύπου φόρτισης είναι μια αλυσίδα που χρησιμοποιείται για να μεταφέρουν κορμούς πίσω από ένα τρακτέρ.

Ένας άλλος τύπος κόπωσης είναι ο «ένα διαφορετικό φορτίο πάνω σ ένα σταθερό φορτίο». Τα καλώδια αναστολής σε μία γέφυρα του σιδηροδρόμου είναι ένα παράδειγμα αυτού του τύπου. Τα καλώδια έχουν ένα σταθερό στατικό φορτίο εφελκυσμού από το βάρος της γέφυρας και ένα πρόσθετο φορτίο εφελκυσμού όταν οι αμαξοστοιχίες είναι στη γέφυρα.

Η χειρότερη περίπτωση της κόπωσης ενός υλικού είναι η περίπτωση γνωστή ως «πλήρης αναστροφή του φορτίου». Ένας κύκλος αυτού του τύπου κόπωσης παρουσιάζεται όταν μια τάση εφελκυσμού που έχει κάποια τιμή εφαρμόζεται σε ένα μέρος χωρίς φορτίο και στη συνέχεια αφήνεται ελεύθερο, τότε η τάση θλίψης της ίδιας τιμής εφαρμόζεται στο ίδιο σημείο και αφήνεται και αυτό ελεύθερο.

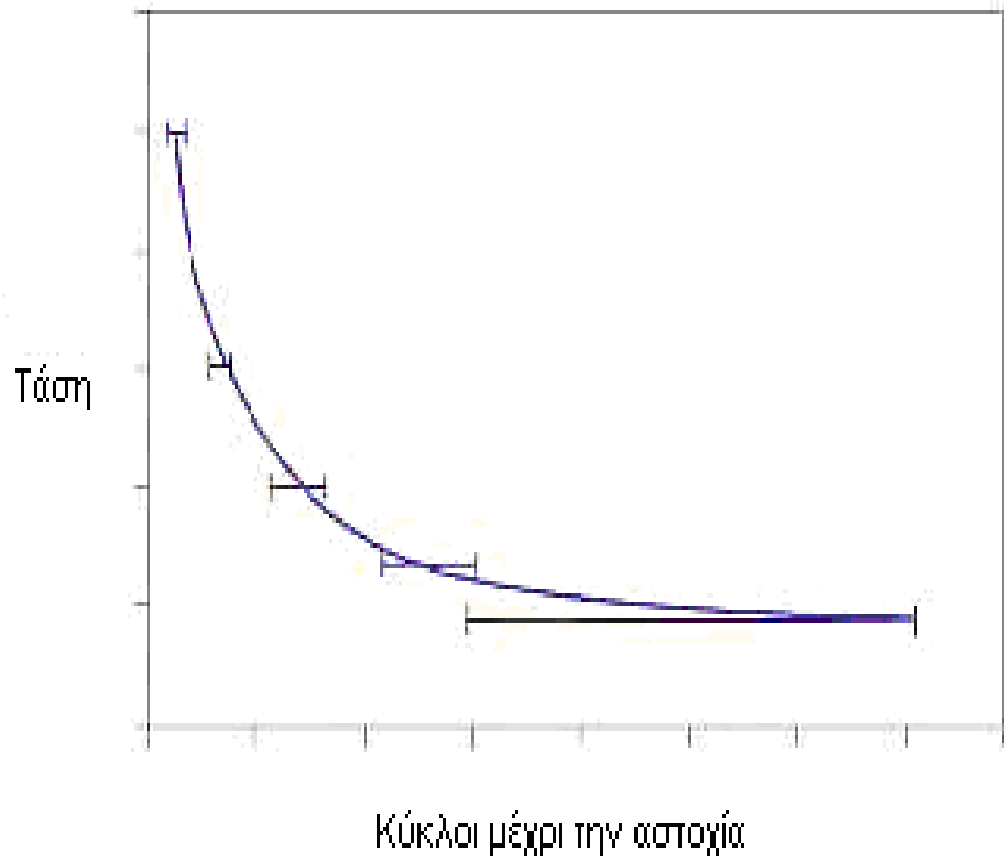




Σχ. 1.22 Δημιουργία κάμψης σε έναν περιστρεφόμενο μεταλλικό άξονα.

Ένας περιστρεφόμενος άξονας με ένα φορτίο κάμψης που εφαρμόζεται σε αυτόν είναι ένα καλό παράδειγμα της πλήρους αντιστροφής του φορτίου. Για να απεικονίσει την πλήρη αντιστρεπτότητα της φύσης του φορτίου, ο άξονας πρέπει να είναι σε σταθερή θέση (μη περιστρεφόμενος), αλλά να υπόκειται σε φόρτιση κάμψης (όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 1.22). Οι εξοχές των απόκεντρων ινών στην επιφάνεια του άξονα από την κυρτή πλευρά της παραμόρφωσης (άνω επιφάνεια στην εικόνα) θα φορτιστούν με εφελκυσμό (πράσινα βέλη), και οι ίνες από την αντίθετη πλευρά θα φορτιστούν με θλίψη (κάτω πράσινα βέλη). Τώρα, αν περιστραφεί ο άξονας  $180^\circ$  στα έδρανα της, το φορτίο θα παραμένει το ίδιο. Το επίπεδο κόπωσης του άξονα θα παραμείνει το ίδιο, αλλά τώρα οι ίνες που φορτίστηκαν με θλίψη πριν να περιστραφεί το υλικό, τώρα φορτίζονται με εφελκυσμό και αντίστροφα. Στην πραγματικότητα, ο εργαστηριακός μηχανισμός που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κόπωσης των υλικών είναι ένας περιστρεφόμενος άξονας με μια

φόρτιση κάμψης. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.23) απεικονίζεται με λεπτομέρεια πόσους κύκλους χρειάζεται ένα υλικό μέχρι να επέλθει σε αυτό αστοχία.



Σχ. 1.23 Διάγραμμα που αναπαριστά το πότε (πόσους κύκλους) θα επέλθει αστοχία σε ένα υλικό.

## 2. ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΟΥ MINER

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν πολλοί τρόποι να υπολογίσουμε πότε θα επέλθει αστοχία σε ένα υλικό. Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες ώστε να μπορούν να υπολογισθεί η κόπωση διαφόρων υλικών με ένα συγκεκριμένο πλάτος τάσης. Κανείς όμως δεν ενδιαφέρθηκε να ανακαλύψει τι γίνεται όταν από ένα πλάτος τάσης  $\sigma_1$  ξαφνικά για κάποιους λόγους το πλάτος τάσης μεταβληθεί σε  $\sigma_2$ , ώσπου ο Miner πρότεινε έναν τύπο ώστε να επιλυθεί το παραπάνω πρόβλημα. Αυτός ο εμπειρικός τύπος που πήρε το όνομα αυτού που τον ανακάλυψε και χρησιμοποιείται ευρέως μέχρι και τις μέρες μας, ονομάστηκε κανόνας του Miner.

Αν καταπονηθεί ένα στοιχείο με πλάτος τάσης  $\sigma_1$ , τότε από την καμπύλη Wohler, που αναλύθηκε στο παραπάνω κεφάλαιο, προκύπτει ότι το στοιχείο θα αστοχήσει σε  $N_1$  κύκλους. Αν όμως το δοκίμιο καταπονηθεί σε κύκλους  $n_1 < N_1$  τότε έχει υπόλοιπο ζωής (έχει υπόλοιπο ζωής  $N_1 - n_1$ ). Αν όμως μετά τους κύκλους  $n_1$  αλλάξει η τάση σε  $\sigma_2$ , το στοιχείο μέχρι την αστοχία θα κάνει  $n_2$  κύκλους. Το ερώτημα όμως είναι πόσο είναι το  $n_2$ . Την απάντηση σε αυτό το ερώτημα δίνει ο κανόνας του Miner. Ο κανόνας του Miner έχει υπολογιστεί από τον ίδιο εμπειρικά και έχει προκύψει ο παρακάτω τύπος :

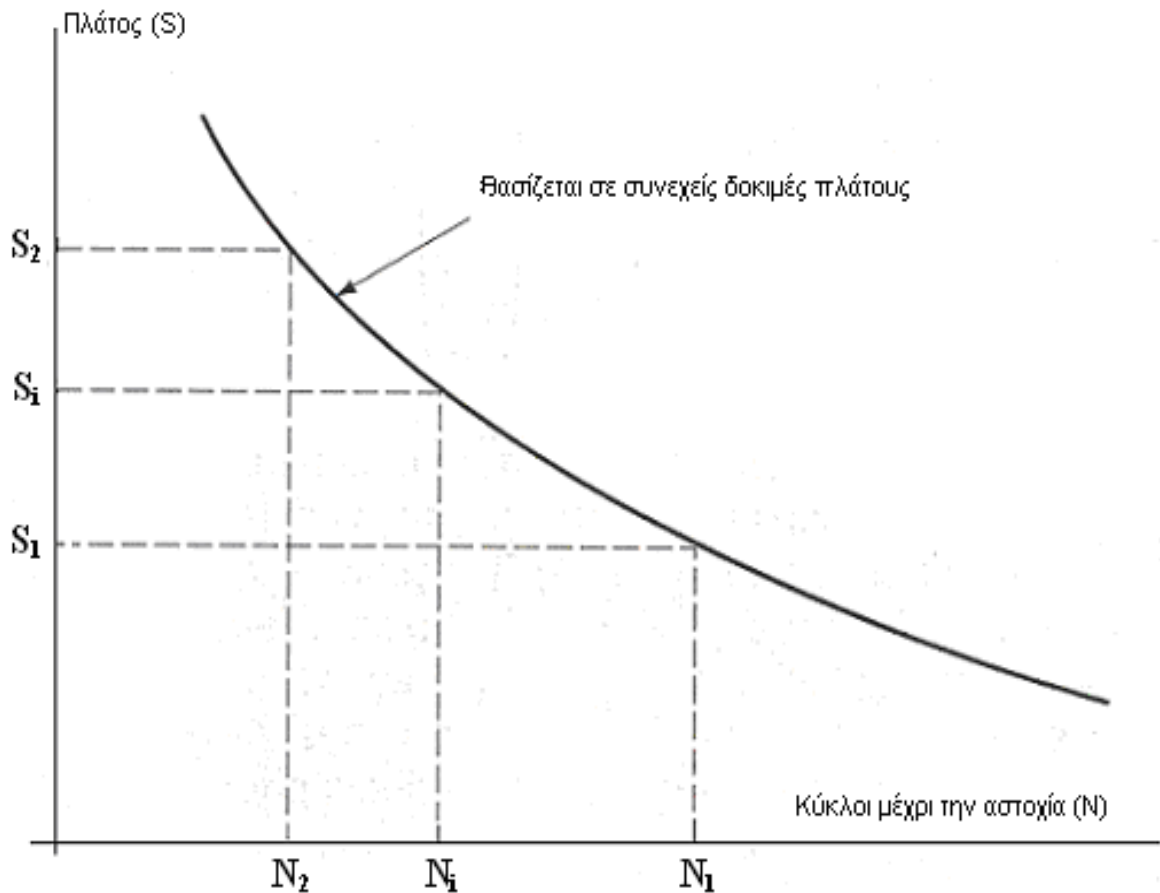
$$n_1 / N_1 + n_2 / N_2 = 1 \quad (2.1)$$

Στον παραπάνω τύπο το ζητούμενο το οποίο και πρέπει να υπολογίσουμε είναι το  $n_2$ . Όμως ο κανόνας του Miner είναι ένας κανόνας συσσώρευσης βλάβης κατά την διάρκεια της κόπωσης. Κάθε ένα κλάσμα αντιπροσωπεύει το ποσό της βλάβης για την αντίστοιχη τάση. Όταν γίνει

το άθροισμα ίσο με την μονάδα, τότε έχουμε αστοχία και στην γενική περίπτωση θα προκύψει ο παρακάτω τύπος :

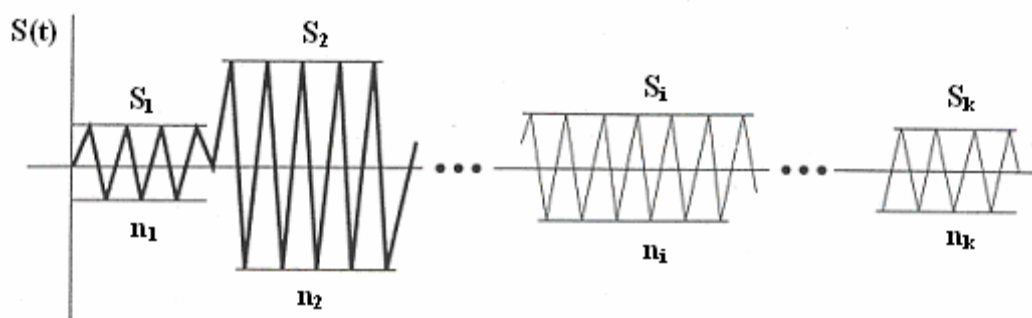
$$n_1 / N_1 + n_2 / N_2 + n_3 / N_3 + \dots + n_v / N_v = 1 \quad (2.2)$$

Τις περισσότερες φορές όμως ο κανόνας του Miner, στην πράξη, θα πρέπει να συνδυαστεί με την καμπύλη του Wohler, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1), για να προκύψει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα.



Σχ. 2.1 Η συνεχής καμπύλη πλάτους S-N (ή αλλιώς καμπύλη Wohler).

Βέβαια, το παραπάνω σχήμα που απεικονίζει την καμπύλη Wohler, είναι η γενική περίπτωση και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο για το κάθε υλικό. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε υλικό έχει τις δικές του τιμές σύμφωνα με το παραπάνω σχεδιάγραμμα.



Σχ. 2.2 Φάσμα των πλατών των κύκλων τάσης.

Η εκτίμηση ζωής μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση του κανόνα του Miner μαζί με μια διαδικασία καταμέτρησης κύκλων. Στόχος είναι να εκτιμηθεί ο αριθμός των κύκλων που μπορούν να εφαρμοσθούν πριν από την αστοχία. Αυτή η θεωρία μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας το διάγραμμα με την καμπύλη S-N.

Σε αυτό τον κανόνα, οι υποθέσεις μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- i) Η διαδικασία κόπωσης μπορεί να περιγραφεί από κύκλους τάσης και το φάσμα των πλατών των κύκλων τάσης αυτών μπορεί να οριστεί.
- ii) Η σταθερή καμπύλη πλάτους S-N είναι διαθέσιμη, και αυτή η καμπύλη είναι συμβατή με τον καθορισμό της κόπωσης.

Στο σχήμα 2.2, το φάσμα των πλατών των κύκλων τάσης περιγράφεται ως μια ακολουθία σταθερών τμημάτων πλάτους, όπου κάθε πλάτος έχει τάση πλάτους  $S_i$  και ο συνολικός αριθμός των

εφαρμοζόμενων κύκλων είναι  $n_i$ . Η συνεχής καμπύλη πλάτους S-N επίσης φαίνεται στο σχήμα 2.1.

Με τη χρήση των δεδομένων της καμπύλης S-N, ο αριθμός των κύκλων  $S_1$  βρίσκεται ως  $N_1$ , το οποίο θα προκαλούσε αποτυχία εάν δεν υπήρχε άλλος παράγοντας κόπωσης. Λειτουργία σε πλάτος τάσης  $S_1$  για έναν αριθμό κύκλων  $n_1$  μικρότερο από το  $N_1$  παράγει ένα μικρότερο μέρος των βλαβών που μπορεί να χαρακτηριστεί ως  $D_1$  το οποίο μας αναδεικνύει το ποσοστό των ζημιών που προκλήθηκαν στο υλικό.

Οι περιορισμοί του κανόνα Miner μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

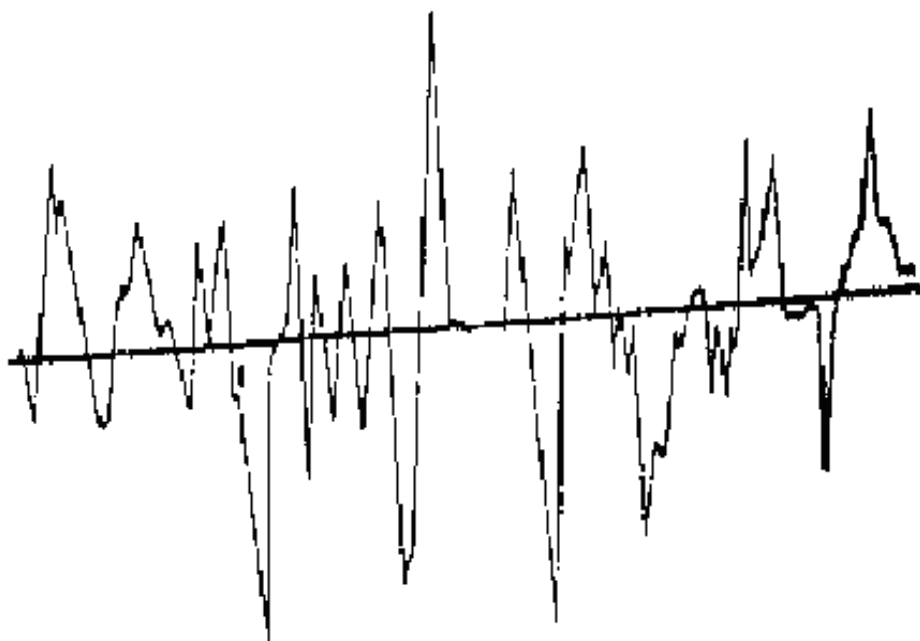
- i) Γραμμικός περιορισμός: Υποθέτει ότι όλοι οι κύκλοι ενός συγκεκριμένου μεγέθους κάνουν το ίδιο ποσοστό βλαβών, είτε πραγματοποιούνται νωρίς ή αργά στη ζωή.
- ii) Μη διαδραστικός περιορισμός (σειρά αποτελεσμάτων): Υποθέτει ότι η παρουσία του  $S_2$ , κλπ. δεν επηρεάζουν τις ζημιές που προκαλούνται από το  $S_1$ .
- iii) Περιορισμός ανεξαρτήτου τάσης: Υποθέτει ότι τον κανόνα που διέπει τη βλάβη που προκαλείται από το  $S_1$  είναι ο ίδιος με αυτόν που διέπει τη βλάβη που προκαλείται από το  $S_2$ . Οι υποθέσεις είναι γνωστό ότι είναι ελαττωματικές, ωστόσο, ο κανόνας του Miner είναι ακόμα που χρησιμοποιείται ευρέως στις εφαρμογές της κόπωσης προβλέψεων ζωής.

### 3. ΤΥΧΑΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής σε τυχαία ιστορικά φόρτισης, όπως μπορούμε να δούμε και στις παρακάτω εικόνες, ακολουθείται κατά κανόνα η παρακάτω διαδικασία που αποτελείται από τρία στάδια. Αυτά έχουν ως εξής :

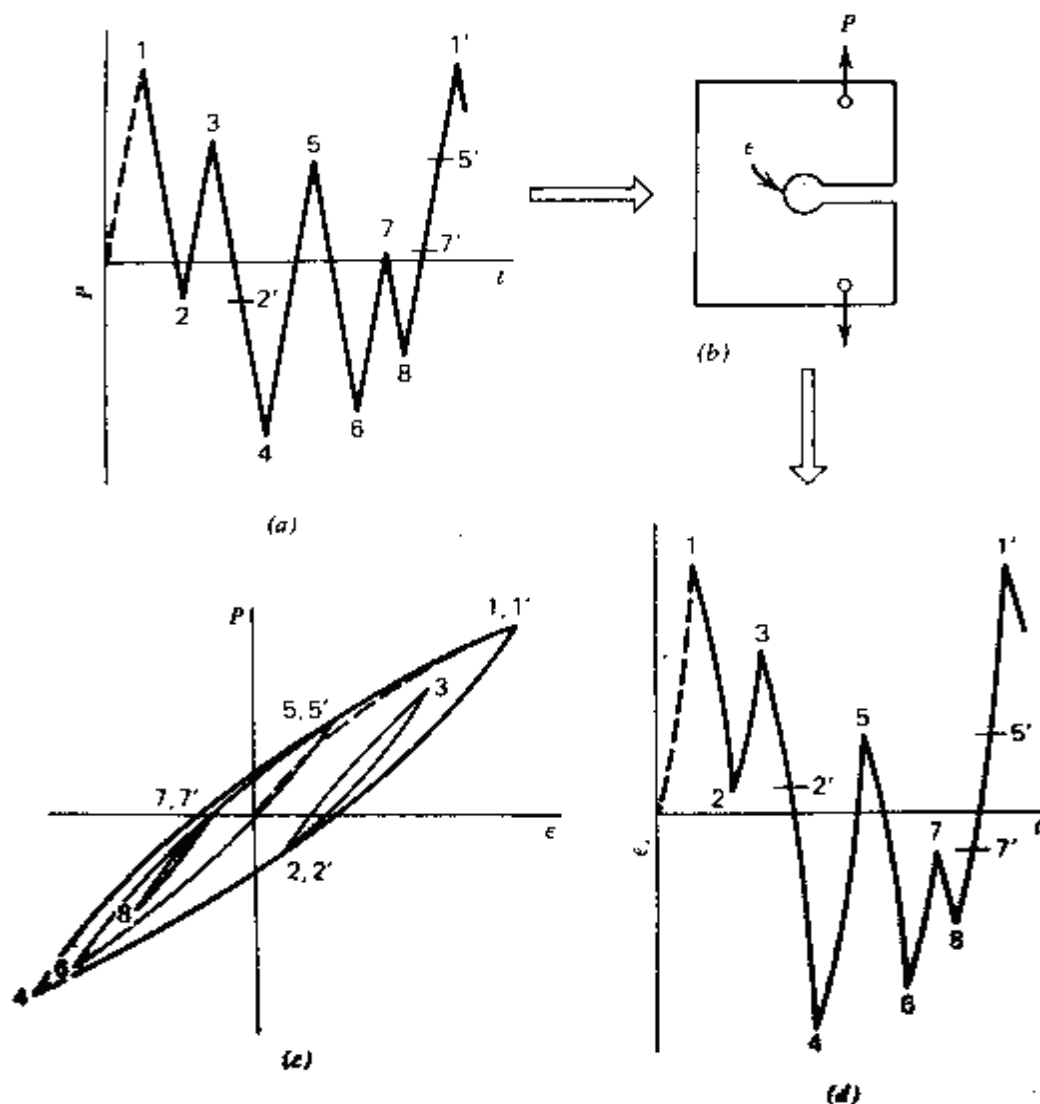
- I. Αναγωγή του τυχαίου ιστορικού καταπόνησης σε ένα σύνολο διακεκριμένων κύκλων,
- II. Αποτίμηση της βλάβης κάθε διακεκριμένου κύκλου με κάποιον κανόνα συσσώρευσης φθοράς,
- III. Πρόσθεση της βλάβης όλων των διακεκριμένων κύκλων.

Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι η επιτυχία του υπολογισμού της συσσώρευσης φθοράς για ένα τυχαίο ιστορικό φόρτισης (Σχήμα 3.1) εξαρτάται από το στάδιο I που βλέπουμε και παραπάνω δηλαδή την αναγωγή του τυχαίου ιστορικού καταπόνησης σε ένα σύνολο διακεκριμένων κύκλων.



Σχ. 3.1 Τυχαίο ιστορικό φόρτισης.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.2) μπορούμε να δούμε πως μπορεί να δημιουργηθεί ένα τυχαίο ιστορικό φόρτισης σύμφωνα πάντα και με τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο δοκίμιο και με την παραμόρφωση που υπόκειται το συγκεκριμένο δοκίμιο.

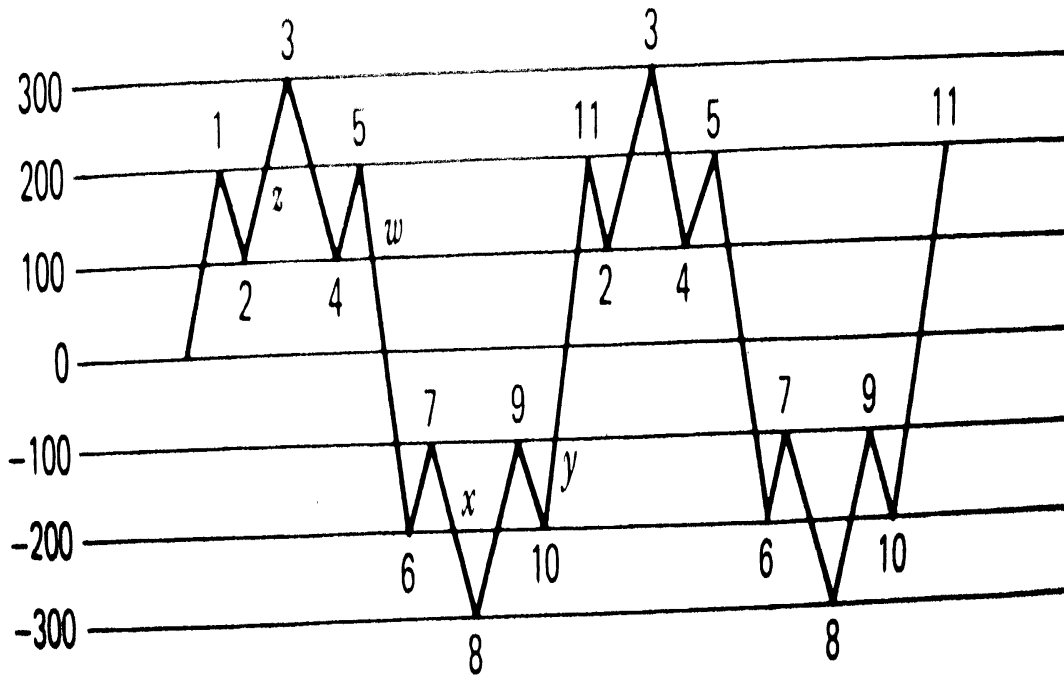


Σχ. 3.2 Δημιουργία ενός τυχαίου ιστορικού φόρτισης.

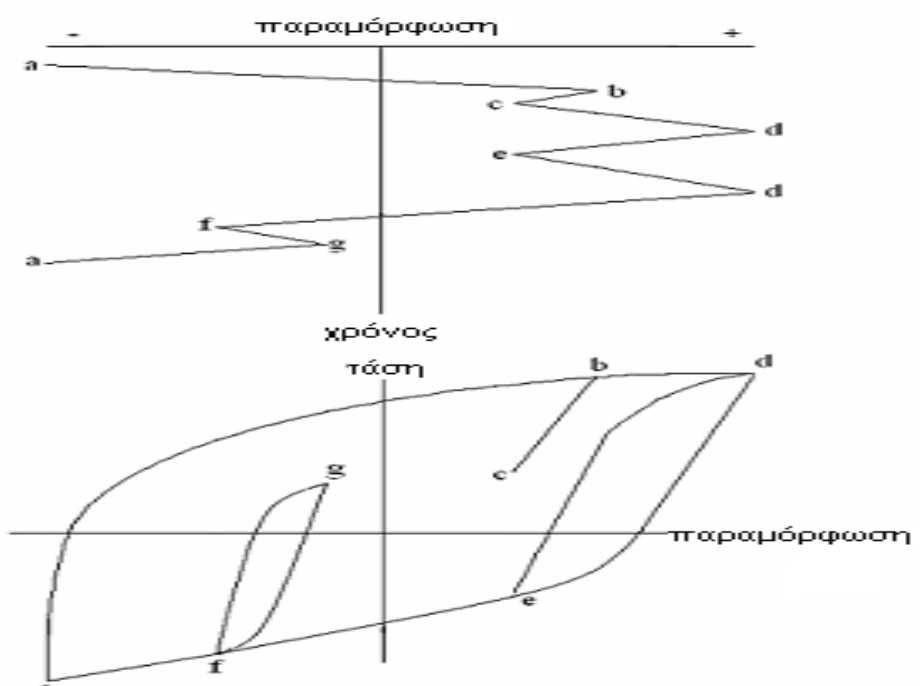
Παρακάτω θα δούμε κάποια σχήματα που απεικονίζουν κάποια παραδείγματα με τυχαία ιστορικά φόρτισης (Σχήματα 3.3-3.4). Σε αυτά τα παραδείγματα μπορούν να εφαρμοστούν διάφοροι μέθοδοι μέτρησης κύκλων ώστε να απλοποιηθούν σε απλά ιστορικά φόρτισης και να μπορεί



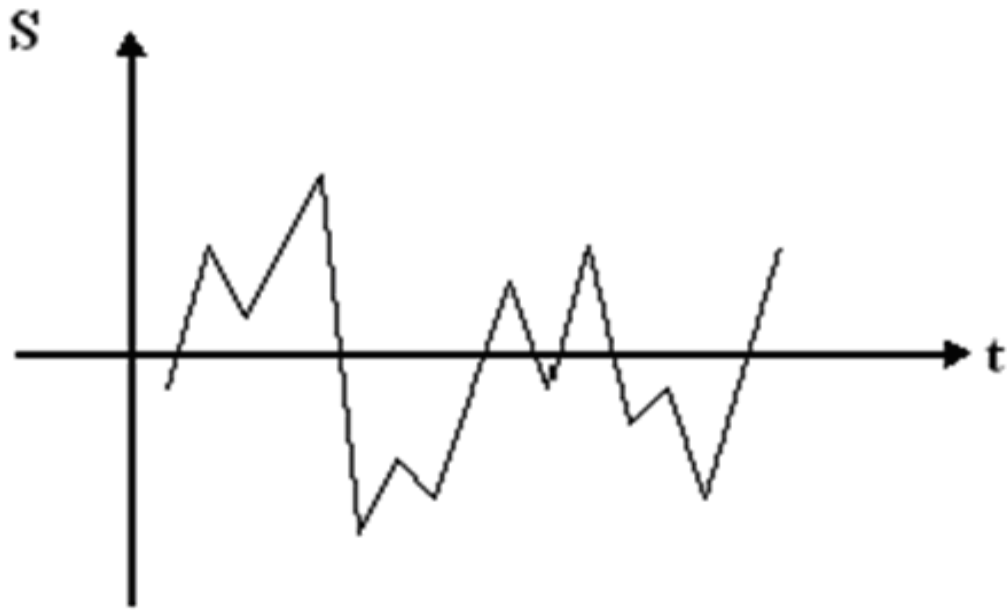
να εφαρμοστεί ο κανόνας του Miner όπως εμφανίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



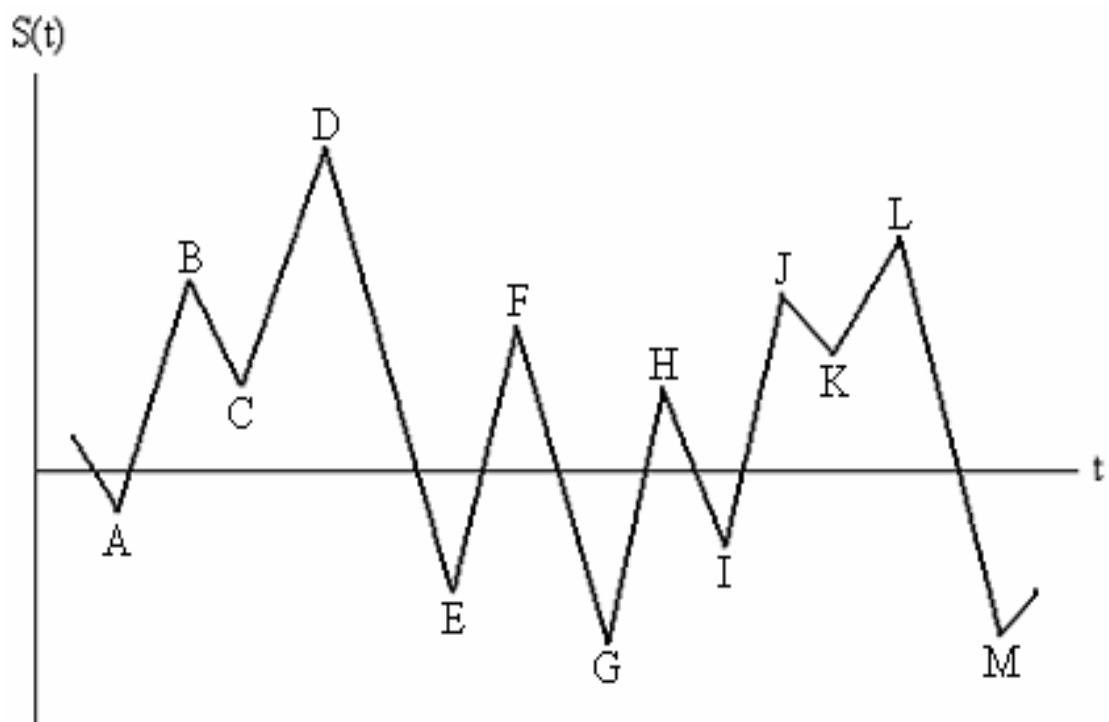
Σχ. 3.3 Τυχαίο ιστορικό φόρτισης.



Σχ. 3.4 Κύκλοι τάσης-παραμόρφωσης (Τυχαίο ιστορικό φόρτισης).



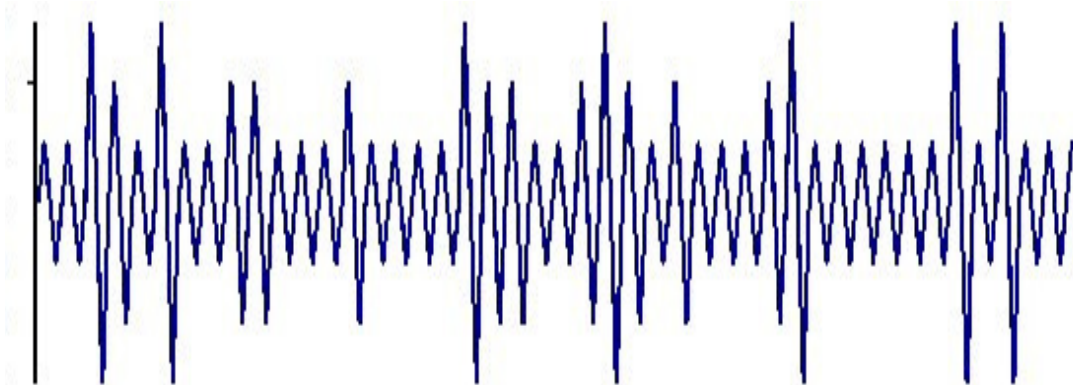
Σχ. 3.5 Τυχαία διακύμανση τάσης συναρτήσει του χρόνου.



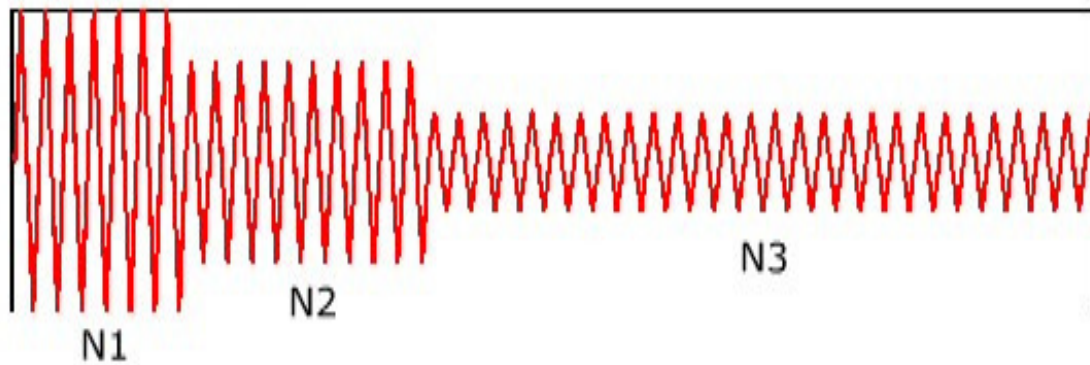
Σχ. 3.6 Τυχαίο ιστορικό φόρτισης (τάση συναρτήσει του χρόνου).

Οι περισσότερες δομές της πραγματικής ζωής ενός υλικού έχουν ιστορικά φόρτιση που σπάνια έχουν σταθερό πλάτος κύματος (Σχήμα 3.5). Προκειμένου να αναλυθούν οι πραγματικές δομές στο πλαίσιο αυτών των σύνθετων φορτίων, το φορτίο πρέπει να μειωθεί. Τα πολύπλοκα φορτία χωρίζονται σε τεμαχισμένα φορτία σταθερού πλάτους χρησιμοποιώντας μια διαδικασία που ονομάζεται «μέτρηση κύκλων». Οι περισσότερες δομές υφίστανται πολλούς κύκλους πριν από την αστοχία (Σχήμα 3.6).

Το μεταβλητό φάσμα του φορτίου του οποίου το πλάτος φαίνεται στο σχήμα 3.7 μπορεί να μειωθεί σε ένα φάσμα φορτίο αποτελούμενο από τεμαχισμένα φορτία σταθερού πλάτους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8. Η βλάβη που οφείλεται στα συσσωρευμένα αυτά τμήματα σταθερού εύρους, μπορεί να υπολογιστεί χωριστά και να αθροιστεί χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Miner όπου υπολογίζει τη συνολική συσσωρευμένη βλάβη της δομής του υλικού αυτού.



Σχ. 3.7 Μεταβλητή ένταση του φάσματος του φορτίου(τυχαίο ιστορικό φόρτισης).



Σχ. 3.8 Μειωμένο φάσμα φορτίου σε συνεχείς εκδηλώσεις πλάτους(ανάλυση του παραπάνω σχήματος 3.7 από τυχαίο ιστορικό φόρτισης σε απλό ιστορικό φόρτισης).

Τρία σημαντικά χαρακτηριστικά που πρέπει να εξεταστούν για την καταμέτρηση κύκλων είναι η διακύμανση του πλάτους τάσης και η ακολουθία των διακυμάνσεων του φορτίου (φορτίο αλληλουχίας). Οι κύκλοι καταμέτρησης από ένα τυχαίο ιστορικό φόρτισης (Σχήμα 3.9) μπορούν να ταξινομηθούν γενικότερα σε τρεις κατηγορίες οι οποίες διαφαίνονται παρακάτω και είναι :

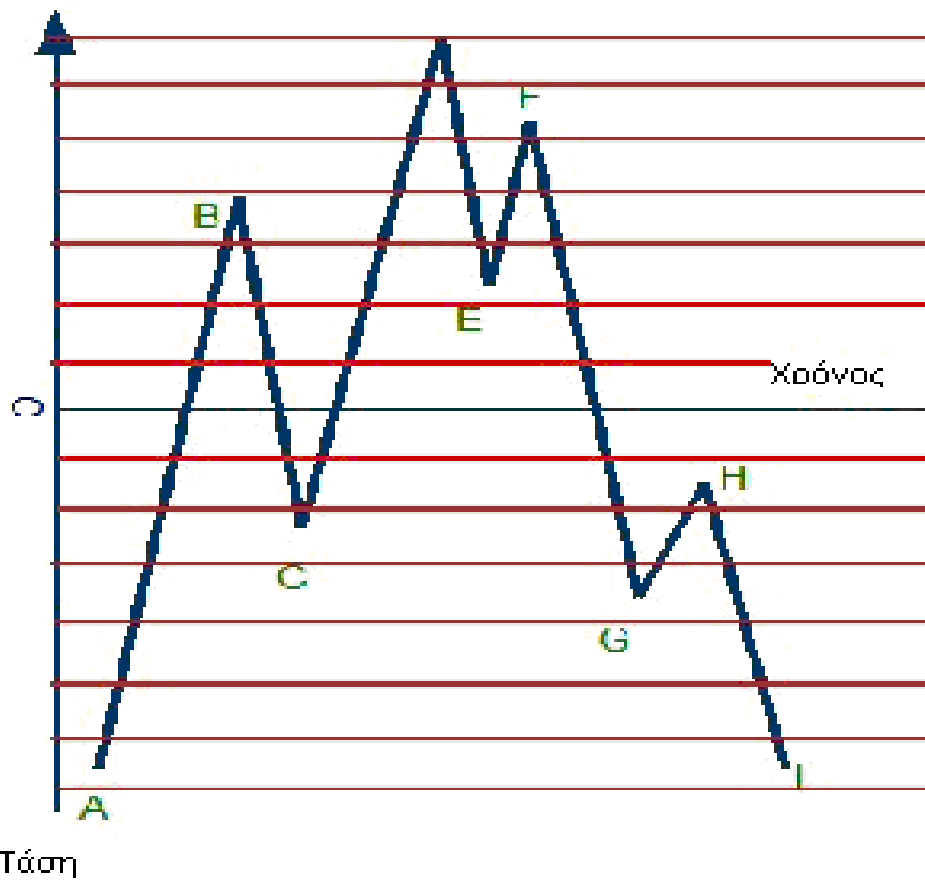
1. Παλαιότερες Μέθοδοι

- Επίπεδο καταμέτρησης,
- Μέγιστη καταμέτρηση,
- Εύρος Απλής / μέσης καταμέτρησης,

2. Καταμέτρηση της ροής της βροχής (Rainflow),

3. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF).

Παλαιότερες μέθοδοι όπως, ισόπεδων διαβάσεων και καταμέτρησης κορυφών χρησιμοποιούνταν πριν από την ανάπτυξη της καταμέτρησης αλγορίθμου rainflow. Μετά την ανάπτυξη της καταμέτρησης αλγορίθμου rainflow το 1968, έχει γίνει η πιο προτιμώμενη μέθοδος για τον υπολογισμό των κύκλων.



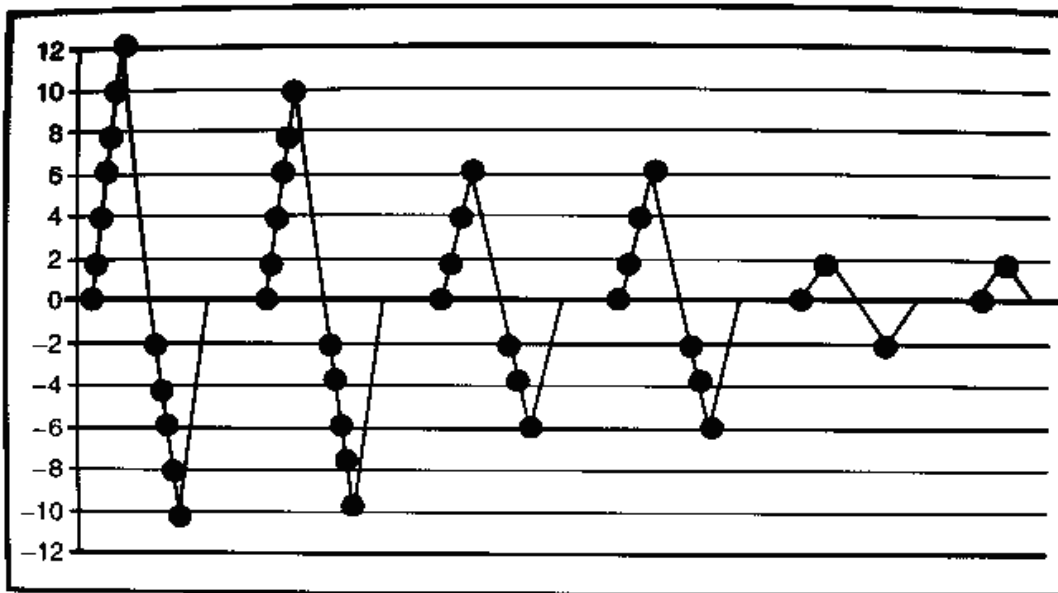
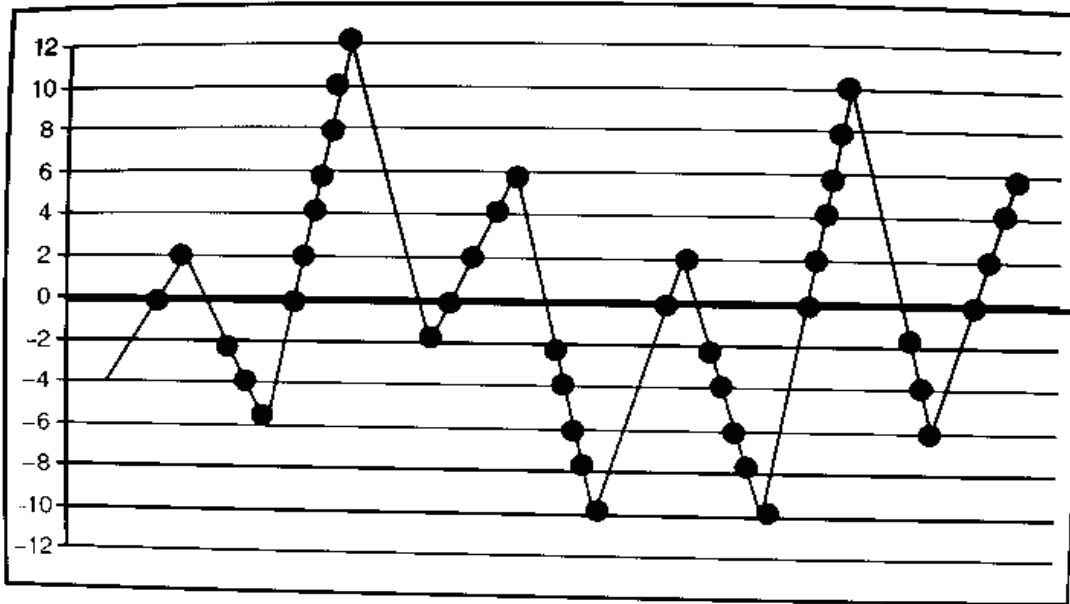
Σχ. 3.9 Τυχαίο ιστορικό φόρτισης.

## 4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΥΚΛΩΝ

Η μέτρηση των κύκλων είναι το πρώτο στάδιο επεξεργασίας που πρέπει να υποστεί μία χρονοσειρά φορτίσεων έτσι ώστε να αναλυθεί σε ένα σύνολο διαφόρων κύκλων φορτίου σταθερού εύρους, μια και ο βασικός χαρακτηρισμός οποιουδήποτε υλικού σε κόπωση πραγματοποιείται με βάση φορτία σταθερού πλάτους. Για τον υπολογισμό της βλάβης που προκαλούν στο υλικό πλήρεις κύκλοι φόρτισης, έχουν αναπτυχθεί ικανοποιητικοί κανόνες συσσώρευσης βλάβης, ένας εκ των οποίων είναι ο κανόνας του Miner. Ποικίλες μέθοδοι έχουν κατά καιρούς προταθεί για το σκοπό αυτό. Οι μέθοδοι αυτές ονομάζονται μετρητικές μέθοδοι (counting methods). Κάποιες χαρακτηριστικές μέθοδοι παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια:

### 1. Μέτρηση Διέλευσης Βαθμίδας (Level Crossing Counting).

Βάσει της μεθόδου αυτής ο άξονας των φορτίων διαιρείται σε έναν αριθμό προκαθορισμένων βαθμίδων τάσης και μια μέτρηση κύκλου καταγράφεται κάθε φορά που το φορτίο διέρχεται μία από αυτές. Όταν όλες οι διελεύσεις έχουν καταγραφεί, η μέτρηση των κύκλων πραγματοποιείται σχηματίζοντας πρώτα τον μεγαλύτερο δυνατό κύκλο φόρτισης, μετά τον δεύτερο μεγαλύτερο κ.λ.π., εωσότου να χρησιμοποιηθούν όλες οι διελεύσεις βαθμίδων. Με τον τρόπο αυτό, το κοπωτικό φάσμα μετασχηματίζεται σε μια σειρά κοπωτικών κύκλων φθίνοντος πλάτους (Σχήμα 4.1). Όταν αυτό το, πλέον συντηρητικό, σενάριο μέτρησης υλοποιηθεί, οι κύκλοι μπορούν να αναδιαταχτούν κατά οποιοδήποτε τρόπο δημιουργώντας έτσι δευτερογενείς επιδράσεις σειράς φόρτισης (load-sequence effects).



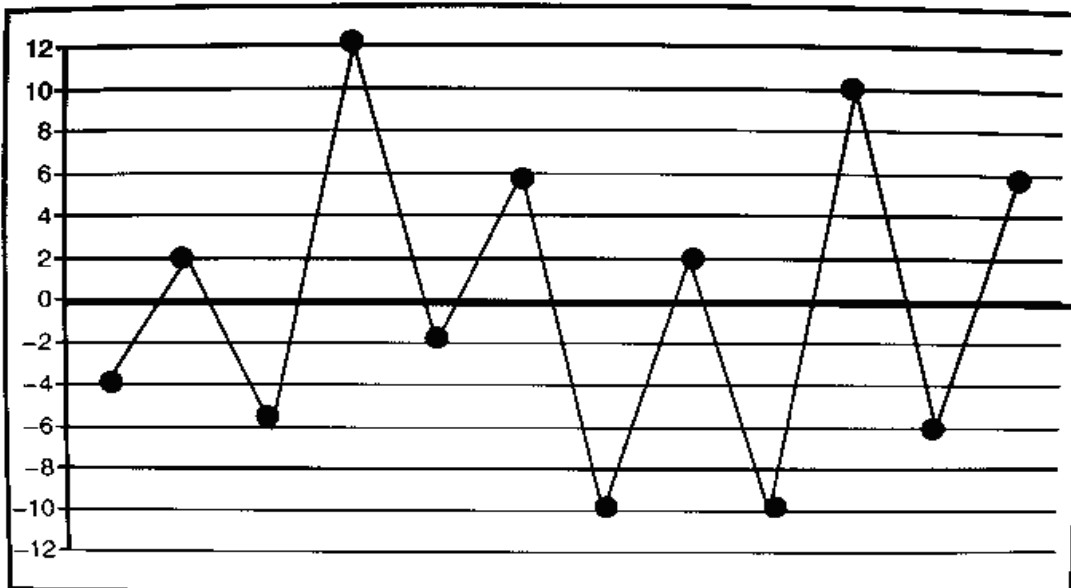
Σχ. 4.1 Μέτρηση διέλευσης βαθμίδας.

## 2. Μέτρηση Κορυφών (Peak Counting).

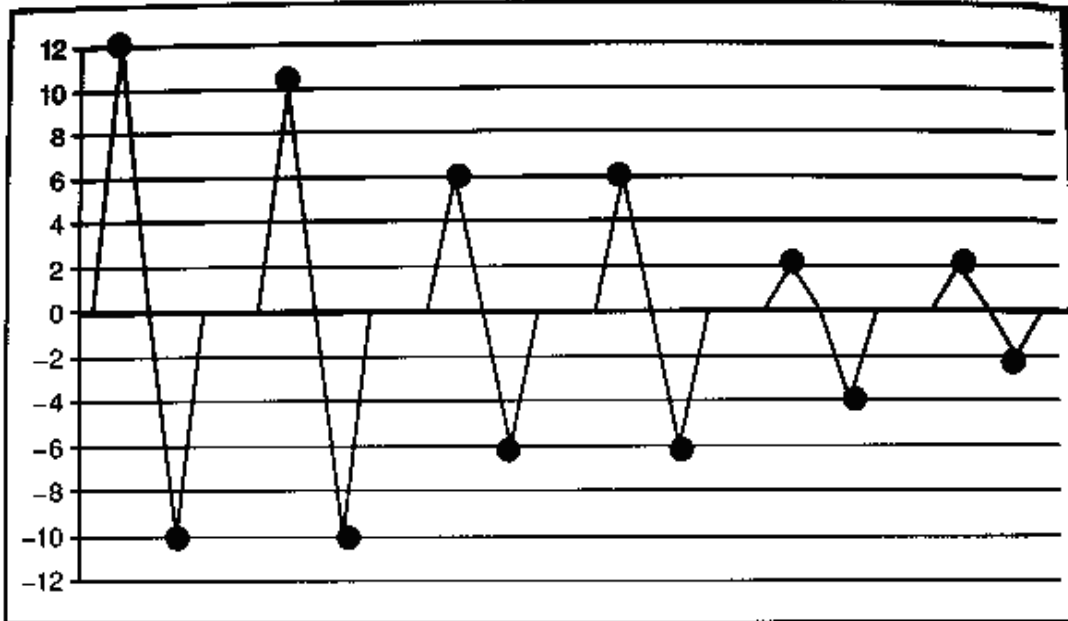
Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η μέθοδος αυτή επικεντρώνεται στον προσδιορισμό των κορυφών και των κοιλάδων του υπό εξέταση φάσματος. Όταν αυτός επιτευχθεί ο πρώτος κύκλος κατασκευάζεται με το συνδυασμό της υψηλότερης κορυφής και της βαθύτερης κοιλάδας, ο

δεύτερος με τη δεύτερη μεγαλύτερη κ.λ.π., μέχρι να εξαντληθούν όλα τα ακρότατα (Σχήμα 4.2).

Τόσο η μέθοδος της μέτρησης κορυφών όσο και η μέθοδος διέλευσης βαθμίδας, καταλήγουν στα πλέον επιβαρυντικά για το υλικό σενάρια, μια και βασίζονται στο σχηματισμό των μέγιστων δυνατών κύκλων που μπορούν να σχηματιστούν από ένα συγκεκριμένο κοπωτικό φάσμα. Εκτός αυτού, αγνοούν παντελώς την πραγματική σειρά επιβολής των φορτίων με συνέπεια οι όποιες επιδράσεις σειράς φόρτισης, οι οποίες ανάλογα και με τη μορφή του φάσματος μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο και να μη μπορούν να ληφθούν υπόψη.



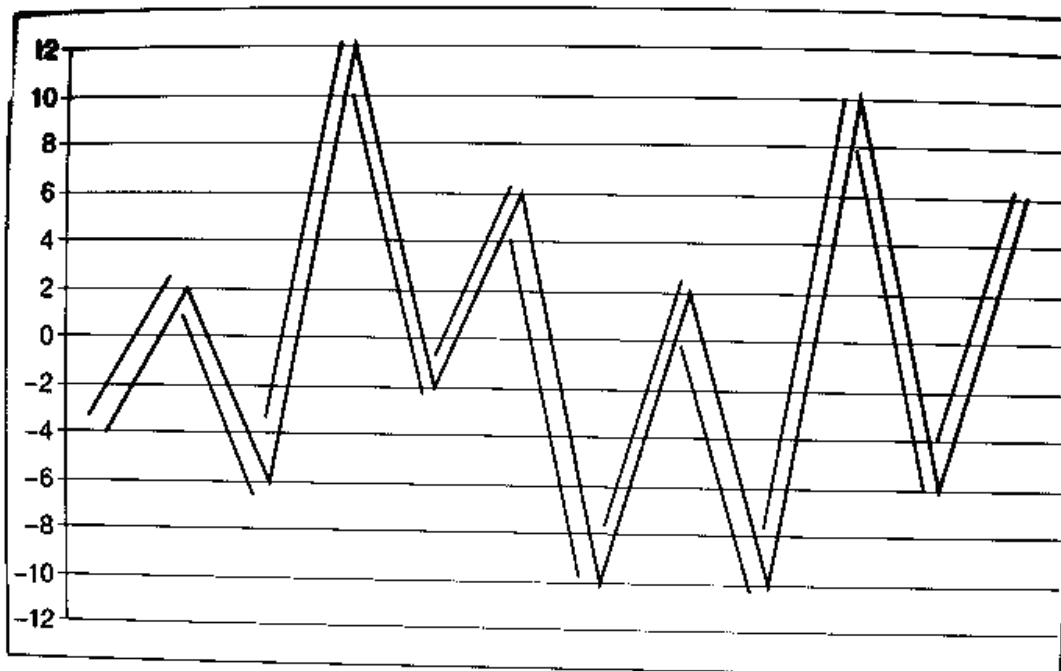




Σχ. 4.2 Μέτρηση κορυφών.

### 3. Απλή Μέτρηση Εύρους (Simple Range Counting).

Αυτή η απλούστατη μέθοδος μέτρησης θεωρεί το κάθε εύρος του φάσματος, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών αναστροφών του φορτίου, σαν ένα μισό κύκλο. Αν και με τον τρόπο αυτό η σειρά των γεγονότων φόρτισης διατηρείται, οι μεγαλύτεροι κύκλοι, που έχουν και τις σημαντικότερες επιπτώσεις κατά την κόπωση, μπορεί να μην καταμετρηθούν αν εμπεριέχουν μικρότερες διακυμάνσεις του φορτίου, οδηγώντας έτσι στη διαίρεση τους σε δύο ή περισσότερους μικρότερους ημι- κύκλους.



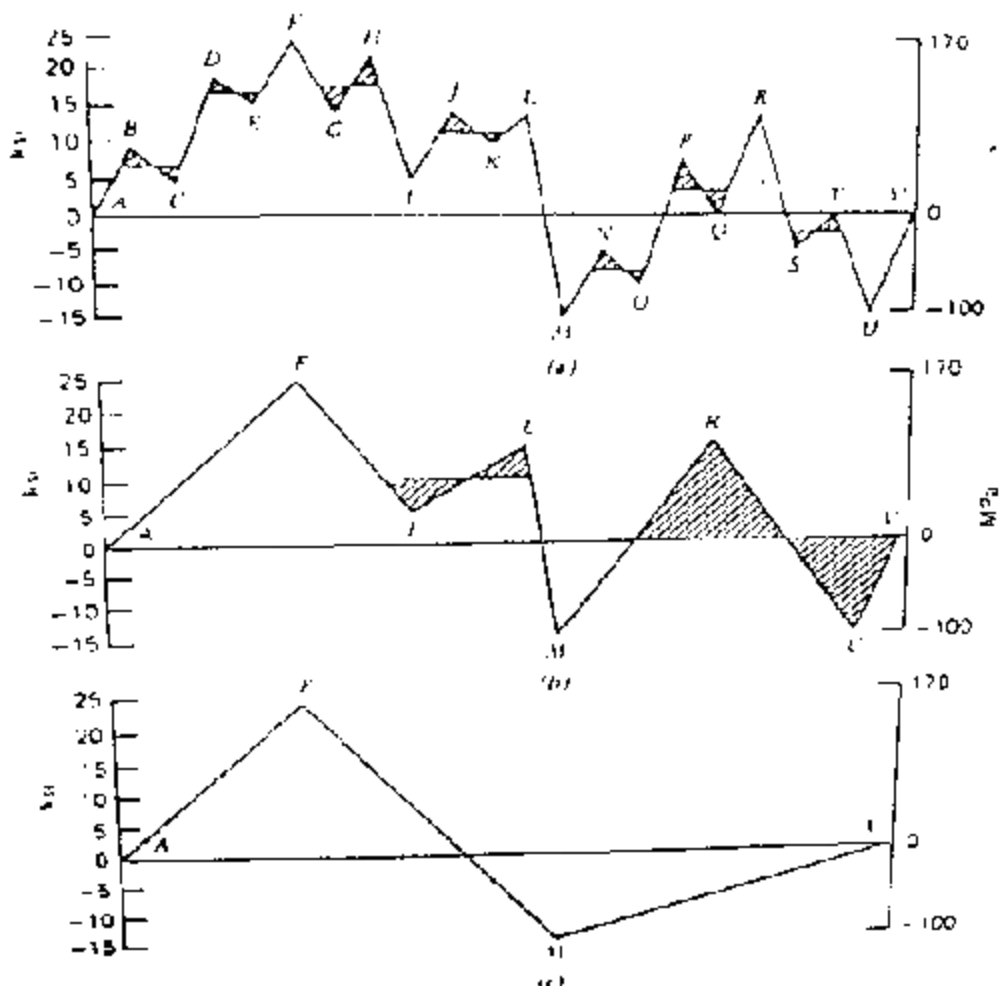
Σχ. 4.3 Απλή μέτρηση εύρους.

#### 4. Μέθοδος Των Ζευγών Εύρους (Range – Pair Method).

Στο σχήμα 4.4 παριστάνεται ένα ιστορικό φόρτισης. Στο ιστορικό αυτό οι κορυφές συμβολίζονται με τα γράμματα Α, Β,.....,Υ. Η περιγραφή της μεθόδου range – pair θα γίνει αναφορικά με το συγκεκριμένο ιστορικό του σχήματος 4.4, αλλά η διαδικασία αυτή μπορεί να γενικευτεί για οποιοδήποτε ιστορικό.

Αρχικά, καταμετρούνται οι πιο μικροί κύκλοι που μπορούν να εμφανιστούν. Μεταξύ των σημείων Β και C προσδιορίζεται το σημείο που αντιστοιχεί σε τάση  $(\sigma_B + \sigma_C) / 2$ . Από το σημείο αυτό χαράζεται οριζόντια γραμμή και έτσι σχηματίζονται γραμμοσκιασμένα τρίγωνα που φαίνονται στο σχήμα. Από το σχήμα γίνεται φανερό ότι με τον τρόπο αυτό ξεχωρίστηκε από το ιστορικό ένας κύκλος με μέγιστη τάση  $\sigma_{max} = \sigma_B$ , και ελάχιστη τάση  $\sigma_{min} = \sigma_C$  και μέση τάση  $\sigma_m = (\sigma_B + \sigma_C) / 2$ . Με ακριβώς ανάλογο τρόπο ξεχωρίζονται άλλοι έξι κύκλοι με μέγιστες και

ελάχιστες τάσεις που αντιστοιχούν στα σημεία D-E, H-G, J-K, N-O, P-Q, T-S.



Σχ. 4.4 Προσδιορισμός των κύκλων φόρτισης από ένα σύνθετο ιστορικό, με την μέθοδο των Ζευγών Εύρους (*Range – Pair Method*).

Αυτό ήταν το πρώτο στάδιο της συλλογής κύκλων από το σύνθετο ιστορικό φόρτισης. Με απομάκρυνση των παραπάνω κύκλων που συλλέχτηκαν απομένει το ιστορικό φόρτισης που φαίνεται στο σχήμα 4.4 (b) και ορίζεται από τις κορυφές A, F, I, L, M, R, U, V.

Με ακριβώς όμοια διαδικασία με αυτή του πρώτου σταδίου ξεχωρίζονται άλλοι δύο πλήρεις κύκλοι μεταξύ των σημείων L – I και

R – U. Μετά από το δεύτερο αυτό στάδιο το ιστόγραμμα φόρτισης απλοποιείται σε αυτό που ορίζεται από τις κορυφές A, F, M, V, (σχήμα 4.4 (c)) στο οποίο διακρίνονται δύο κύκλοι. Ο ένας κύκλος έχει μέγιστη τάση  $\sigma_F$  και μέση τάση  $\sigma_F / 2$  ενώ ο άλλος έχει μέγιστη τάση  $\sigma_M$  και μέση τάση  $\sigma_M / 2$ . Τελικά με την διαδικασία που περιγράφηκε συνετέθησαν οι κύκλοι που φαίνονται στον επόμενο πίνακα (Σχήμα 4.2).

*ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 Πίνακας που απεικονίζει τα  $\sigma_{min}$  και  $\sigma_{max}$  συναρτήσει των σταδίων συλλογής.*

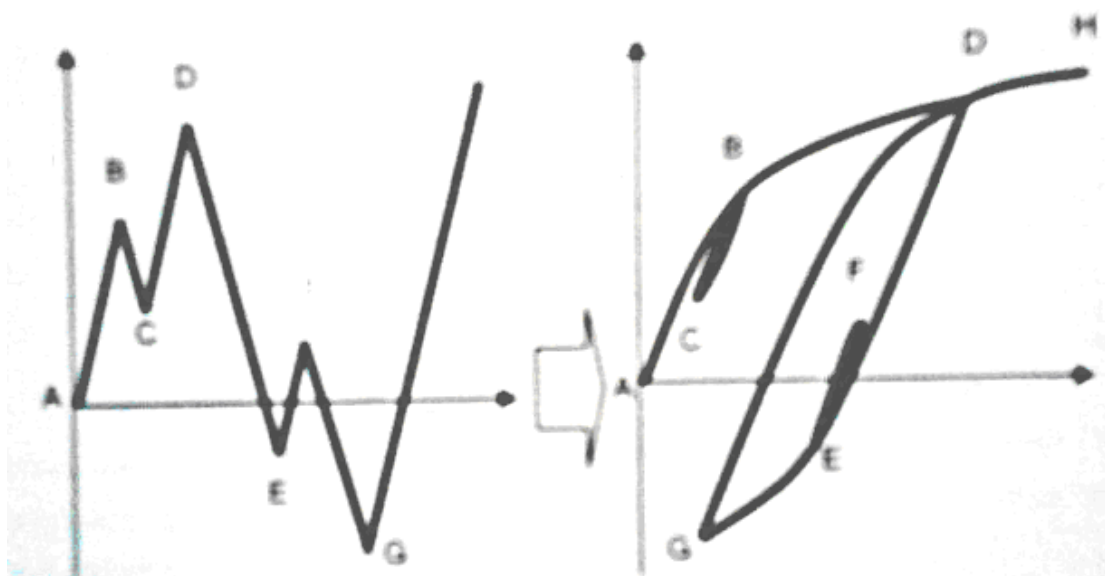
A/A	ΣΤΑΔΙΟ ΣΥΛΛΟΓΗΣ I							ΣΤΑΔΙΟ II		ΣΤΑΔΙΟ III	
$\sigma_{max}$	$\sigma_B$	$\sigma_D$	$\sigma_H$	$\sigma_J$	$\sigma_N$	$\sigma_P$	$\sigma_T$	$\sigma_L$	$\sigma_R$	$\sigma_F$	$\sigma_V$
$\sigma_{min}$	$\sigma_C$	$\sigma_E$	$\sigma_G$	$\sigma_K$	$\sigma_O$	$\sigma_Q$	$\sigma_S$	$\sigma_I$	$\sigma_U$	$\sigma_A$	$\sigma_M$

### 5. Μέτρηση Ροής Της Βροχής (Rainflow Counting).

Αυτή η μέθοδος είναι η πιο δημοφιλής από όλες τις προηγούμενες μεθόδους και αναλύεται εκτενέστερα στο παρακάτω κεφάλαιο της εργασίας.

## 5. ΜΕΘΟΔΟΣ RAINFLOW

Η ονομασία αυτή αντιπροσωπεύει μια ολόκληρη οικογένεια μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν από τη δεκαετία του 1960 σε μια προσπάθεια να αναλυθούν τα κοπωτικά φάσματα σε κύκλους φόρτισης με τον ακριβέστερο δυνατό τρόπο, δηλαδή βάσει των τάσεων και παραμορφώσεων (βρόχων υστέρησης) που αναπτύσσονται στο υλικό κατά την κόπωση.

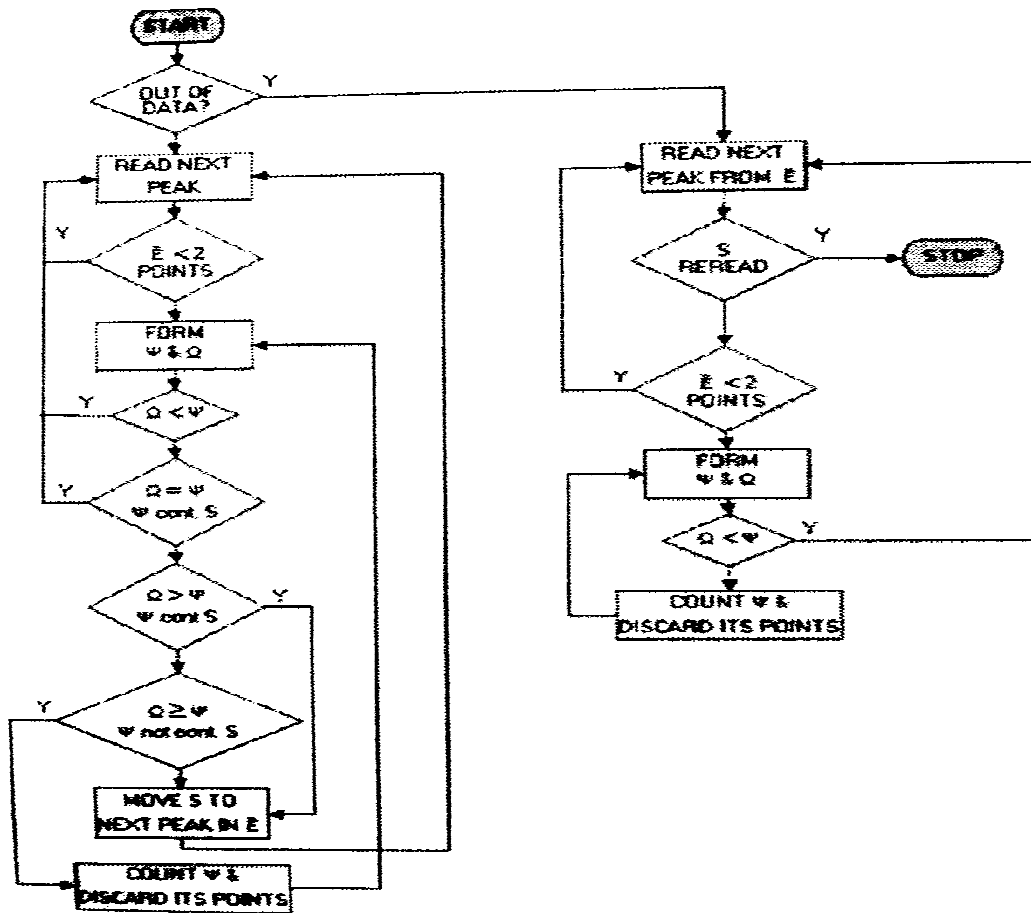


Σχ. 5.1 Χρονοσειρά φόρτισης και αντίστοιχο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Διακρίνονται οι κύκλοι υστέρησης (BC, EF και DG) που μετρούνται από τον αλγόριθμο της ροής της βροχής (rainflow).

Μια σχηματική αναπαράσταση του πως μπορεί ο αλγόριθμος ροής της βροχής να αναλύσει ένα φάσμα σε κύκλους δίνεται στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 5.1), στο οποίο ένα ενδεικτικό τμήμα της χρονοσειράς (αριστερά) μετατρέπεται σε καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης στο δεξί τμήμα της εικόνας. Το αποτέλεσμα περιλαμβάνει τρεις κύκλους (BC, EF

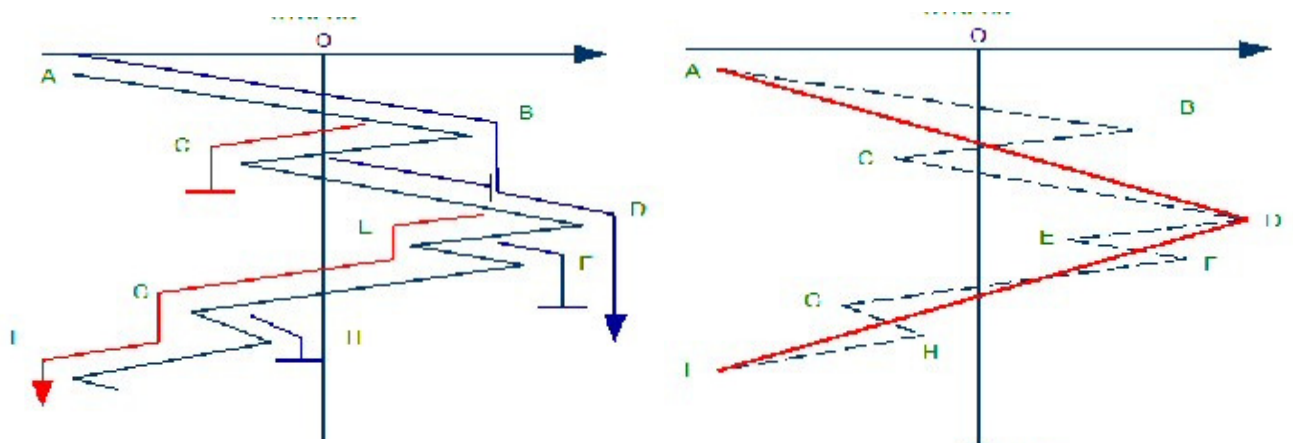
και GH) ενώ το τμήμα AH, που απομένει μετά την απομάκρυνση όλων των σημείων των κύκλων που καταμετρήθηκαν, αποκαλείται υπόλοιπο (residual).

Παρά το γεγονός ότι ο αλγόριθμος ροής της βροχής αποδίδει με ακρίβεια τους κοπωτικούς κύκλους που είναι ισοδύναμοι του φάσματος, αναπόφευκτα αναδιατάσσει τη σειρά επιβολής των φορτίων ενώ παράλληλα όλο το φάσμα πρέπει να υποστεί επεξεργασία πριν εισαχθεί στον οποιαδήποτε αλγόριθμο υπολογισμού ζωής. Αν και το πρώτο είναι αναπόφευκτο, μπορεί εν μέρει να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση του κατάλληλου αλγορίθμου, όπως π.χ. του 'Algorithm II' που προτείνεται από τους Downing και Soccie (Σχήμα 5.2), ο οποίος μετατρέπει τη χρονοσειρά σε κύκλους χωρίς να ομαδοποιεί τους κύκλους που προκύπτουν, καταγράφοντας τους βρόχους μόλις αυτοί ολοκληρωθούν, ενώ οι κορυφές που απομένουν ξαναπερνούν από τη διαδικασία, αφήνοντας στο τέλος έναν αριθμό ημι-κύκλων σαν υπόλοιπο. Ένα διάγραμμα ροής της συγκεκριμένης διαδικασίας δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο αλγόριθμος παρακολουθεί τα ακρότατα που δεν έχουν συμμετάσχει στο σχηματισμό κύκλου μέσω του διανύσματος E, στο οποίο καταγράφονται όλα τα σημεία που έχουν διαβαστεί και από το οποίο διαγράφονται όλα τα σημεία που έχουν συμπεριληφθεί σε κάποιο συμπληρωμένο κύκλο. Το  $\Omega$  συμβολίζει το εύρος που εξετάζεται τη συγκεκριμένη στιγμή ενώ το  $\Psi$  το αμέσως προηγούμενο. Το S είναι μια ετικέτα που τοποθετείται αρχικά στην αρχή του φάσματος και προωθείται σε επόμενα σημεία βάσει των απλών κανόνων που παρουσιάζονται.



Σχ. 5.2 Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου ροής της βροχής μονού περάσματος (Algorithm II) των Downing & Soccie.

Ο αλγόριθμος καταμέτρησης ροής της βροχής (γνωστός και ως «μέθοδος καταμέτρησης rainflow») χρησιμοποιείται για την ανάλυση δεδομένων κόπωσης προκειμένου να μειωθεί το φάσμα των τάσεων σε ένα σύνολο απλών αντίστροφων τάσεων. Η σημασία του είναι ότι επιτρέπει την εφαρμογή του κανόνα του Miner, προκειμένου να εκτιμηθεί η διάρκεια ζωής σε κόπωση μιας δομής που υπόκεινται σε σύνθετες φορτώσεις. Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε από τον Tatsuo Endo και τον M. Matsuisiki το 1968. Αν και υπάρχει μια σειρά από αλγόριθμους καταμέτρησης κύκλων για τέτοιου είδους εφαρμογές όπως αναφέρθηκαν και στο τέταρτο κεφάλαιο, η μέθοδος ροής της βροχής (Σχήμα 5.3) είναι η πιο δημοφιλής.

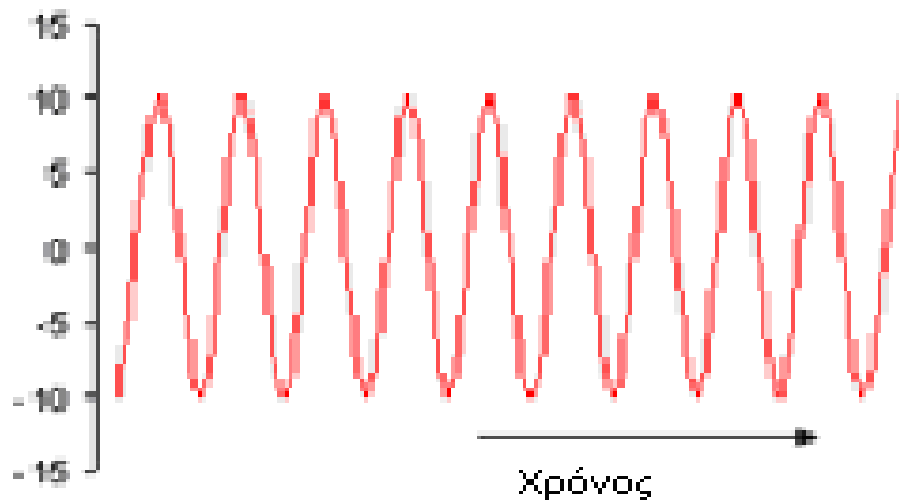


Σχ. 5.3 Μέθοδος ροής της βροχής (Rainflow).

Ο Downing και ο Soccie δημιούργησαν μία γενικότερη αναφορά για να χρησιμοποιηθεί σε αλγόριθμο καταμέτρησης κύκλων της ροής της βροχής το 1982, η οποία συμπεριλήφθηκε ως μία από τις πολλές μεθόδους καταμέτρησης κύκλων στην προδιαγραφή ASTM E 1049-85. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται από τα εθνικά εργαστήρια Sandia για την ανάλυση των στοιχείων κόπωσης των ανεμογεννητριών.

Ο Igor Rychlik έδωσε ένα μαθηματικό ορισμό για την μέθοδο καταμέτρησης της ροής της βροχής, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα υπολογισμών υπό μορφή κλειστού τύπου από τις στατιστικές ιδιότητες του φορτίου.

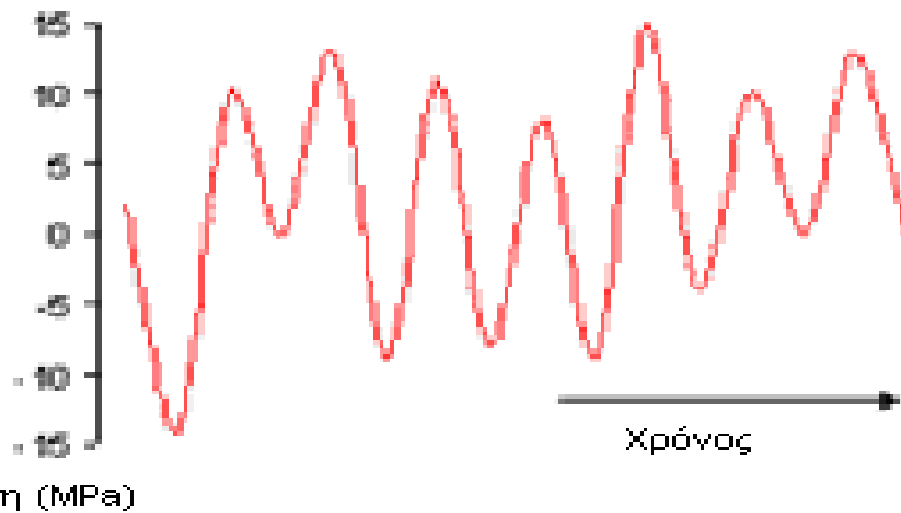




Τάση (MPa)

Σχ. 5.4 Ενιαία εναλλασσόμενη φόρτιση.

Για απλές περιοδικές φορτίσεις, όπως το σχήμα 5.4, η μέθοδος rainflow είναι περιττή. Η εν λόγω σειρά έχει σαφώς 10 κύκλους πλάτους 10 MPa και η δομή ζωής μπορεί να υπολογιστεί από μια απλή εφαρμογή της σχετικής καμπύλης S-N όπως ακριβώς έχει αναφερθεί και στα παραπάνω κεφάλαια. Εάν συγκρίνουμε αυτό με το σχήμα 5.5, θα δούμε ότι στο δεύτερο σχήμα δεν μπορεί να εκτιμηθεί η κόπωση που θα έχει το υλικό μετά από την συγκεκριμένη φόρτισή του γιατί σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν αντίστροφες τάσεις.



Σχ. 5.5 Φάσμα τυχαίας φόρτισης.

## Ο αλγόριθμος της Rainflow (διαδικασία εφαρμογής της Rainflow).

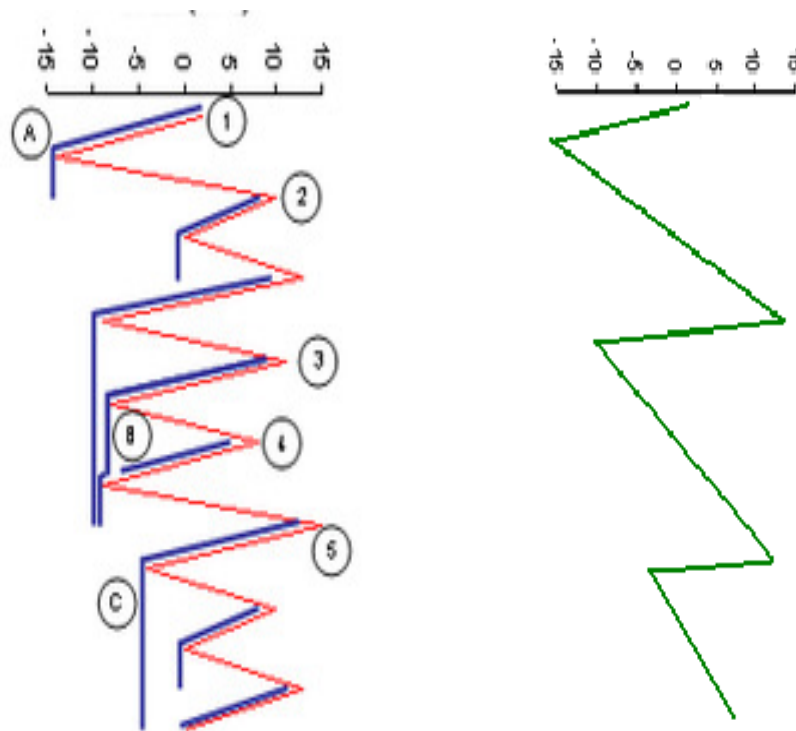
1. Μείωση του ιστορικού χρόνου σε μια αλληλουχία (εφελκυσμού) κορυφών και (θλιπτική) κοιλάδων,
2. Με την προϋπόθεση ότι το ιστορικό του χρόνου είναι ένα πρότυπο για ένα άκαμπτο φύλλο (οροφή παγόδας),
3. Γυρίζοντας το φύλλο προς τα δεξιά κατά 90 μοίρες (πρώτη φορά στην κορυφή),
4. Κάθε εφελκυστική κορυφή φαντάζεται ως πηγή του νερού που "στάζει" προς τα κάτω την παγόδα,
5. Μετρώντας τον αριθμό των κύκλων ψάχνοντας για τερματισμό κατά τη φορά της ροής που συμβαίνουν στην περίπτωση που:
  - α) Φτάνει το τέλος του ιστορικού,
  - β) Θα συγχωνεύεται με μια ροή που ξεκίνησε σε προγενέστερη εφελκυστική κορυφή, ή

γ) Ρέει απέναντι από εφελκυστική κορυφή της μεγαλύτερης εμβέλειας,

δ) Αντιστοιχίζοντας ένα μέγεθος για κάθε μισό κύκλο ίσο με τη διαφορά τάσης μεταξύ της έναρξης και λήξης του,

ε) Αντιστοιχίζοντας τους ημικύκλους της ταυτότητας του μεγέθους για να μετρήσει τον αριθμό των πλήρων κύκλων. Συνήθως, υπάρχουν κάποια υπολείμματα ενός δεύτερου κύκλου.

### Παράδειγμα του αλγόριθμου της Rainflow



Σχ. 5.6 Ανάλυση της ροής της βροχής για εφελκυστικές κορυφές.

- Το ιστορικό τάσης της εικόνας 5.5 μειώνεται σε κορυφώσεις και υφέσεις στο σχήμα 5.6,

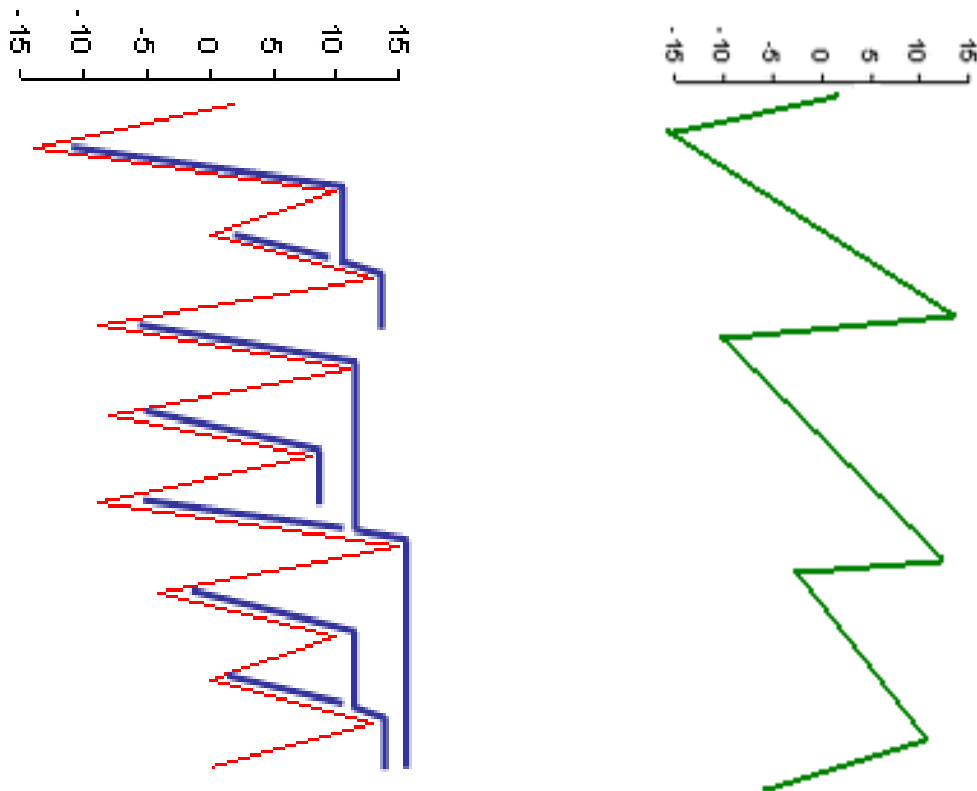
- Οι ημίκυκλοι (A) ξεκινούν σε εφελκυστική κορυφή (1) και τερματίζουν απέναντι από μια κορυφή μεγαλύτερη στον εφελκυσμό (2). Το μέγεθός της είναι 16 MPa,

- Οι ημίκυκλοι (B) ξεκινούν σε εφελκυστική κορυφή (4), και λήγουν όταν διακόπτεται από μια ροή από μια προηγούμενη κορυφή (3). Το μέγεθός της είναι 17 MPa,

- Οι ημίκυκλοι(C) ξεκινούν σε εφελκυστική κορυφή (5) και λήγουν στο τέλος της ιστορίας του χρόνου,

- Οι παρόμοιοι ημίκυκλοι που υπολογίζονται για θλιπτικές κοιλάδες (Σχήμα 5.7) και οι ημίκυκλοι, τότε ταιριάζουν μεταξύ τους.

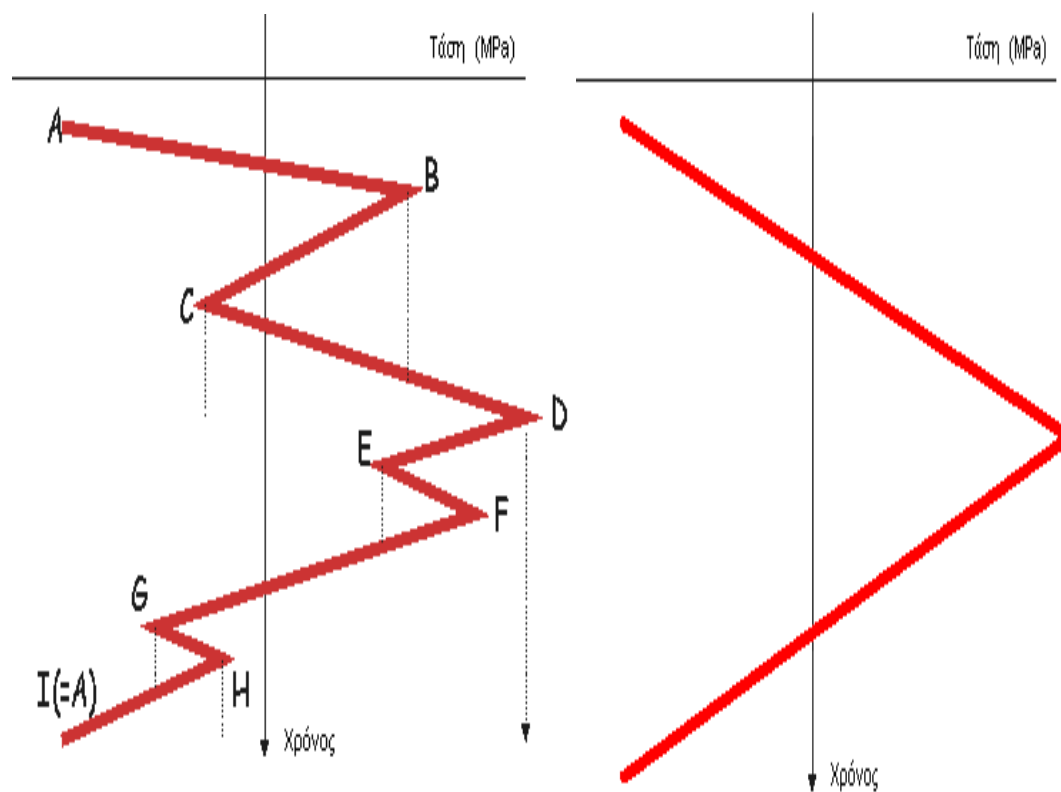
Τα αποτελέσματα του παραδείγματος για τις κοιλάδες απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα 5.1.



Σχ. 5.7 Ανάλυση της ροής της βροχής για θλιπτικές κοιλάδες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 Μετρήσεις (αποτελέσματα) από την ροή της βροχής που εφαρμόστηκε στο πιο πάνω παράδειγμα.

Τάση (MPa)	Ολόκληροι κύκλοι	Ημίκυκλοι
10	2	0
13	0	1
16	0	2
17	0	2
19	1	0
20	0	1
22	0	1
24	0	1
27	0	1



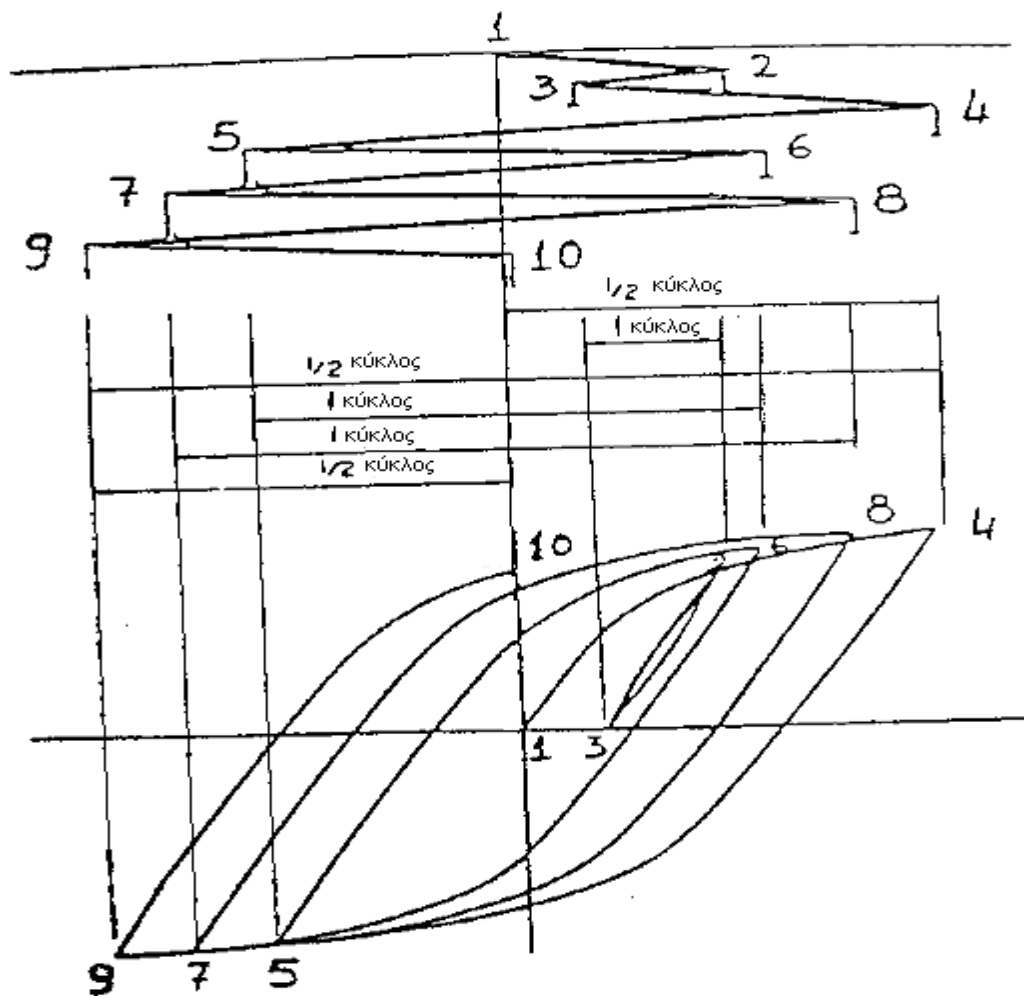
Σχ. 5.8 Μέθοδος ροής της βροχής.

Για να κατανοήσουμε αυτή την μέθοδο πιο εύκολα και καλύτερα θα την αναδείξουμε σύμφωνα και με το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.9). Σε αυτό το σχήμα παριστάνεται ένα τμήμα από ένα τυχαίο ιστορικό παραμόρφωσης – χρόνου. Το ιστορικό αυτό ορίζεται με κορυφές που είναι αριθμημένες με τους αριθμούς 1, 2, ....., 10. Με τη μέθοδο αυτή το ιστορικό ανάγεται στους κύκλους φόρτισης που αντιστοιχούν στους βρόχους υστέρησης τάσης – παραμόρφωσης που φαίνονται στο ίδιο σχήμα. Αυτό στηρίζεται στη θεώρηση ότι κάθε κλειστός βρόγχος υστέρησης αποτελεί ένα πλήρες γεγονός βλάβης (Damage event).

Με την μέθοδο ροής της βροχής (Σχήμα 5.8) η αναγωγή του σύνθετου ιστορικού καταπόνησης σε πλήρεις κύκλους γίνεται με βάση την παρακάτω διαδικασία.

I. Αρχικά προσδιορίζονται ημικύκλοι φόρτισης. Οι κύκλοι φόρτισης που αναζητούνται συνθέτονται από ημικύκλους με την ίδια μέγιστη και ελάχιστη τάση ή παραμόρφωση, που ο ένας συμπληρώνει τον άλλο για τη δημιουργία πλήρους κύκλου.

II. Κάθε ημικύκλος προσδιορίζεται από την τροχιά μιας σταγόνας βροχής που κυλάει πάνω στις αναστροφές, αν περιστραφεί το ιστορικό κατά 90 μοίρες.



Σχ. 5.9 Προσδιορισμός των κύκλων φόρτισης από ένα τυχαίο ιστορικό, με την μέθοδο της ροής της βροχής (Rainflow method).

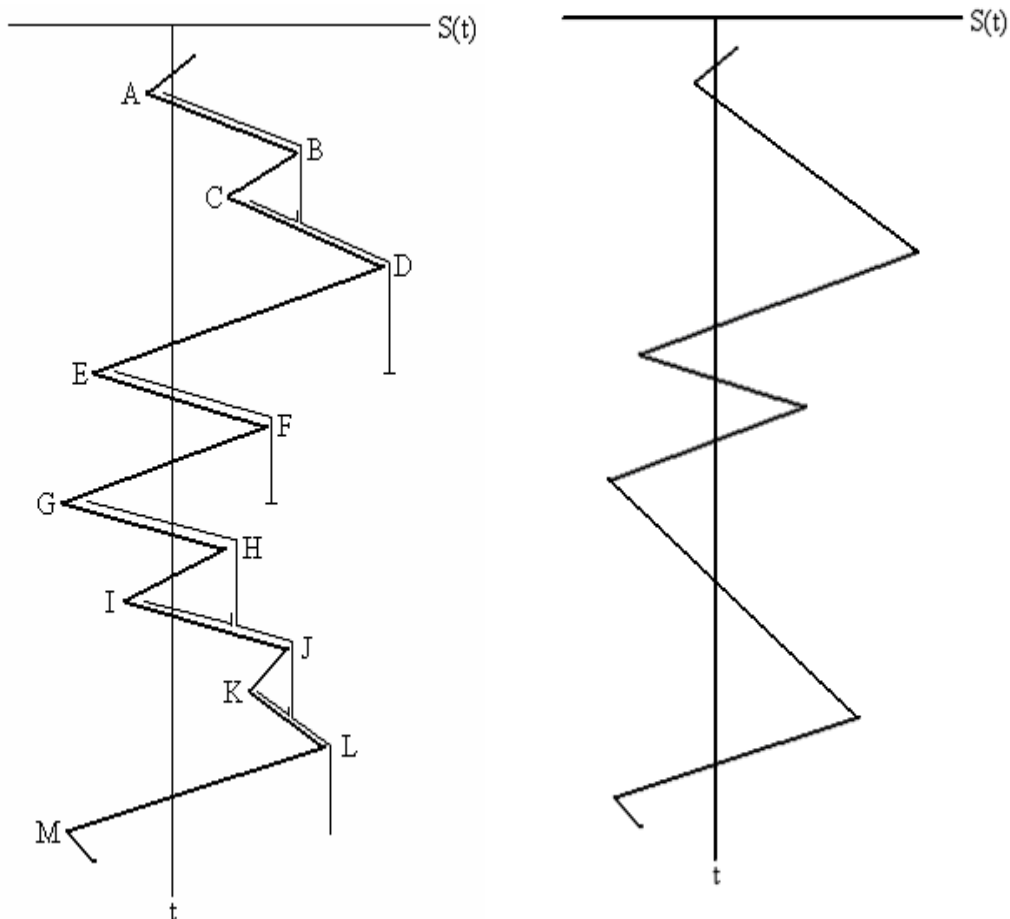
Ο σχηματισμός των τροχιών αυτών γίνεται με τους παρακάτω κανόνες :

α) Η ροή μιας σταγόνας που κυλάει δεξιά και κάτω, σταματάει όταν φτάσει σε μια αναστροφή που το σημείο έναρξής της είναι πιο αρνητικό από το αρχικό σημείο έναρξης της καινούριας σταγόνας,

β) Η ροή μιας σταγόνας που κυλάει αριστερά και κάτω, σταματάει όταν φτάσει σε μια αναστροφή που το σημείο έναρξής της είναι πιο θετικό από το αρχικό σημείο έναρξης της σταγόνας,

γ) Η ροή μιας σταγόνας σταματάει όταν συναντήσει την τροχιά μιας προηγούμενης σταγόνας.

Με βάση την παραπάνω διαδικασία, για το ιστορικό φόρτισης του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 5.9), συλλέγουμε ένα σύνολο τριών κύκλων και ένα σύνολο τριών ημικύκλων. Οι κύκλοι που συλλέγονται είναι οι 2-3-2, 6-5-6, 8-7-8 και οι ημικύκλοι είναι οι 1-4, 4-9, 9-10.



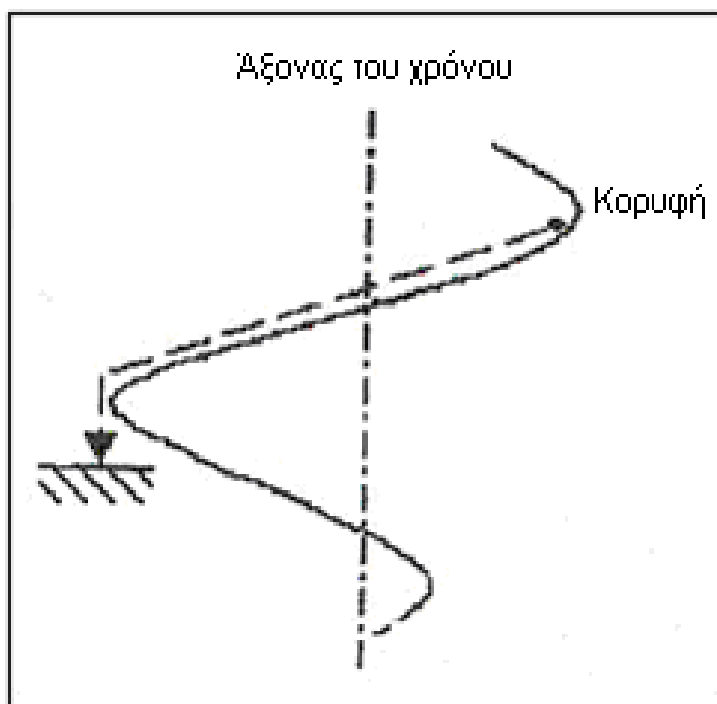
Σχ. 5.10 Μέθοδος ροής της βροχής ξεκινώντας από κοιλάδες (Rainflow).

Η καταμέτρηση των κορυφών καθιστά δυνατό να αποτελέσει ένα ιστόγραμμα των κορυφών της τυχαίας τάσης το οποίο μπορεί στη



συνέχεια να μετατραπεί σε ένα φάσμα τάσης δίνοντας τον αριθμό των εκδηλώσεων για την κατώτερη από μια δεδομένη αξία τάσης. Το φάσμα τάσης αποτελεί, συνεπώς, εκπροσώπηση της στατιστικής κατανομής των χαρακτηριστικών πλατών της τυχαίας τάσης ως συνάρτηση του χρόνου.

Η προέλευση της ονομασίας της μεθόδου καταμέτρησης ροής της βροχής (Σχήμα 5.10) που ονομάζεται και «Μέθοδος Στέγης Παγόδας» μπορεί να εξηγηθεί ως ο άξονας του χρόνου που είναι κάθετος με αυτόν της τυχαίας τάσης ( $S(t)$ ) και αντιπροσωπεύει μια σειρά από στέγες στις οποίες το νερό πέφτει. Οι κανόνες της ροής μπορούν να εμφανιστούν όπως στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.11).



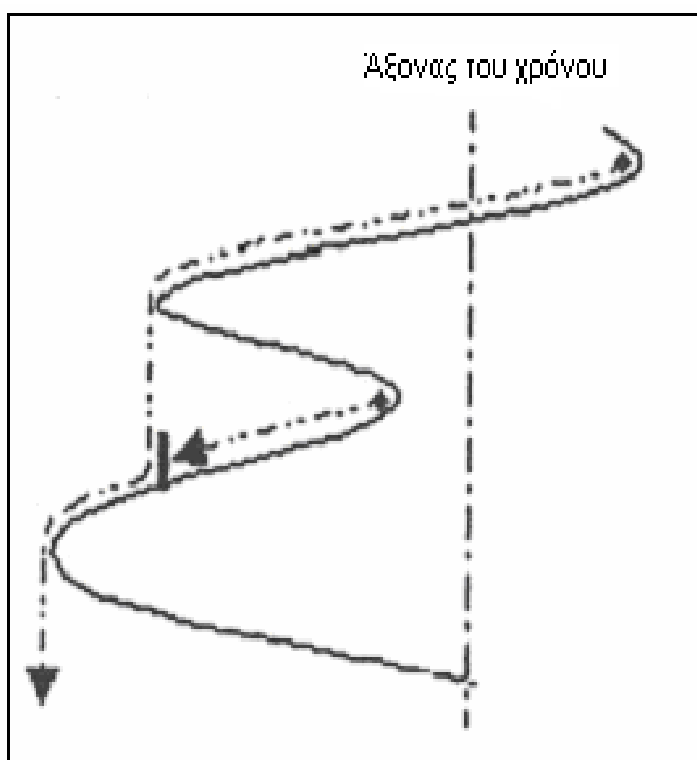
Σχ. 5.11 Η σταγόνα απελευθερώνεται από τη μεγαλύτερη κορυφή.

Η προέλευση της τυχαίας τάσης δίνεται στον άξονα της τετμημένης της μεγαλύτερης κορυφής της τυχαίας τάσης. Οι σταγόνες του νερού διαδοχικά απελευθερώνονται σε κάθε άκρο. Μπορεί να

συμφωνηθεί ότι οι κορυφές των στεγών είναι στα δεξιά του άξονα, ενώ οι πυθμένες από τις στέγες είναι στα αριστερά.

Αν η πτώση ξεκινήσει από τη μέγιστη τιμή:

- α) Η πτώση θα σταματήσει, εφόσον πληρεί μία αντίθετη κορυφή μεγαλύτερη από αυτήν του αναχώρησης,
- β) θα σταματήσει και αυτή, εάν συναντήσει το μονοπάτι που διέρχεται από μια άλλη πτώση, που έχει προηγουμένως καθοριστεί όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.12,
- γ) η πτώση μπορεί να πέσει σε μια άλλη στέγη και να συνεχίσει να γλιστράει σύμφωνα με τους κανόνες α και β.

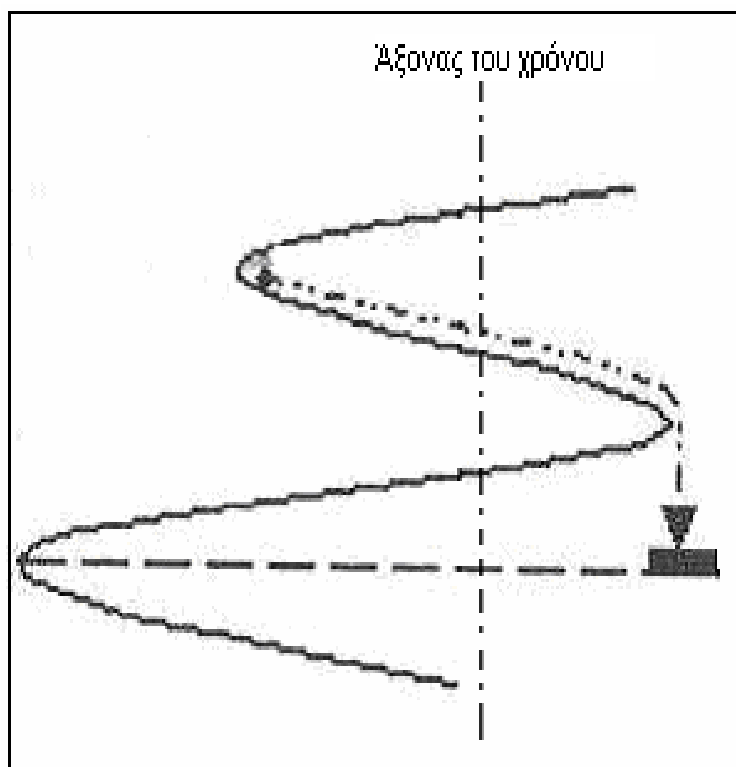


Σχ. 5.12 Κανόνας ροής της πτώσης από τη μέγιστη τιμή.

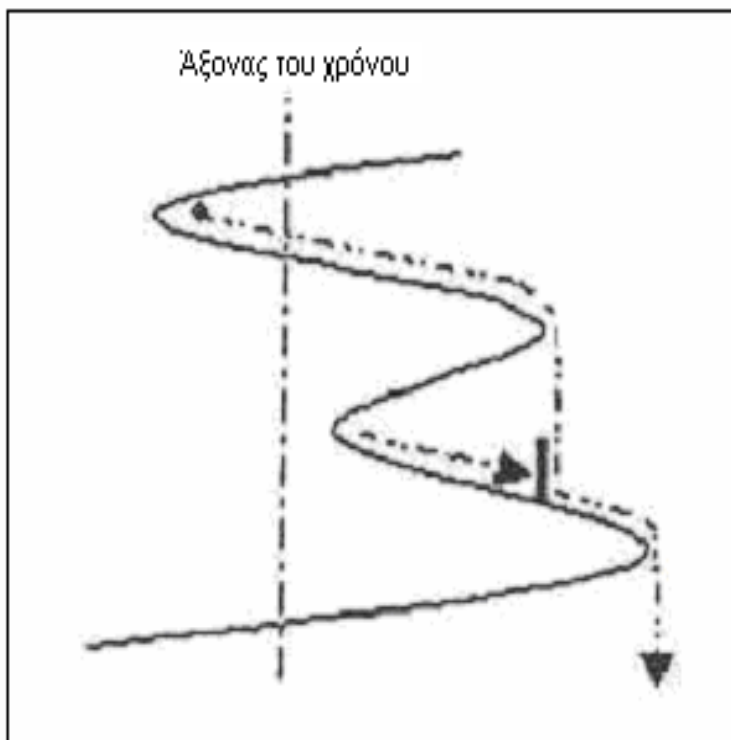
Αν η πτώση ξεκινήσει από μια κοιλάδα:

- α) η πτώση θα σταματήσει αν η πτώση συναντήσει μια κοιλάδα βαθύτερη από αυτή της αναχώρησης όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.13,
- β) η πτώση θα σταματήσει όταν διασχίσει το μονοπάτι μιας σταγόνας που προέρχεται από προηγούμενη κοιλάδα όπως δίνεται και στο σχήμα 5.14,
- γ) η πτώση μπορεί να πέσει σε άλλη στέγη και να συνεχίσει, σύμφωνα με τους κανόνες α και β όπως τους βλέπουμε ακριβώς από πάνω.

Το οριζόντιο μήκος της κάθε ροής βροχής (rainflow) προβλέπει μία σειρά η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ανερχόμενη στο ήμισυ του κύκλου ζωής ενός σταθερού φορτίου εύρους.



Σχ. 5.13 Αναχώρηση πτώσης από μια κοιλάδα.



Σχ. 5.14 Κανόνας ροής της πτώσης από μια κοιλάδα.

Δεδομένου ότι οι βασικές αρχές του αρχικού ορισμού της καταμέτρησης των κύκλων της ροής της βροχής (rainflow) που παραπάνω οι κύκλοι της εντοπίστηκαν σε τυχαίο πλάτος σε ακολουθία μεταβλητής φόρτισης με το σχήμα 5.10 ως παράδειγμα, έχουμε την τάση  $S(t)$  που μετατρέπεται σε μια διαδικασία κορυφών και κοιλάδων. Στη συνέχεια, ο άξονας του χρόνου περιστρέφεται έτσι ώστε να είναι στραμμένος προς τα κάτω. Το νερό ρέει προς τα κάτω σύμφωνα με τους ακόλουθους κανόνες :

1. Ένα μονοπάτι της ροής βροχής που αρχίζει σε μια κοιλάδα θα συνεχίσει κάτω στις «στέγες παγόδας», μέχρι να συναντήσει μια κοιλάδα που έχει μεγαλύτερη αρνητική τιμή από την προέλευση της. Από το σχήμα 5.10, το μονοπάτι που ξεκινά από το A θα λήξει στο E,
2. Ένα μονοπάτι της ροής της βροχής τερματίζεται όταν συναντά

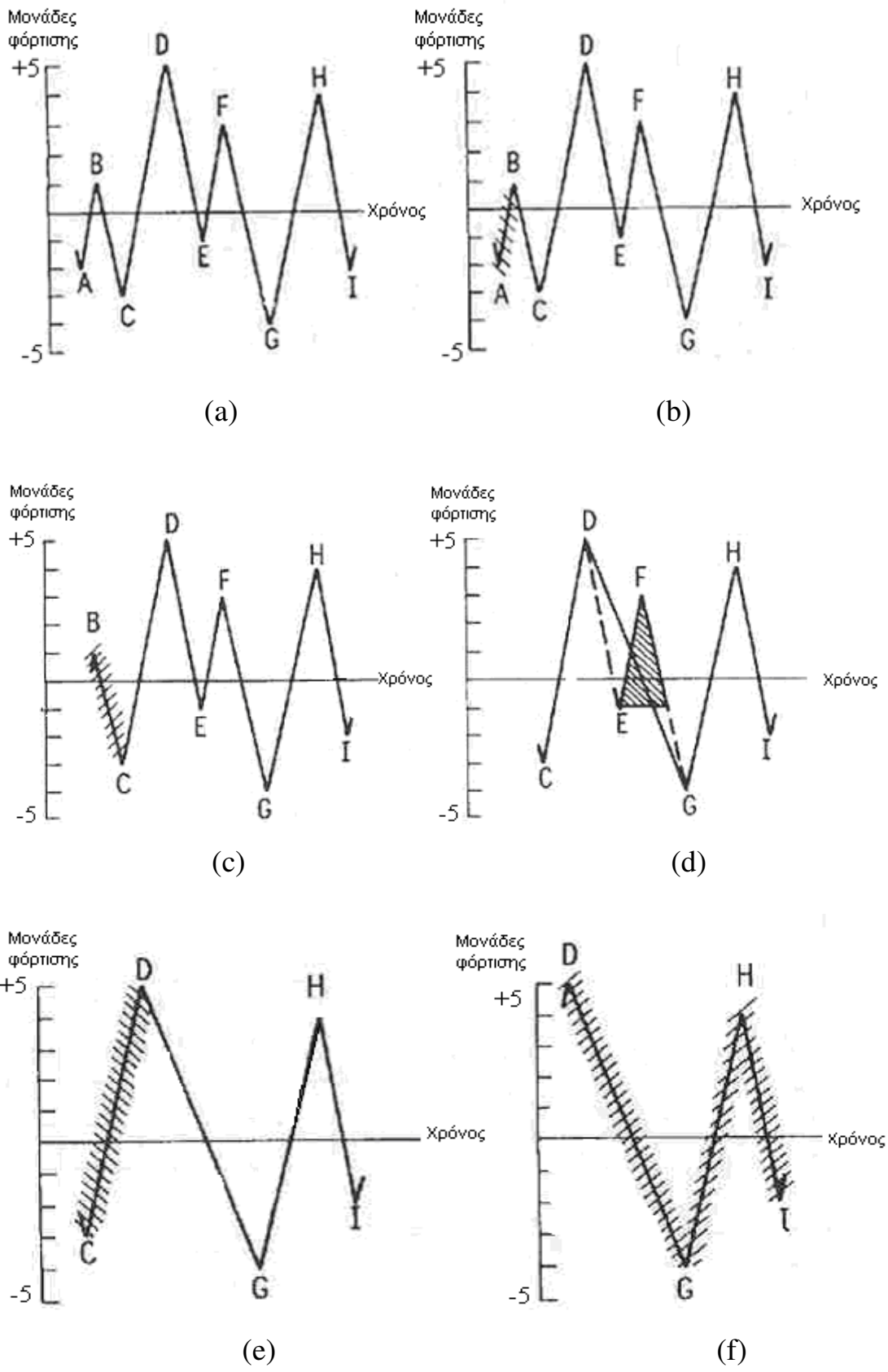
ροές από ένα προηγούμενο μονοπάτι. Για παράδειγμα, η διαδρομή που ξεκινάει από το C, όπως φαίνεται τερματίζεται,

3. Ένα νέο μονοπάτι δεν θα ξεκινήσει έως ότου το μονοπάτι που εξετάζεται να είναι σταματημένο,

4. Η κοιλάδα που δημιουργείται από ημικύκλους ορίζεται για ολόκληρη καταγραφή. Για κάθε κύκλο, το εύρος τάσης Si θα είναι η κατακόρυφη εκδρομή μιας διαδρομής. Η Si έχει το μεσαίο σημείο,

5. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αντίστροφα με την κορυφή που δημιουργείται από τις διαδρομές της ροής της βροχής. Για αρκετά μεγάλη καταγραφή, κάθε κοιλάδα που δημιουργείται από ένα δεύτερο κύκλο θα ταιριάζει με μία κορυφή που δημιουργείται από ένα δεύτερο κύκλο για να διαμορφώσει συνολικά ολόκληρο τον κύκλο.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.15) απεικονίζεται ένα παράδειγμα από πρακτικές ορισμού από την καταμέτρηση των κύκλων της ροής της βροχής.



Σχ. 5.15 Πρακτικές ορισμού από την καταμέτρηση των κύκλων της ροής της βροχής(Rainflow)

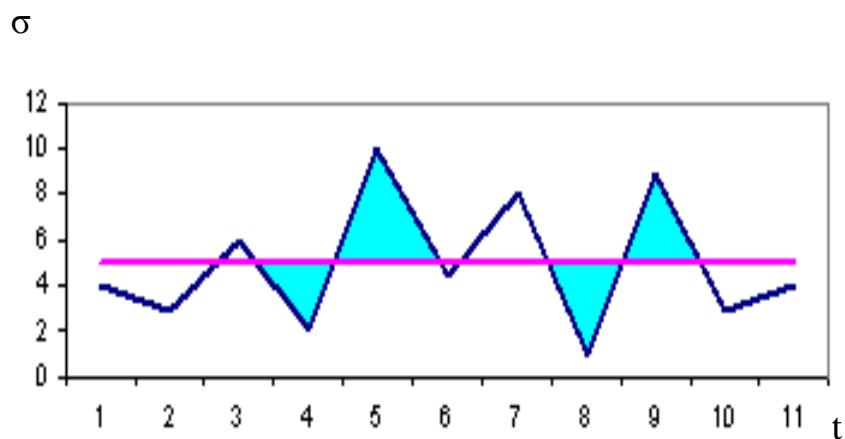
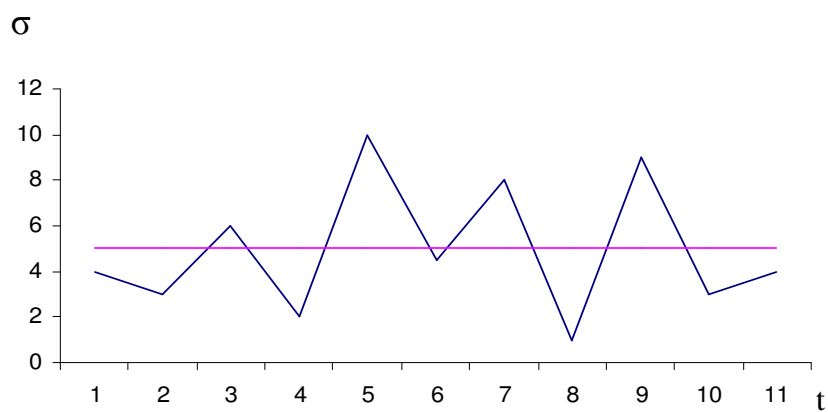
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το σχήμα 5.15 συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 5.2. Δίνει τον αριθμό των κύκλων στα συγκεκριμένα αυτά συμβάντα.

*ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 Ο αριθμός των κύκλων όπως προκύπτει από το σχήμα 5.15.*

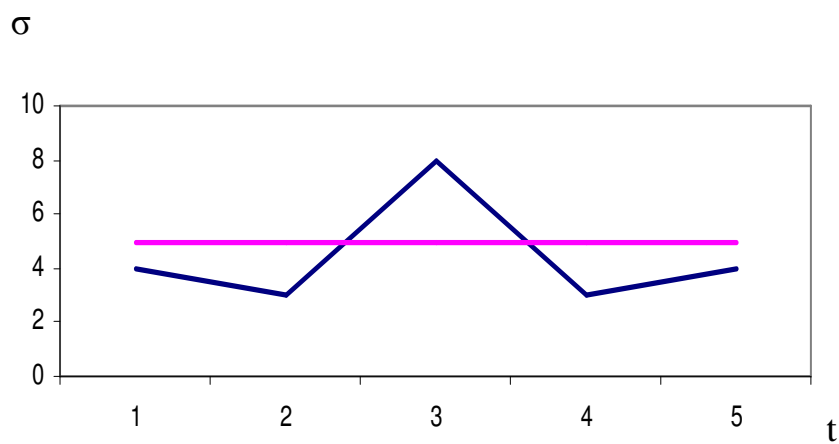
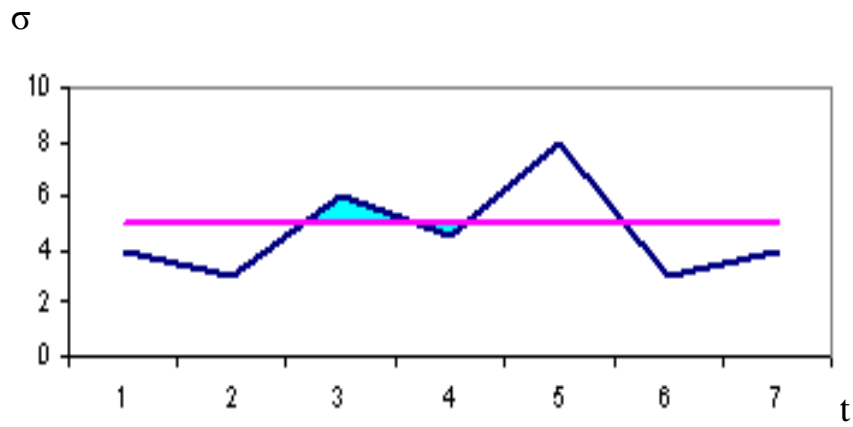
Εύρος (μονάδες)	Μέτρηση κύκλων	Εκδηλώσεις
10	0	
9	0,5	D - G
8	1	C - D , G - H
7	0	
6	0,5	H - I
5	0	
4	1,5	B - C , E - F
3	0,5	A - B
2	0	
1	0	

## 6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

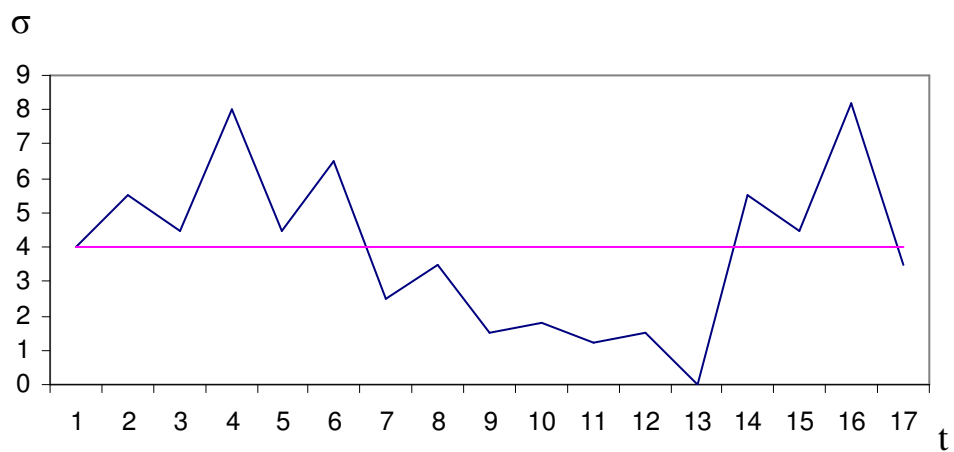
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μετατροπή σύνθετων ιστορικών φόρτισης, που ελήφθησαν από έγκυρη βιβλιογραφία με τη βοήθεια μεθόδων μέτρησης κύκλων που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

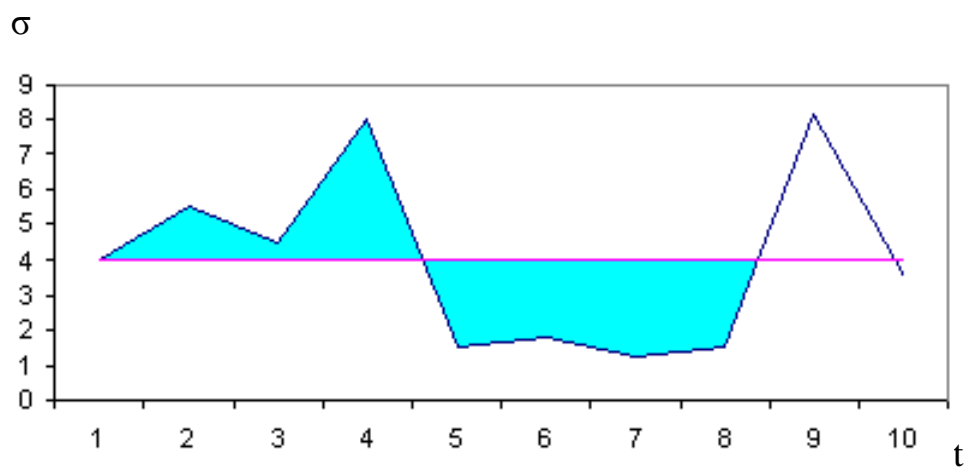
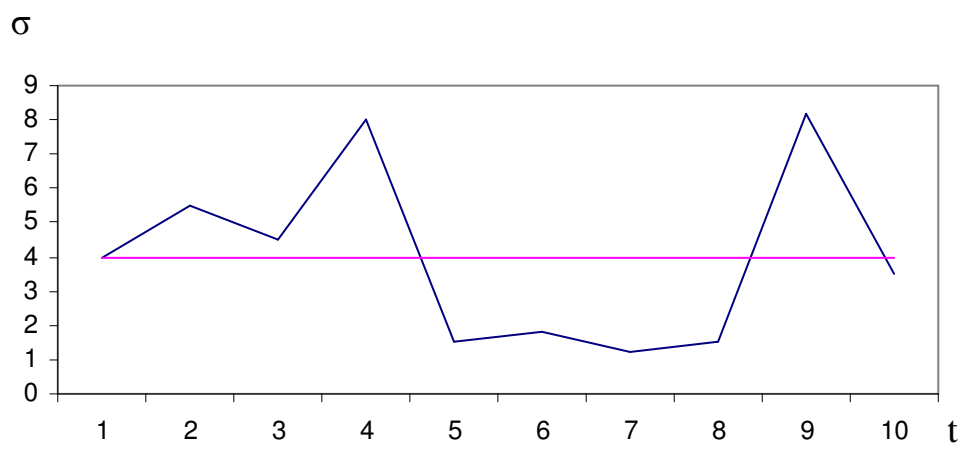
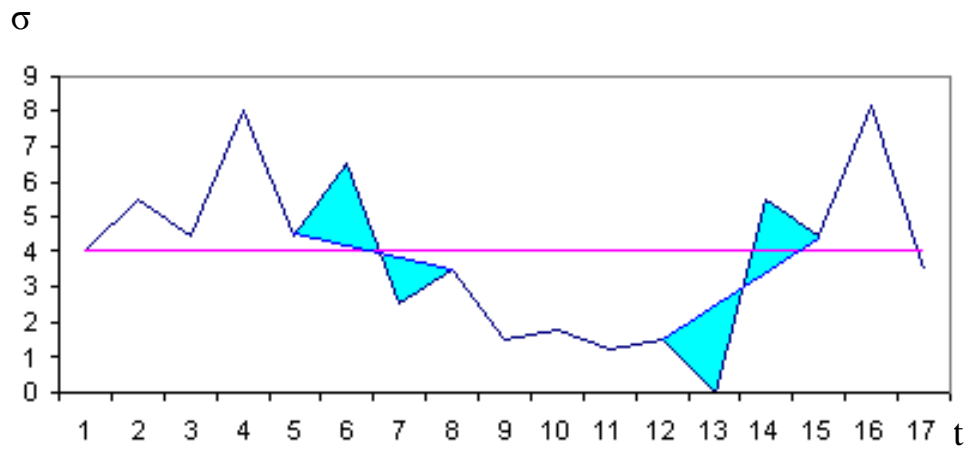


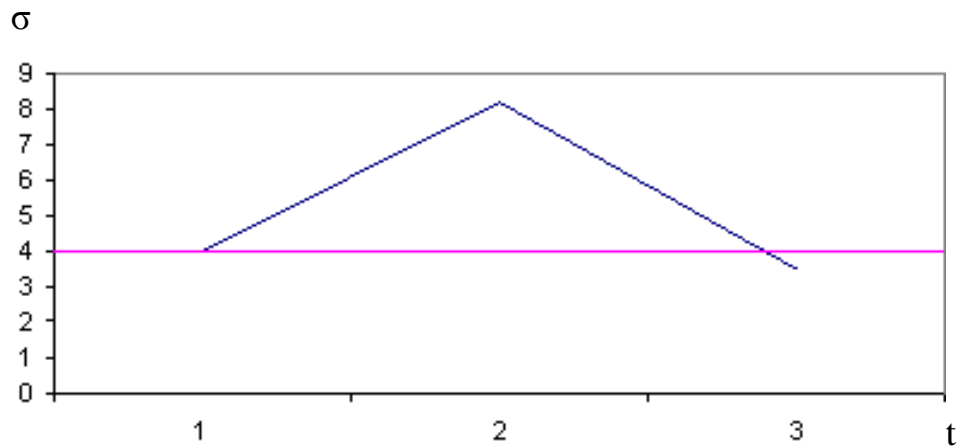




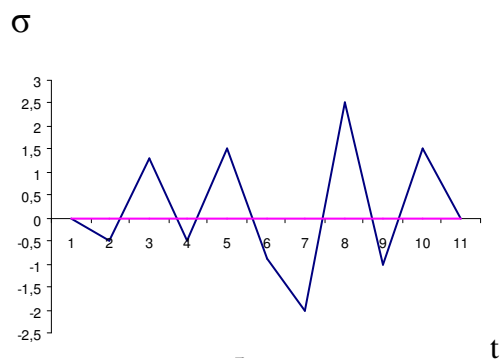
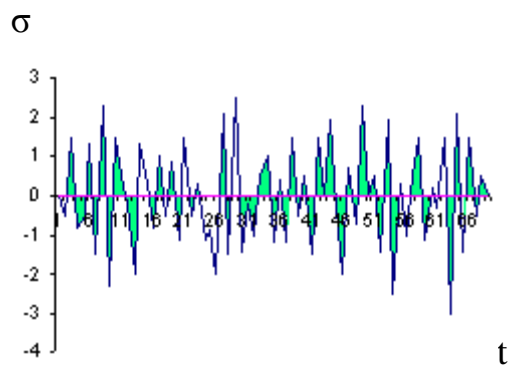
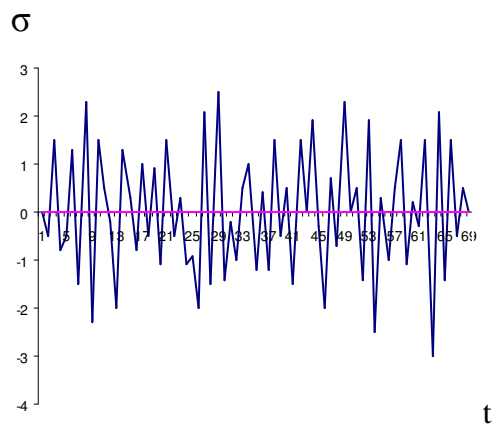
Σχ. 6.1 Μέθοδος απλής μέτρησης εύρους (Simple Range Counting).  
 Ιστορικό φόρτισης [23].

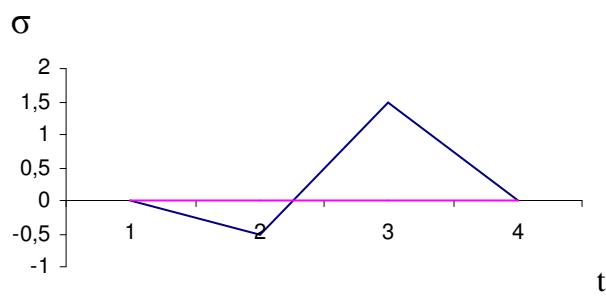
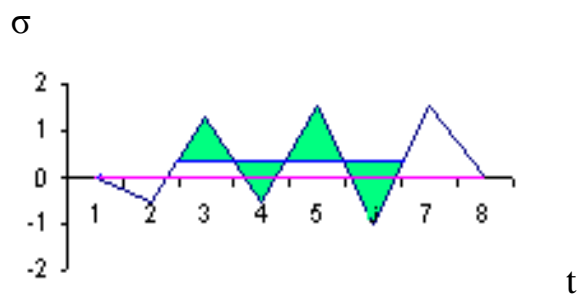
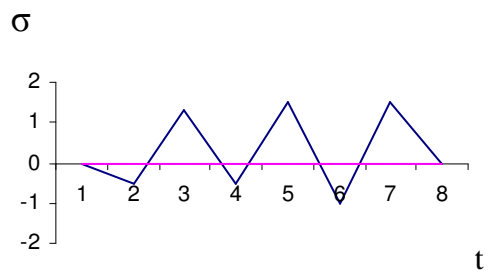
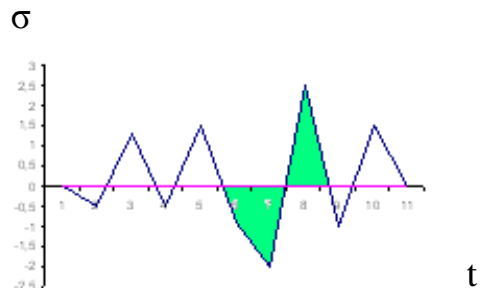




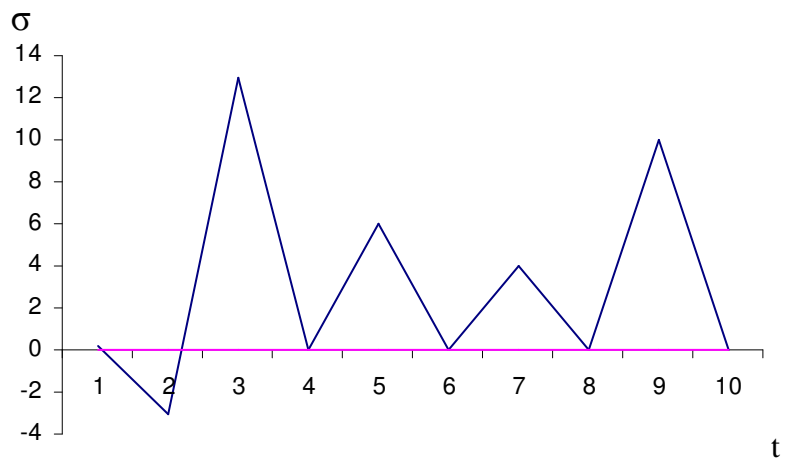
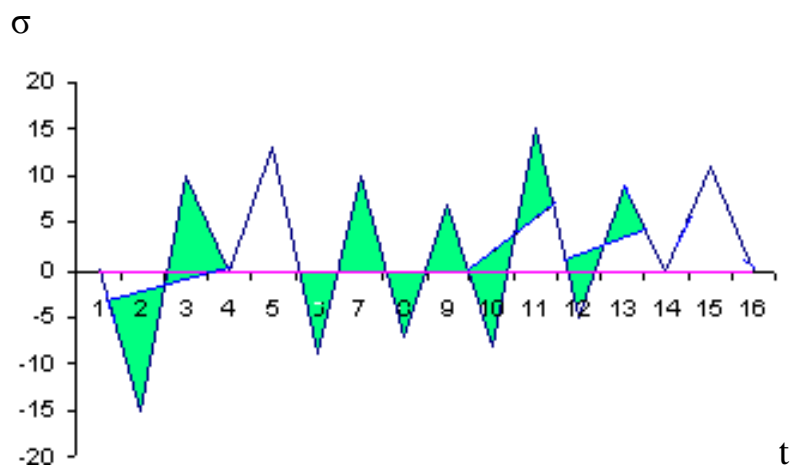
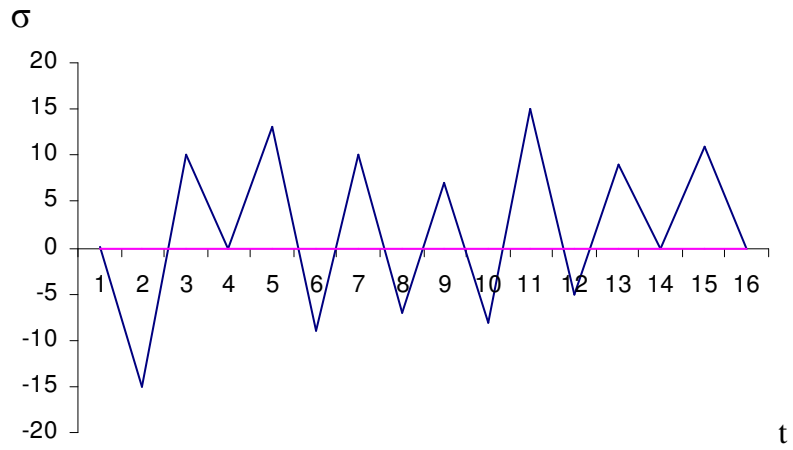


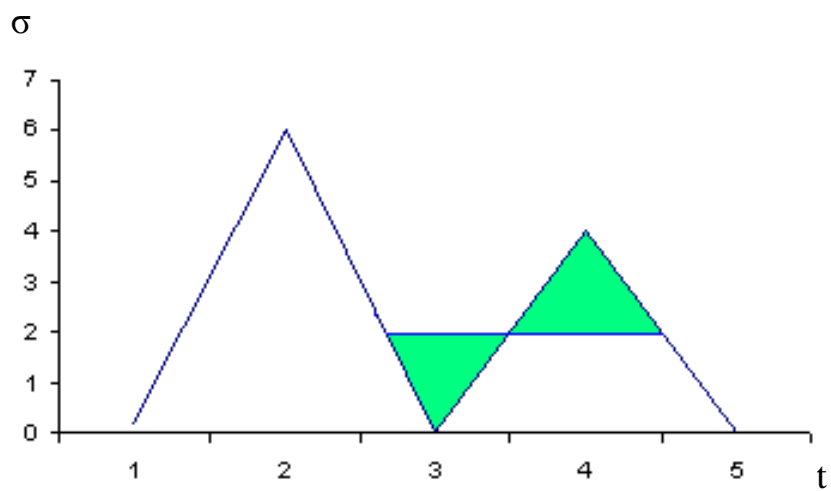
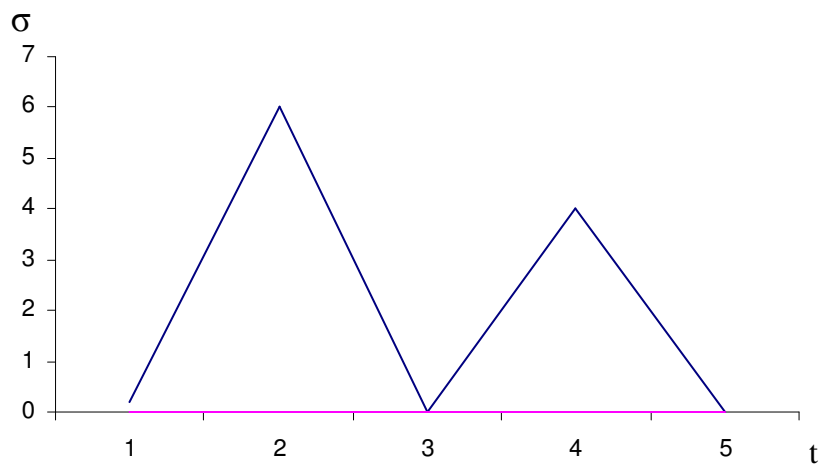
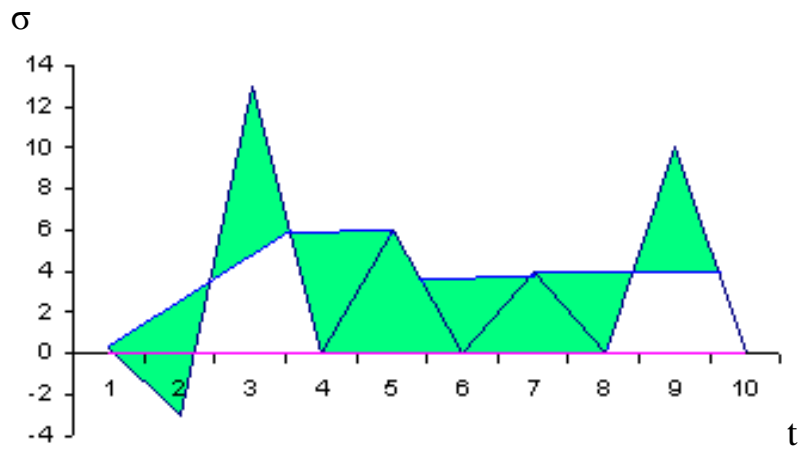
Σχ. 6.2 Μέθοδος μέτρησης κορυφών (Peak Counting)..  
 Ιστορικό φόρτισης [14].

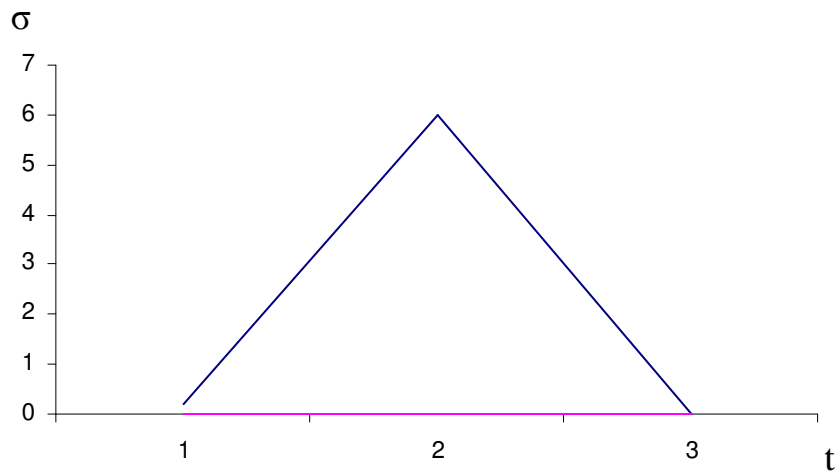




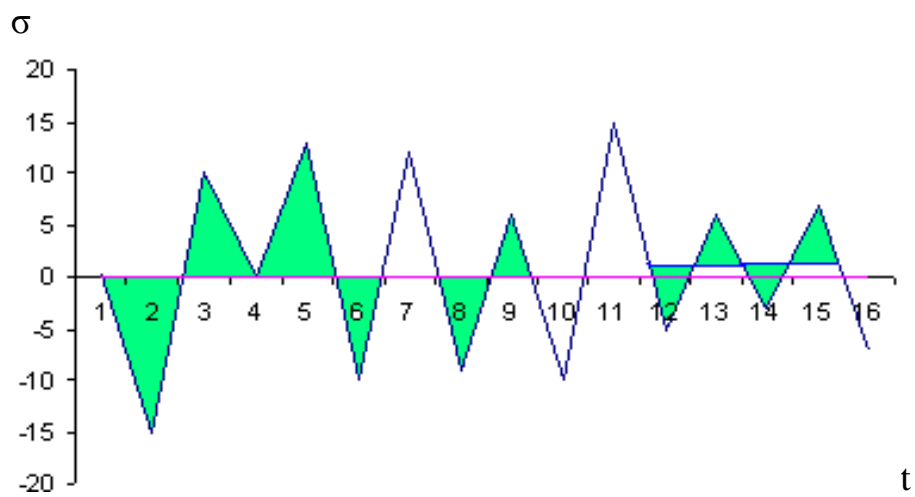
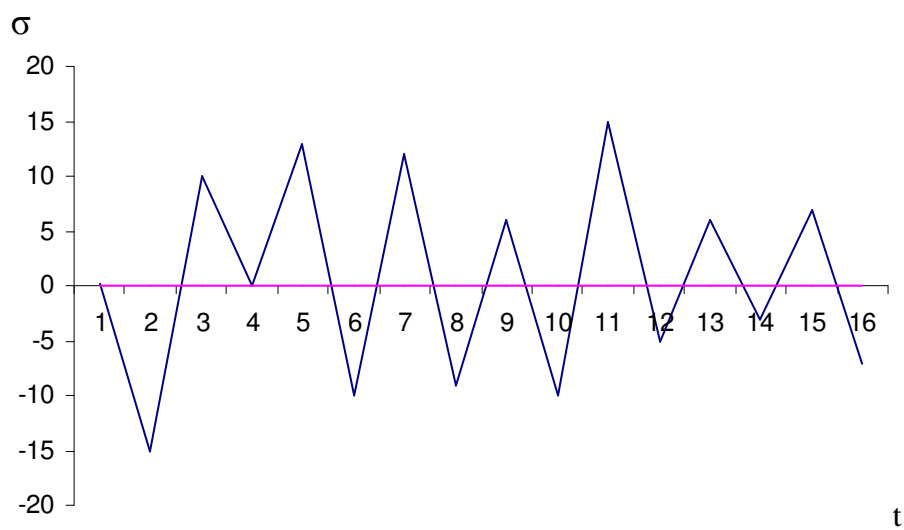
Σχ. 6.3 Μέθοδος μέτρησης κορυφών (Peak Counting).  
 Ιστορικό φόρτισης [4].

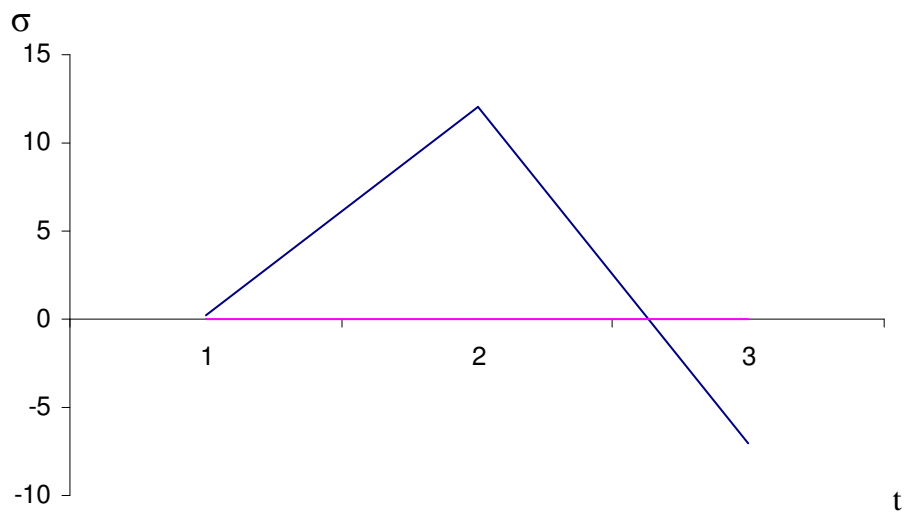
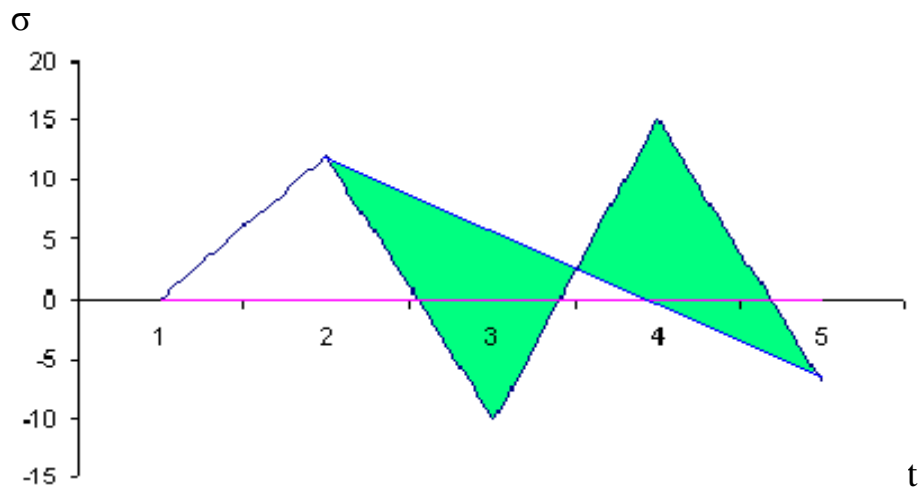
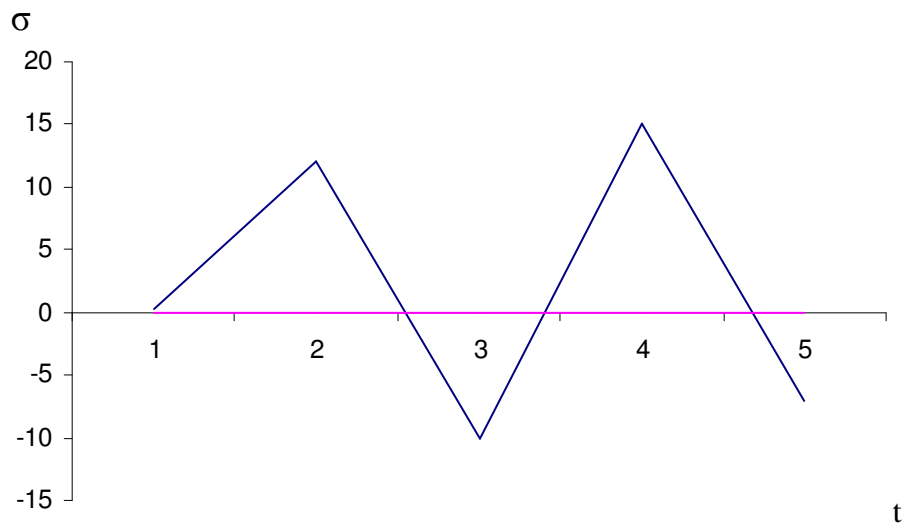






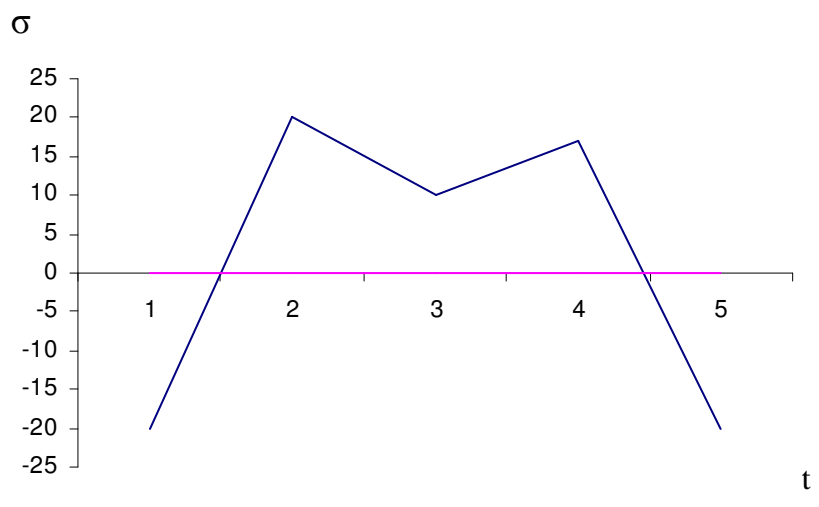
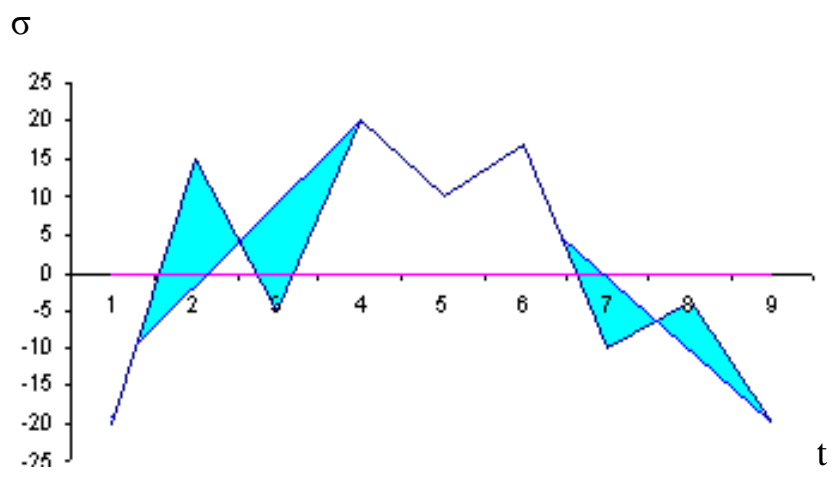
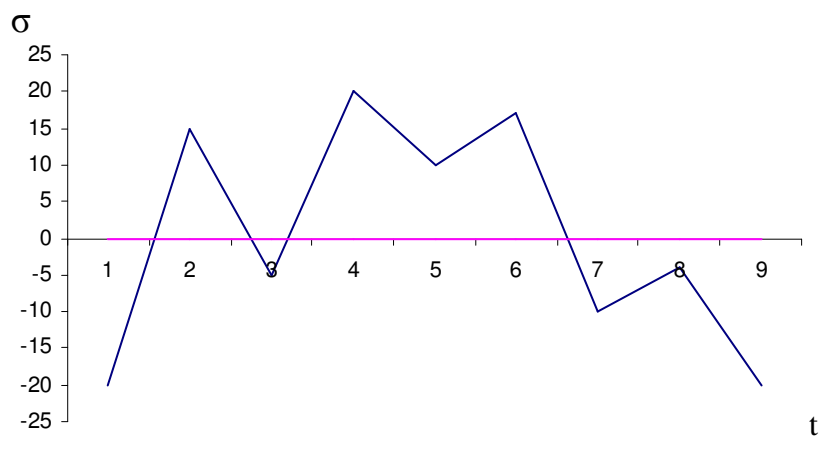
Σχ. 6.4 Μέθοδος των ζευγών εβρους (Range – Pair Method).  
 Ιστορικό φόρτισης [24].

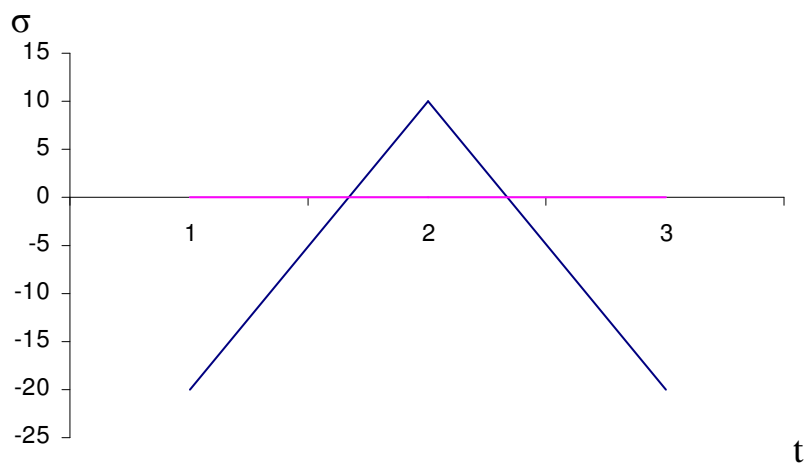
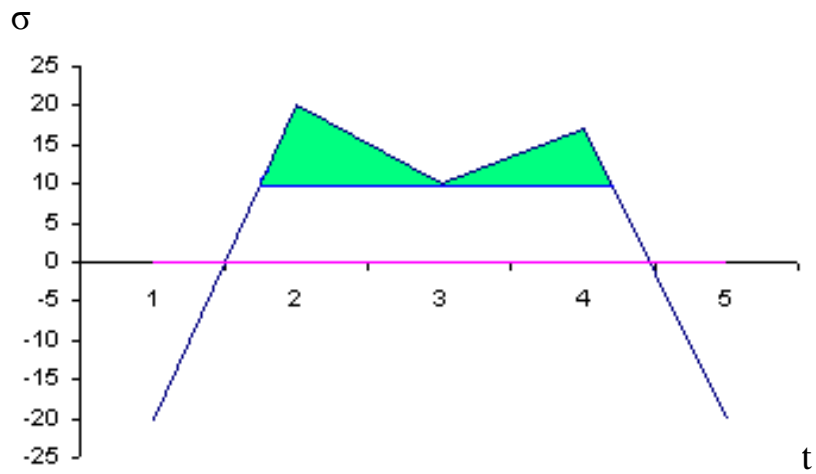




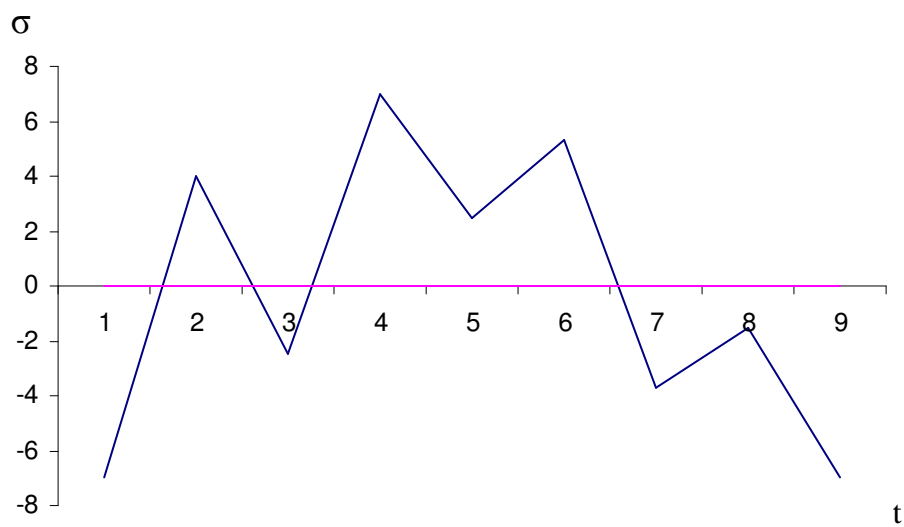
Σχ. 6.5 Μέθοδος ροής της βροχής (Rainflow method).  
 Ιστορικό φόρτισης [24].

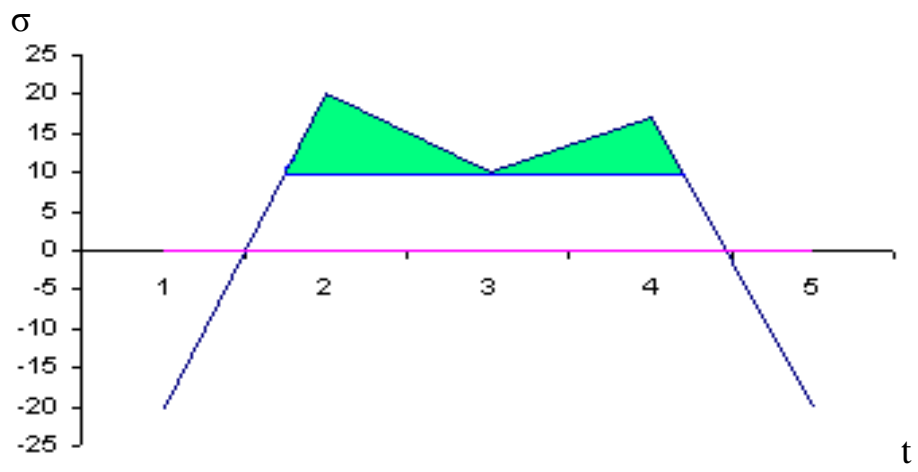
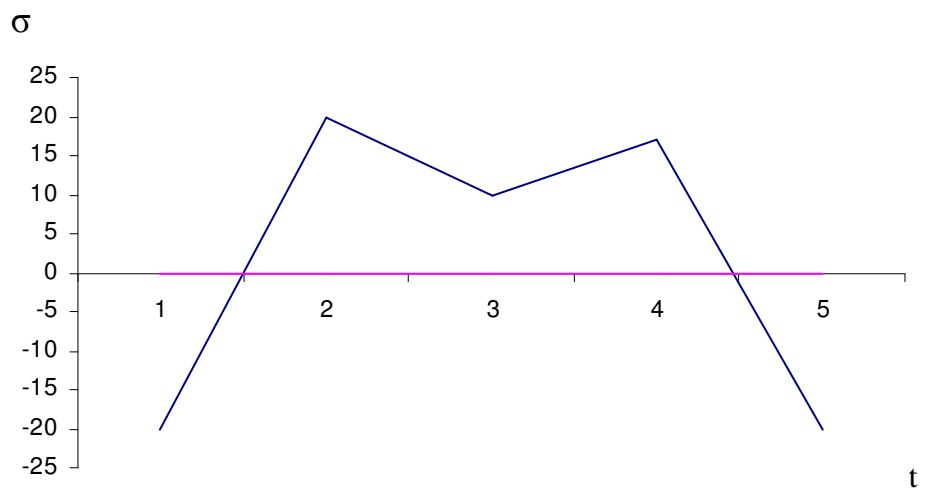
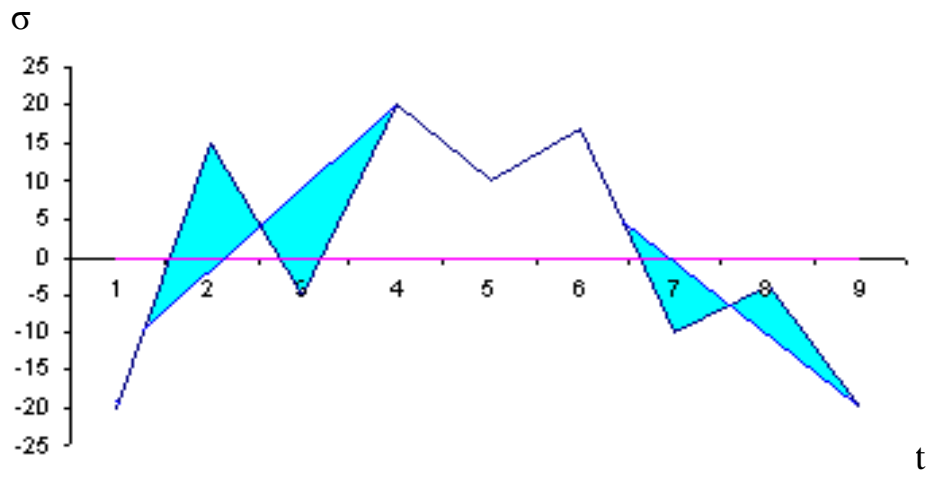


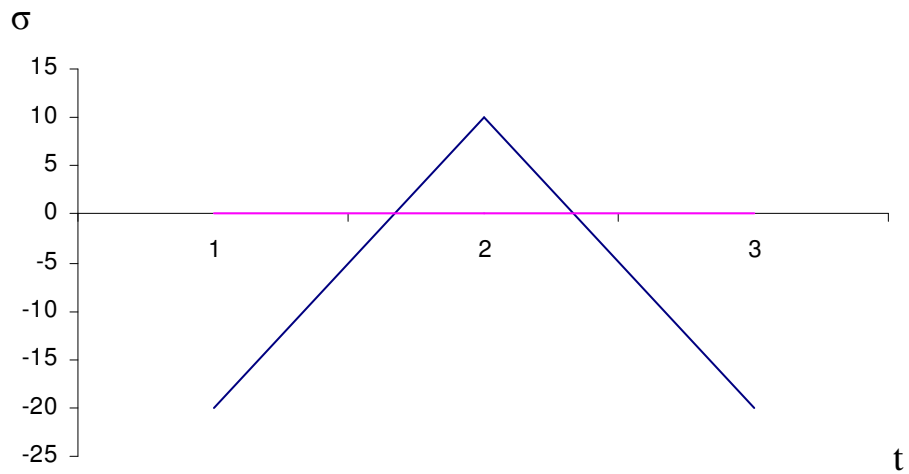




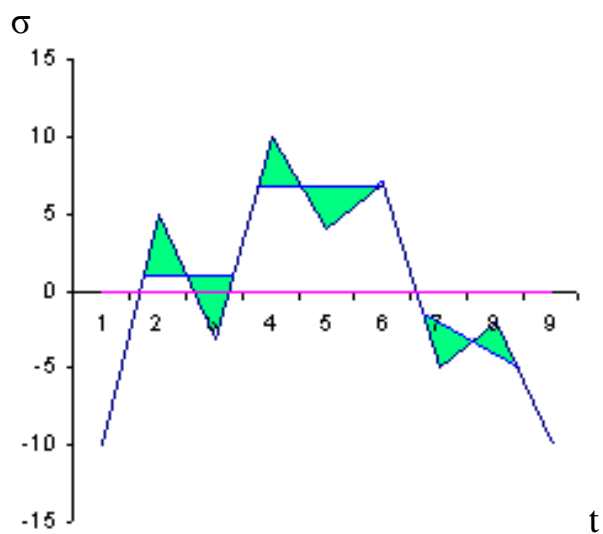
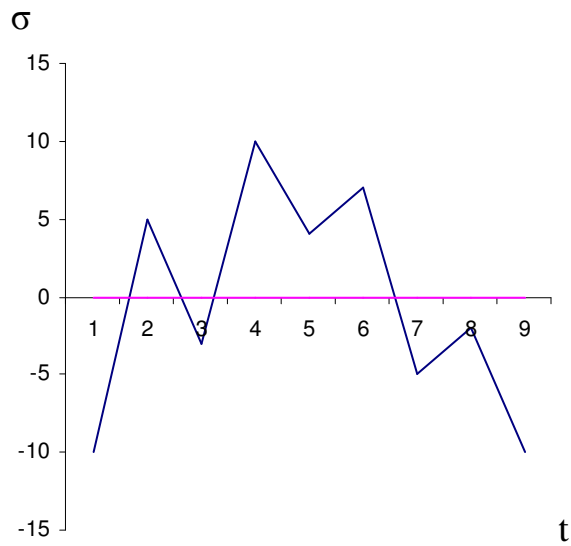
Σχ. 6.6 μέθοδος των ζευγών εύρους (*Range – Pair Method*).  
 Ιστορικό φόρτισης [24].

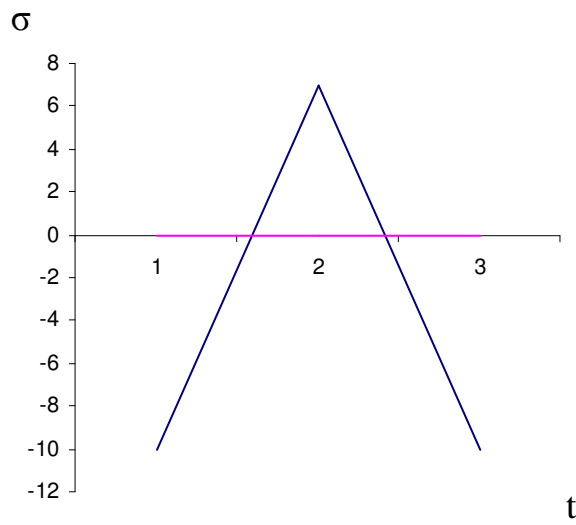




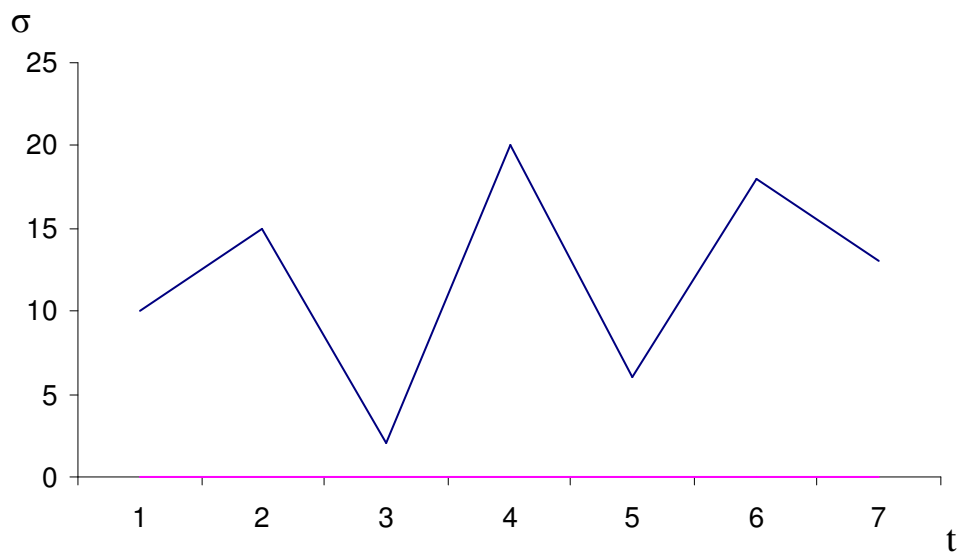


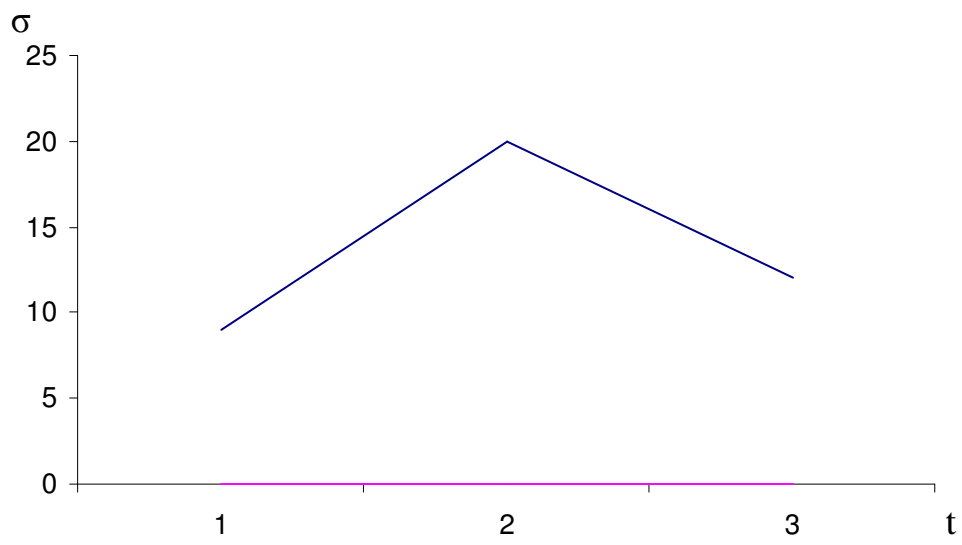
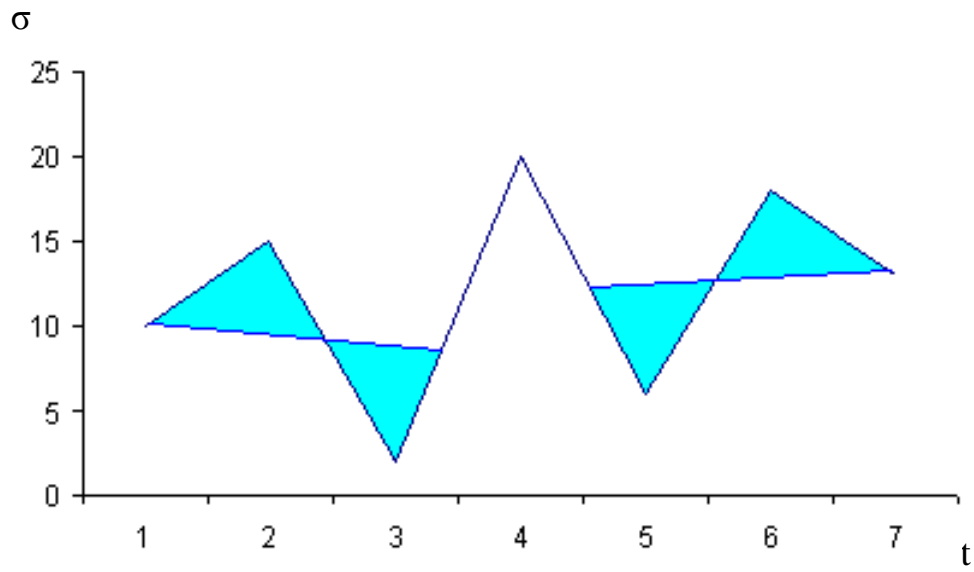
Σχ. 6.7 Μέθοδος μέτρησης κορυφών (*Peak Counting*).  
 Ιστορικό φόρτισης [3].



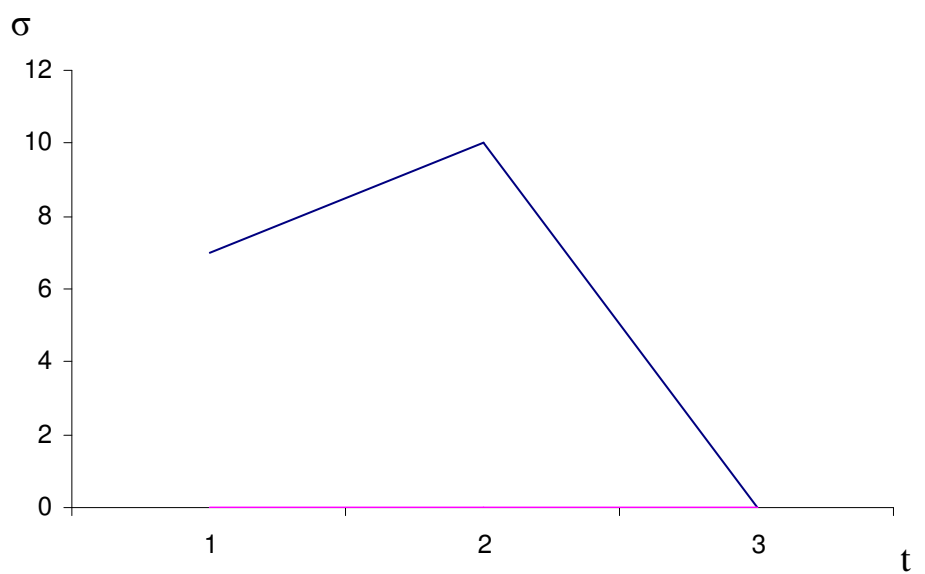
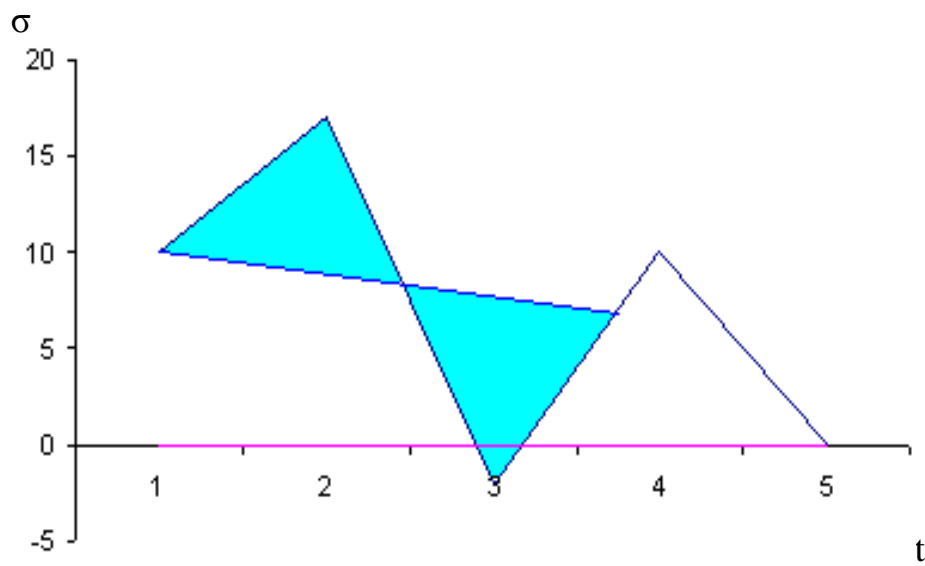
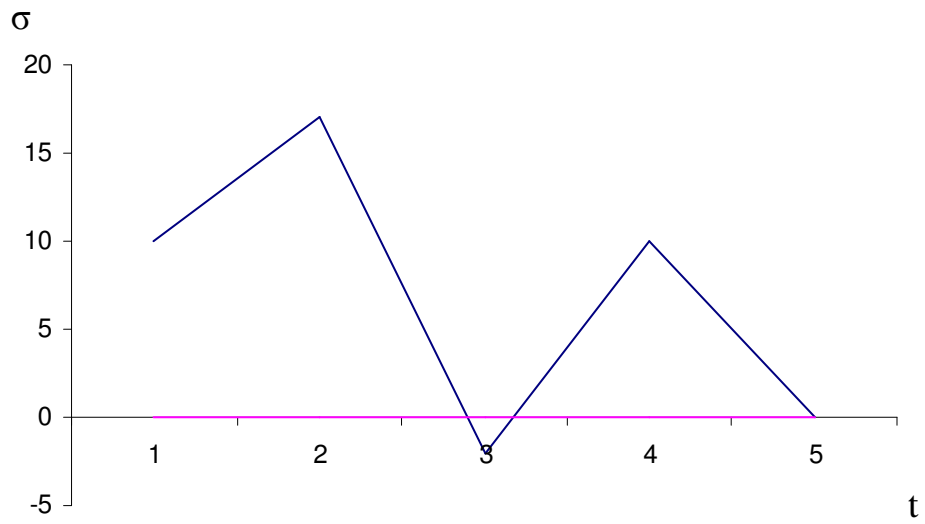


Σχ. 6.8 Μέθοδος ροής της βροχής (Rainflow method).  
 Ιστορικό φόρτισης [15].

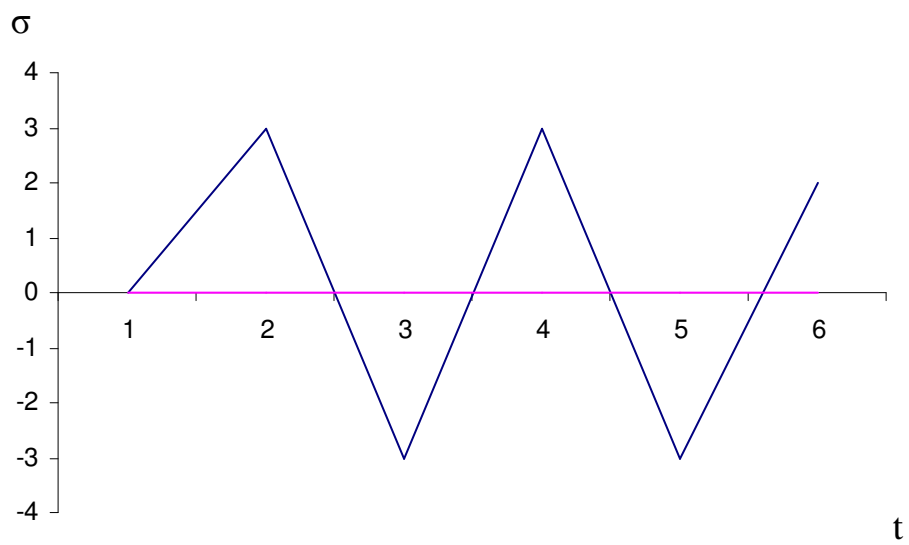
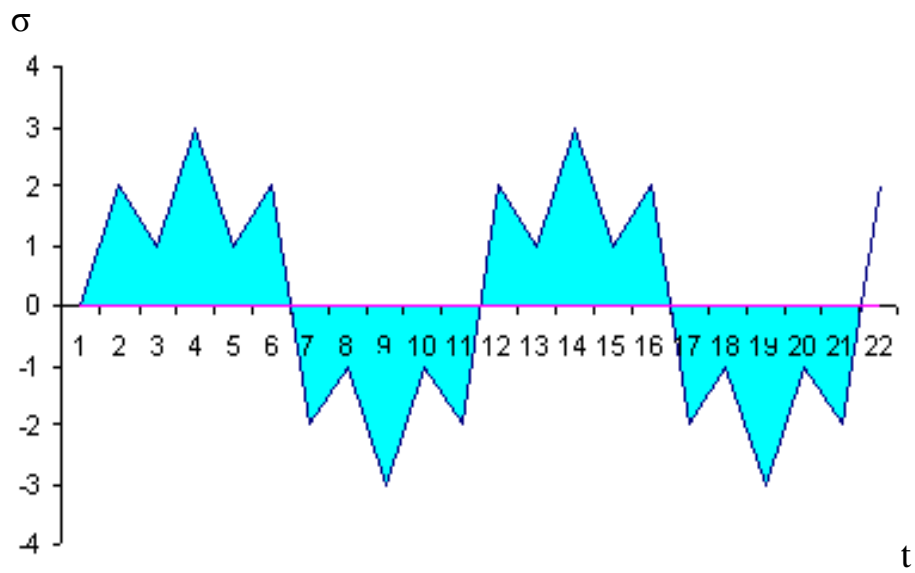
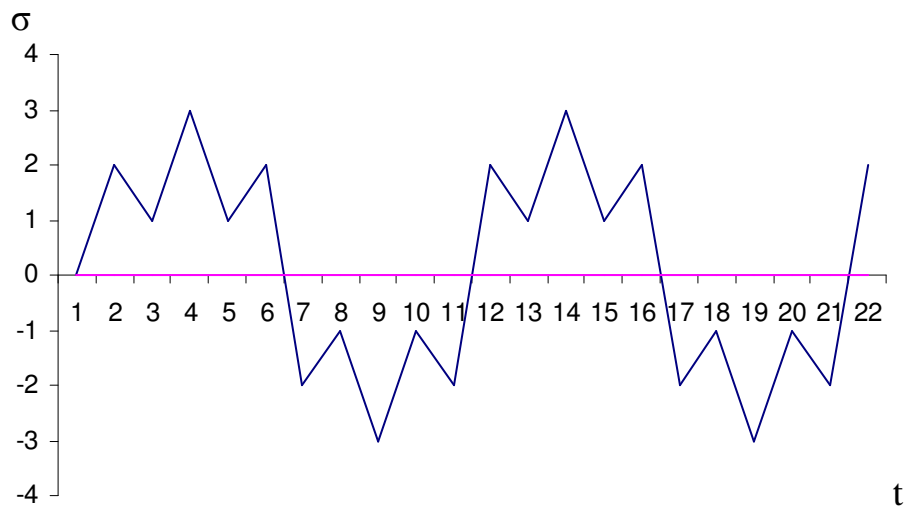




Σχ. 6.9 μέθοδος των ζευγών εύρους (*Range – Pair Method*).  
 Ιστορικό φόρτισης [8].

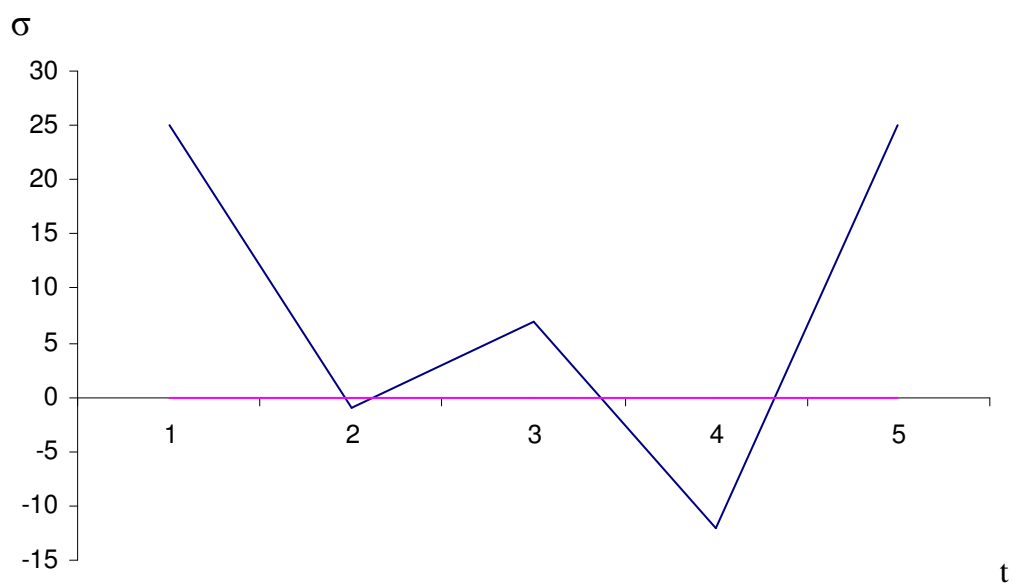
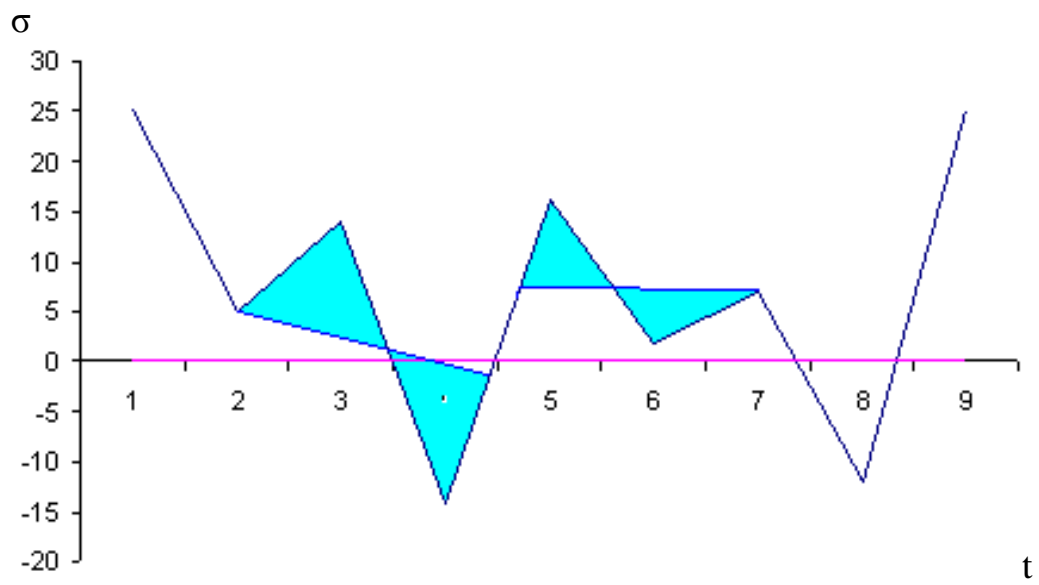
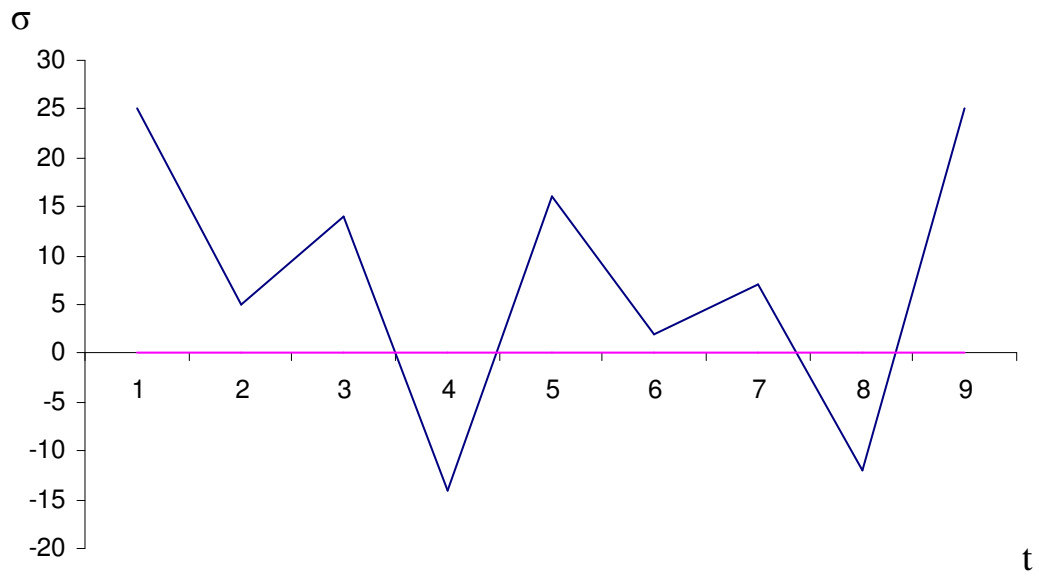


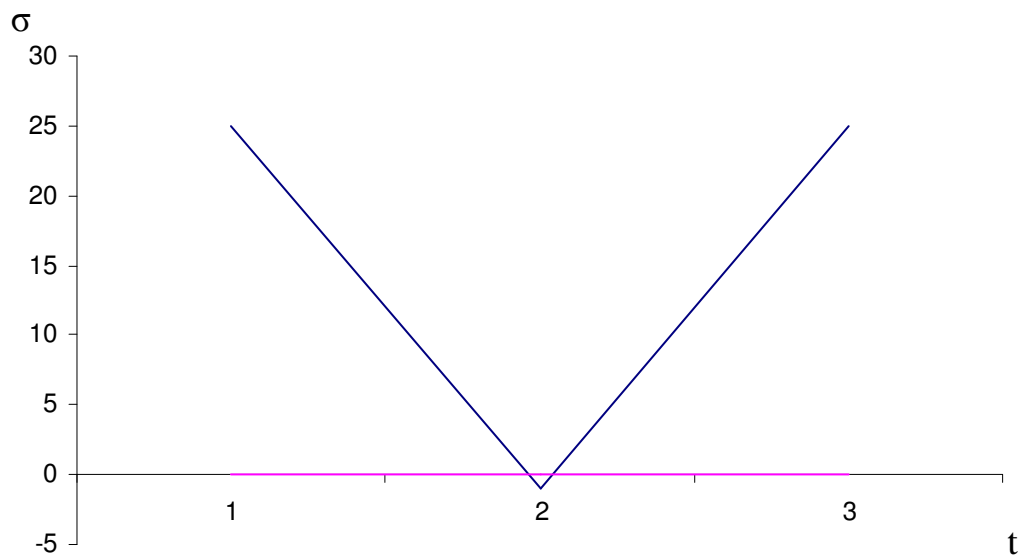
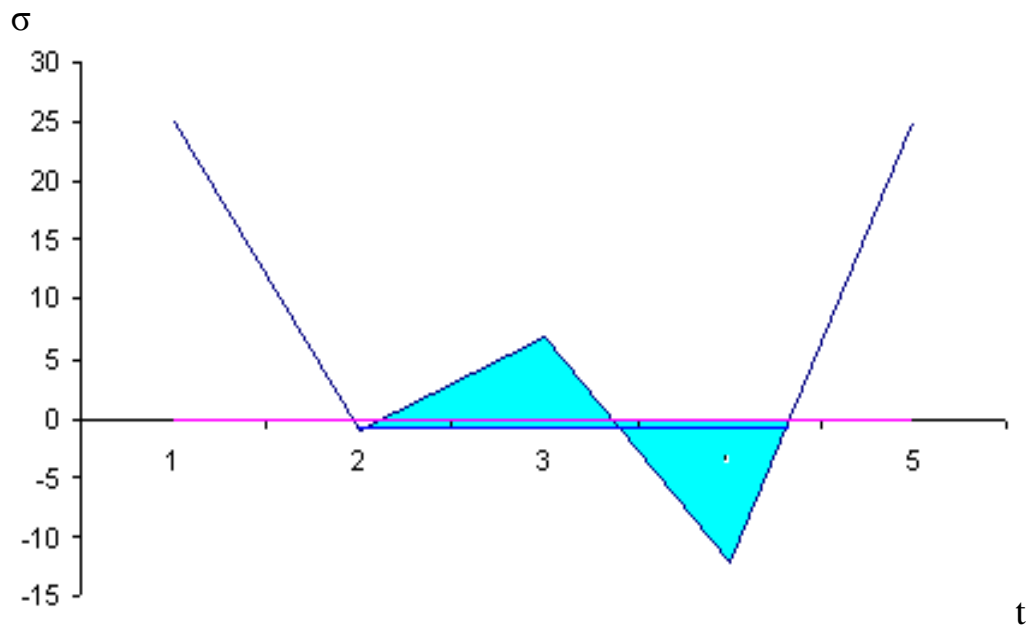
Σχ. 6.10 μέθοδος των ζευγών εύρους (*Range – Pair Method*).  
 Ιστορικό φόρτισης [18].



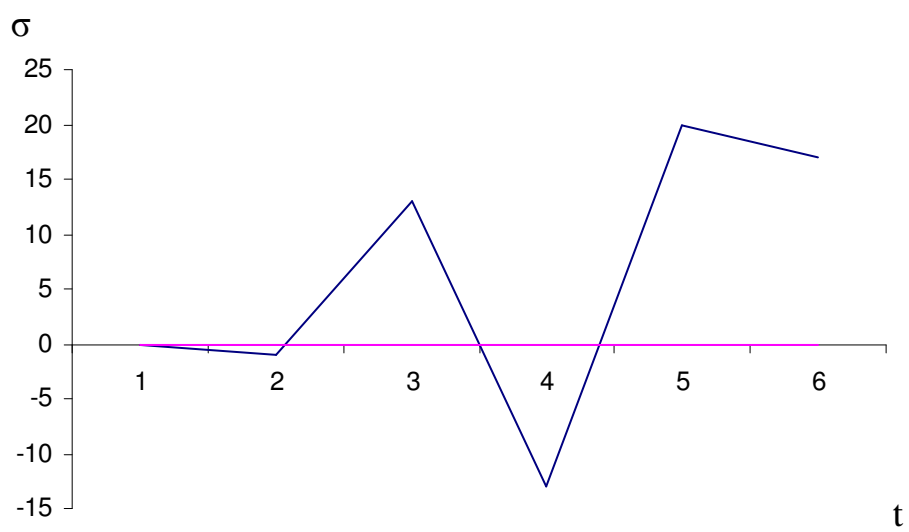
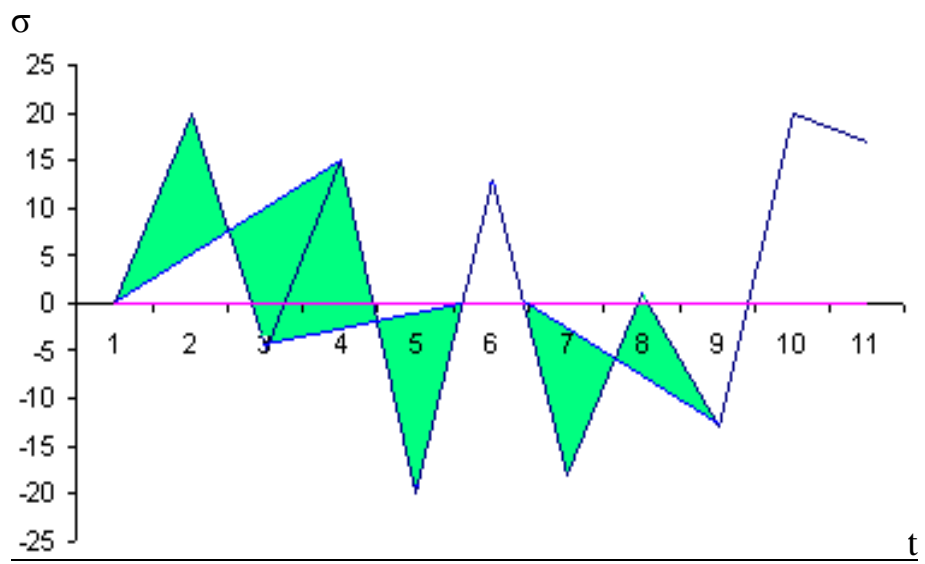
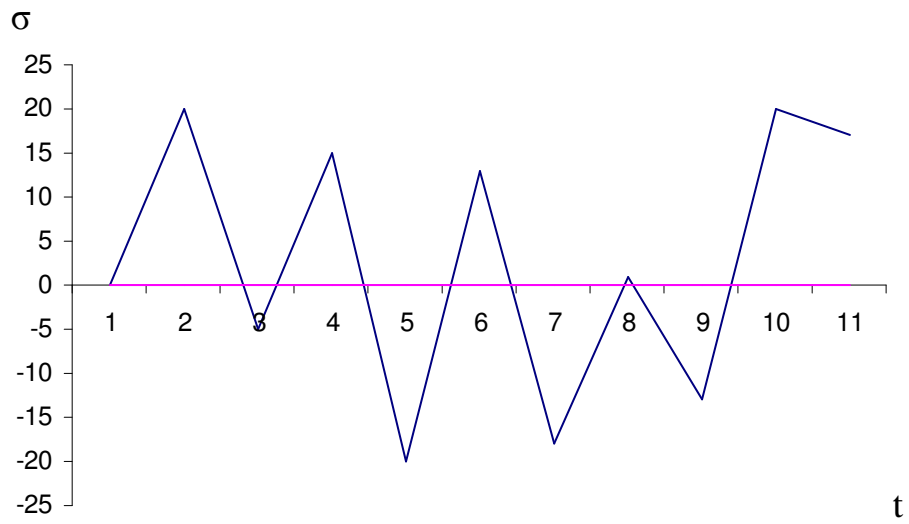
Σχ. 6.11 Μέθοδος ροής της βροχής (Rainflow method).  
 Ιστορικό φόρτισης [20].

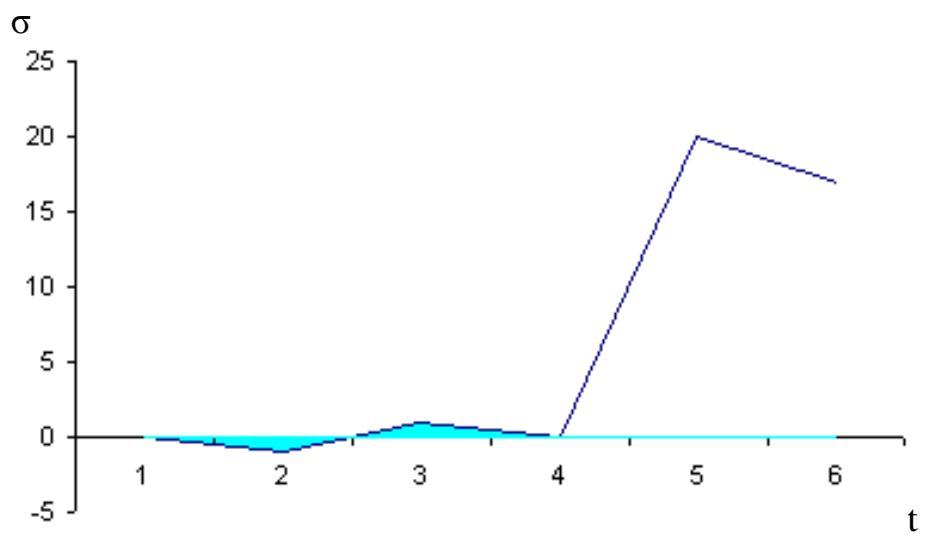
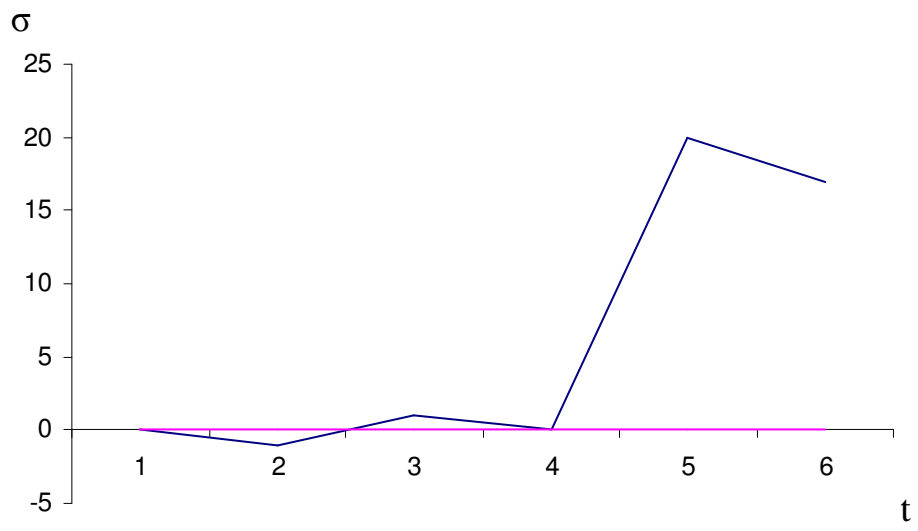
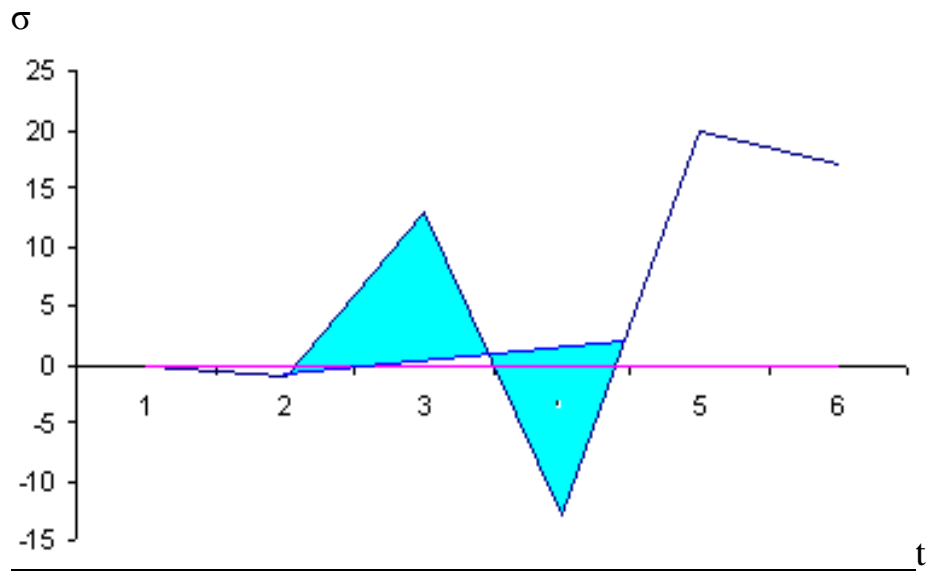


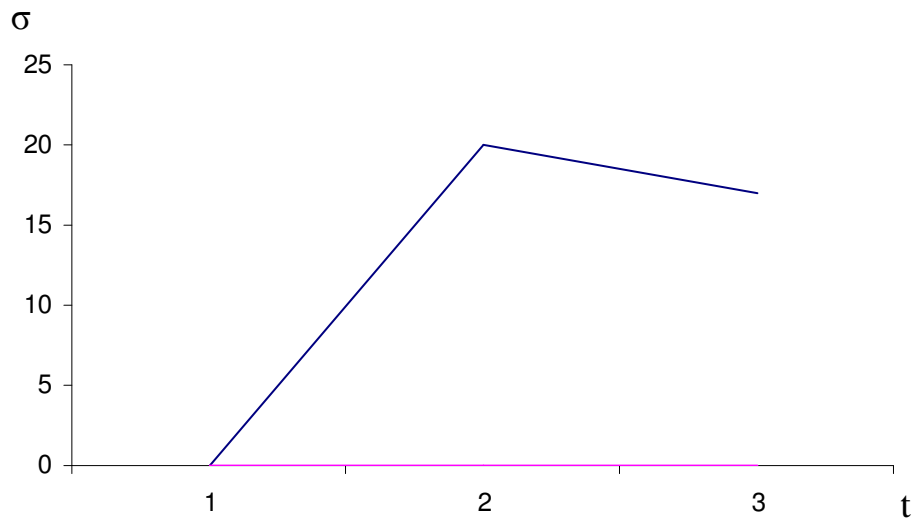




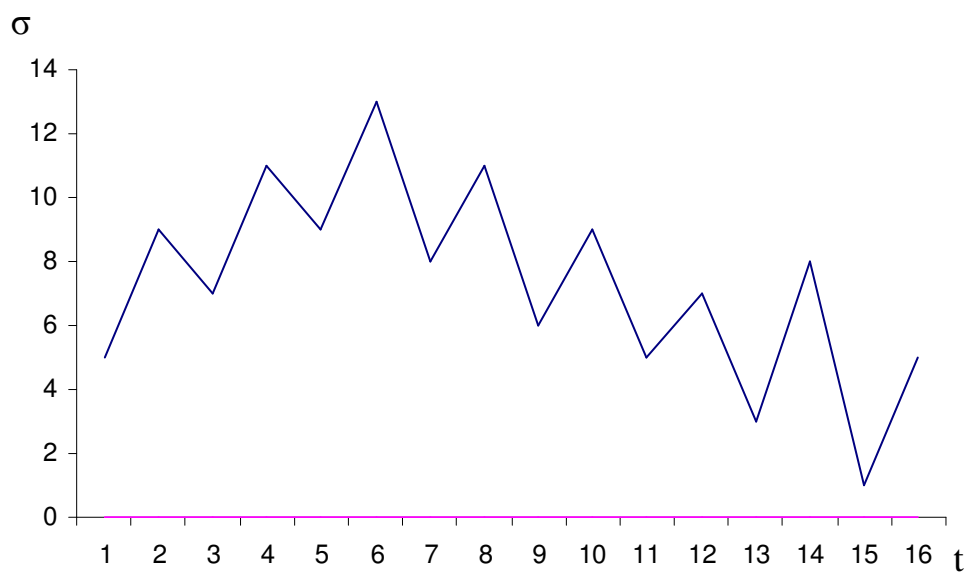
Σχ. 6.12 Μέθοδος ροής της βροχής (Rainflow method).  
 Ιστορικό φόρτισης [6].

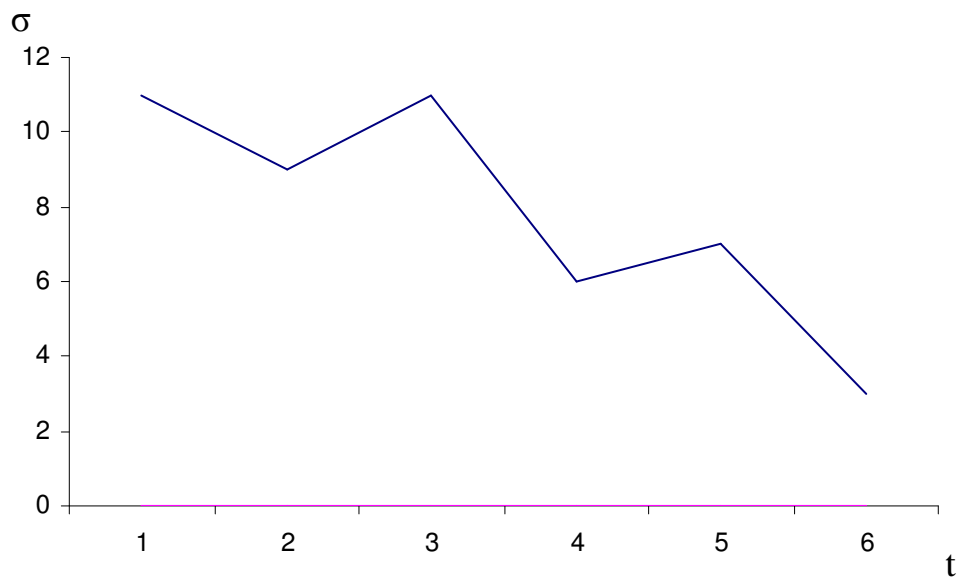
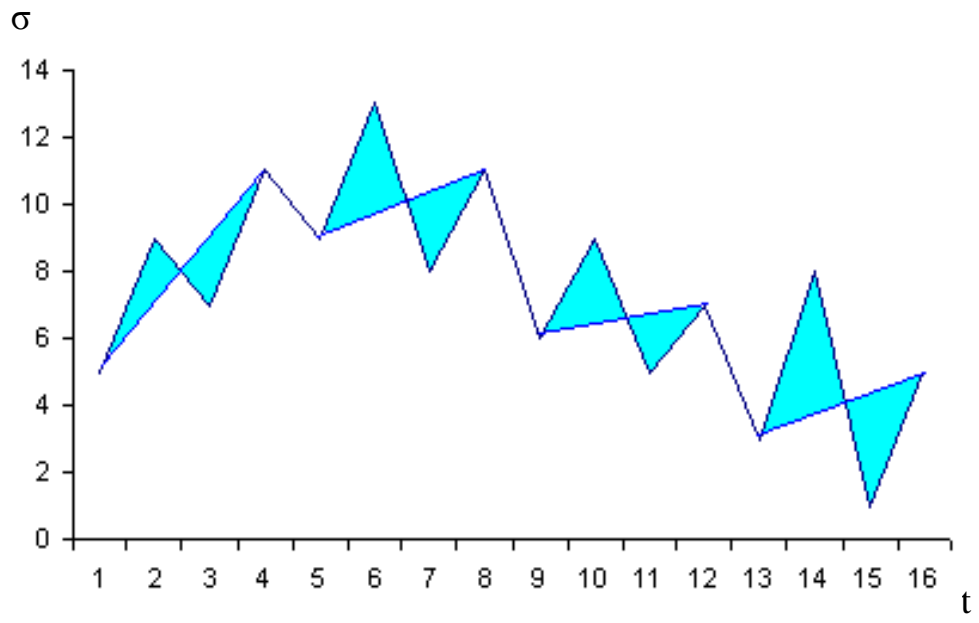


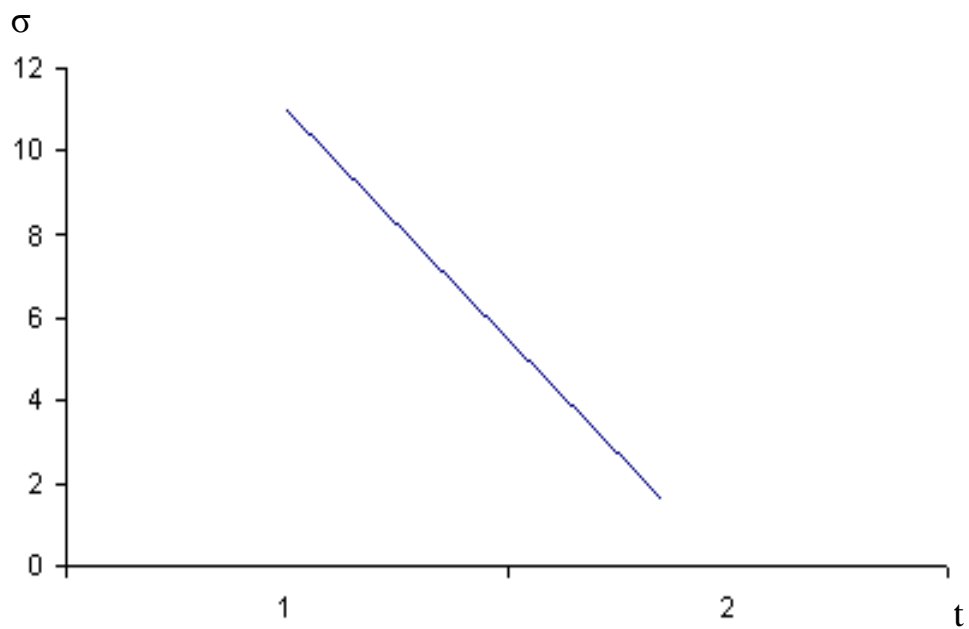
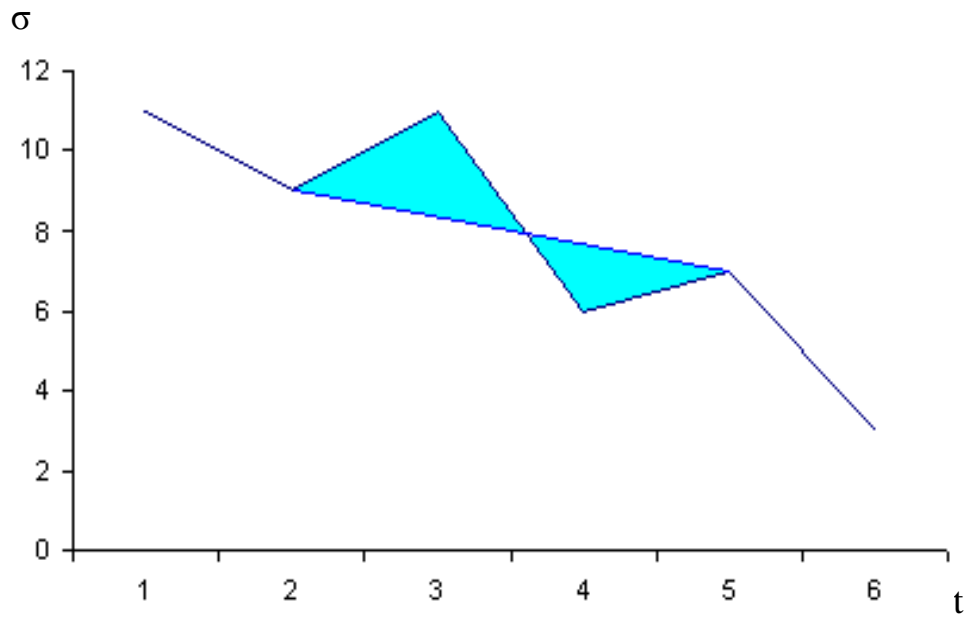




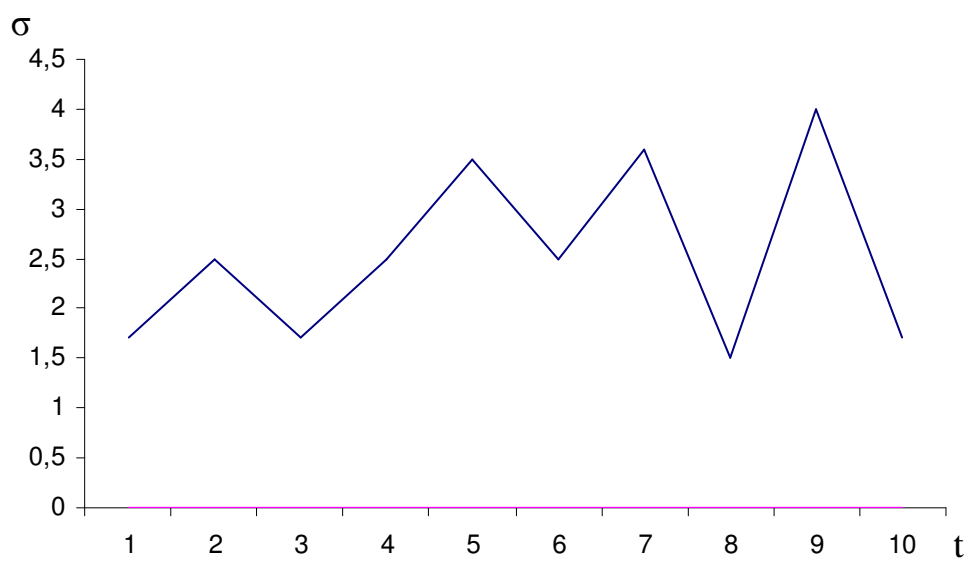
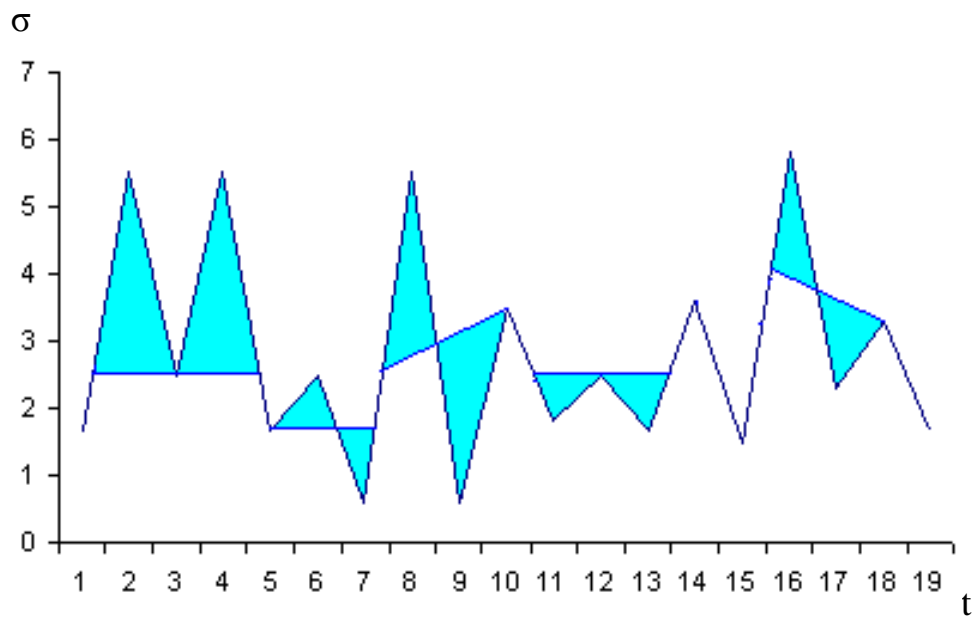
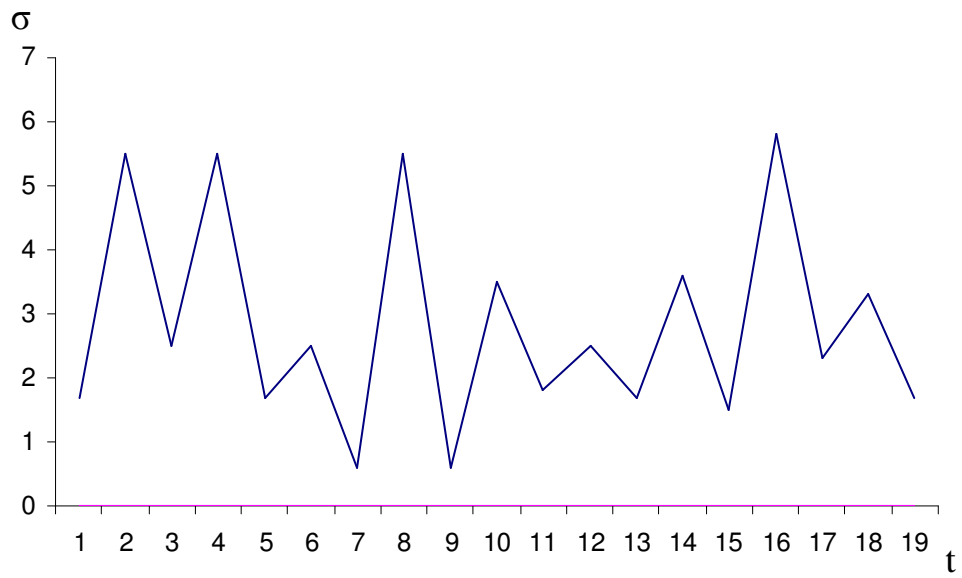
Σχ. 6.13 Μέθοδος ροής της βροχής (Rainflow method).  
 Ιστορικό φόρτισης [12].



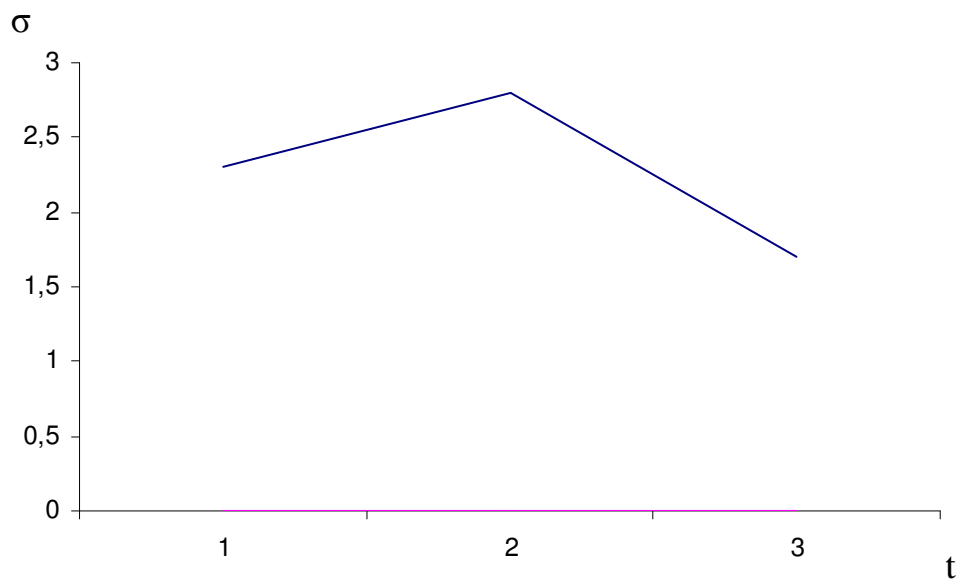
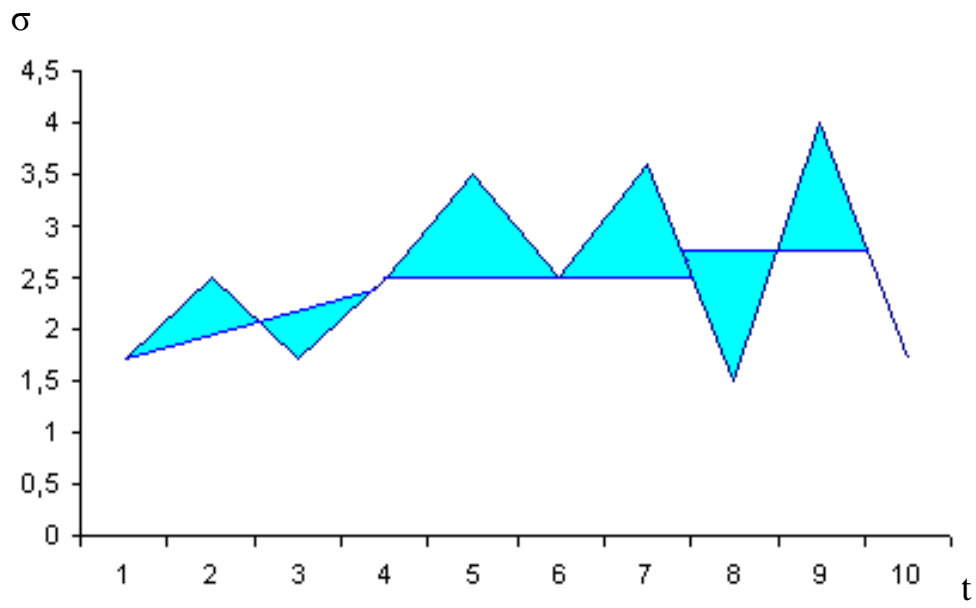




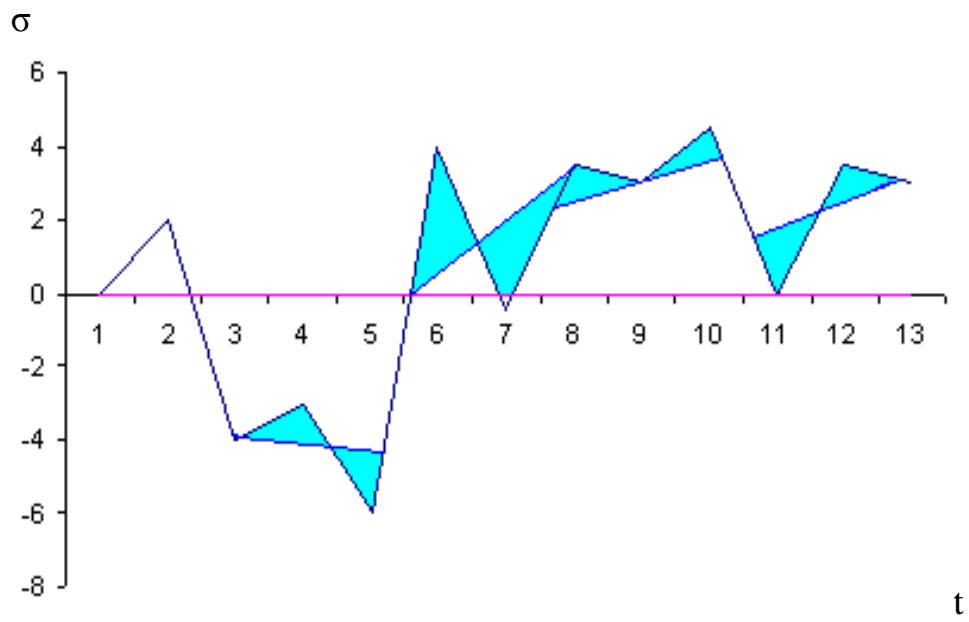
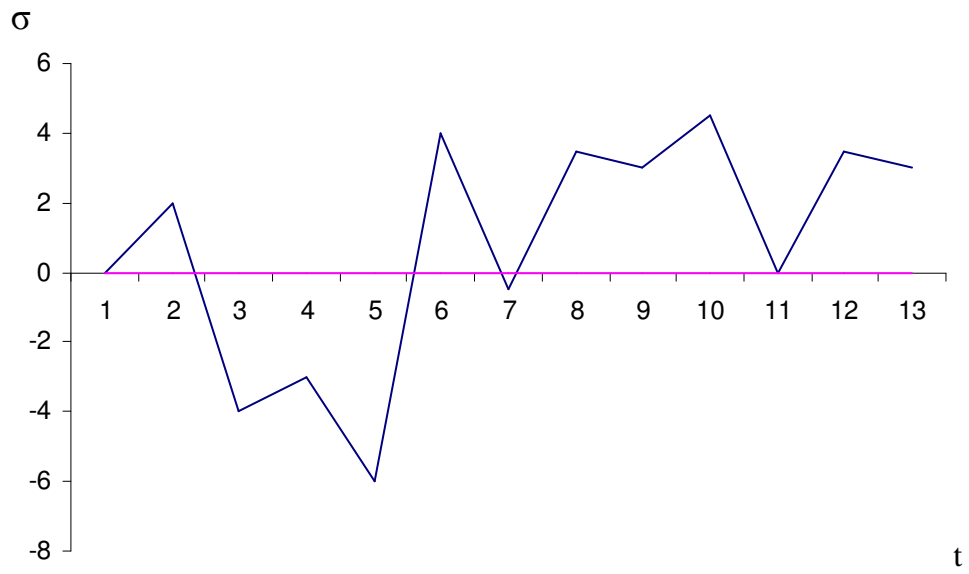
Σχ. 6.14 Μέθοδος μέτρησης κορυφών (Peak Counting).  
 Ιστορικό φόρτισης [15].

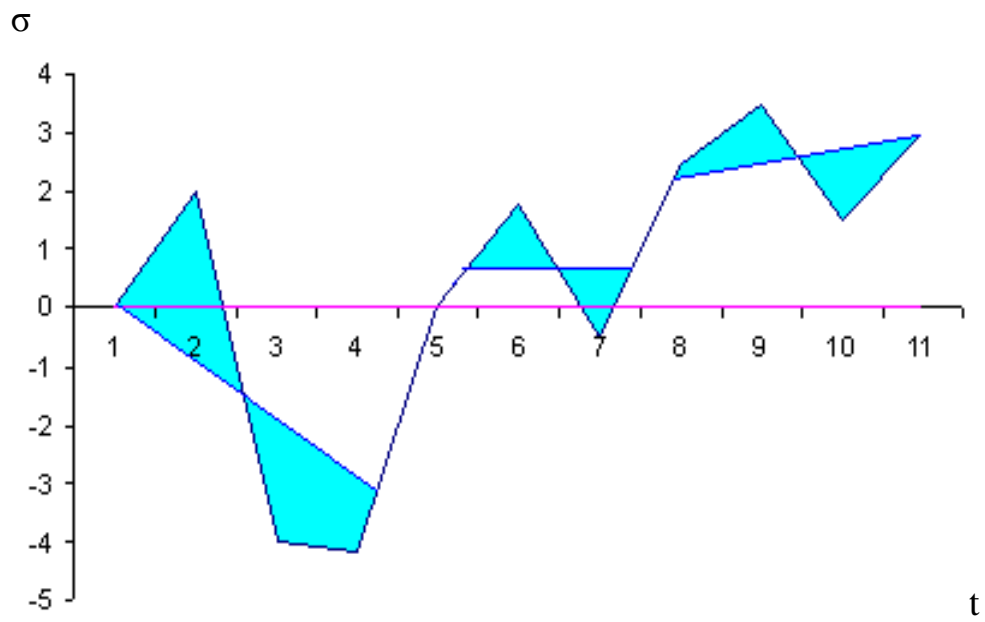
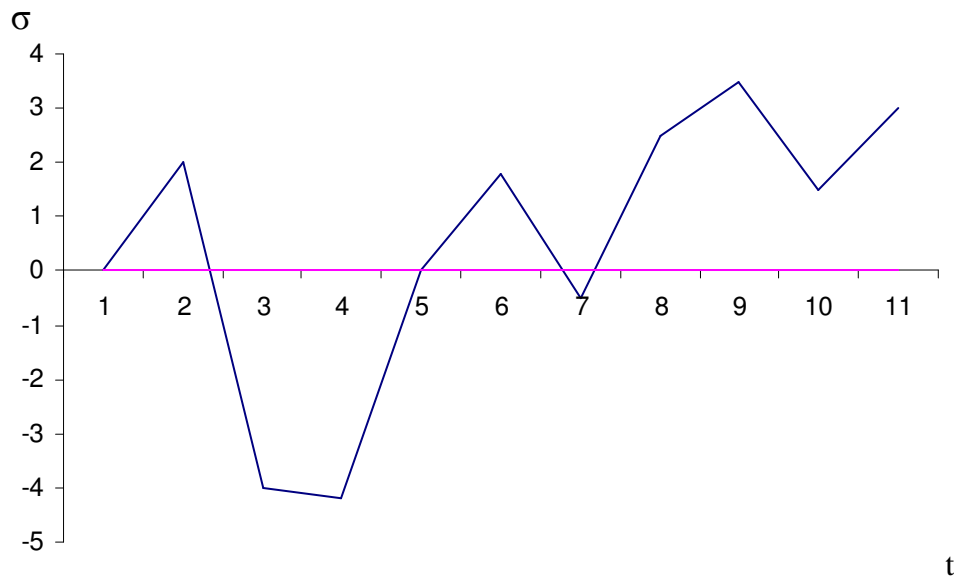


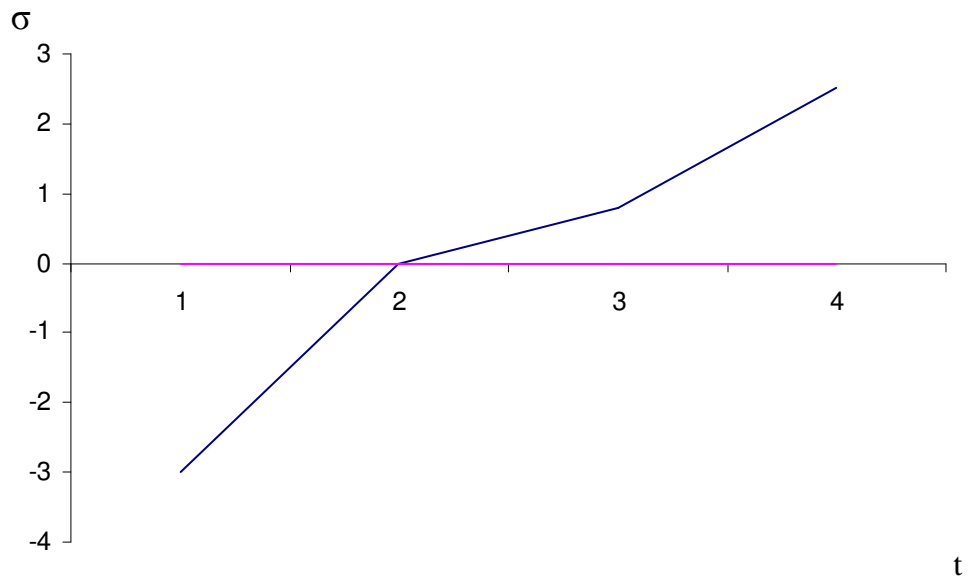




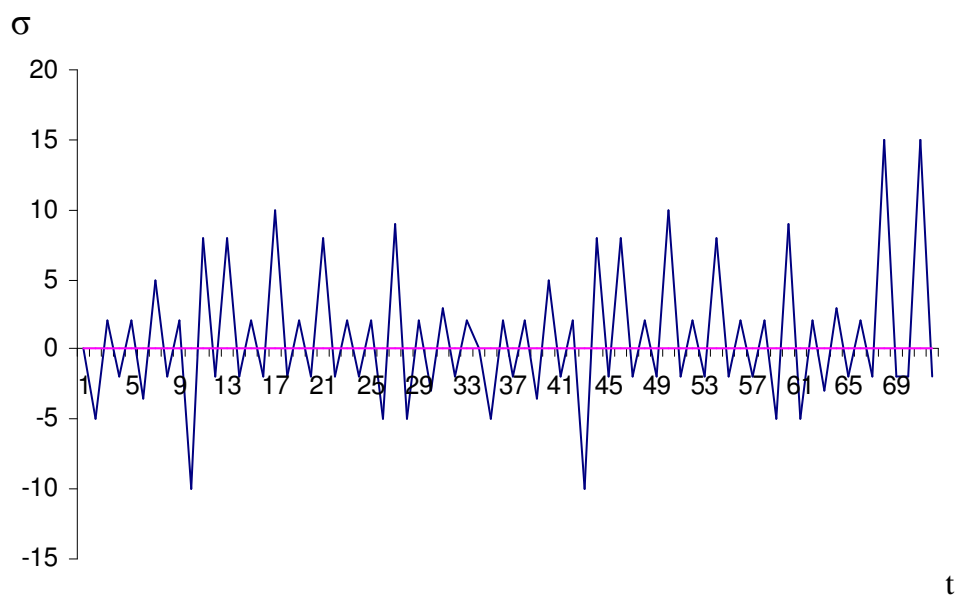
Σχ. 6.15 μέθοδος των ζευγών εύρους (*Range – Pair Method*).  
 Ιστορικό φόρτισης [1].



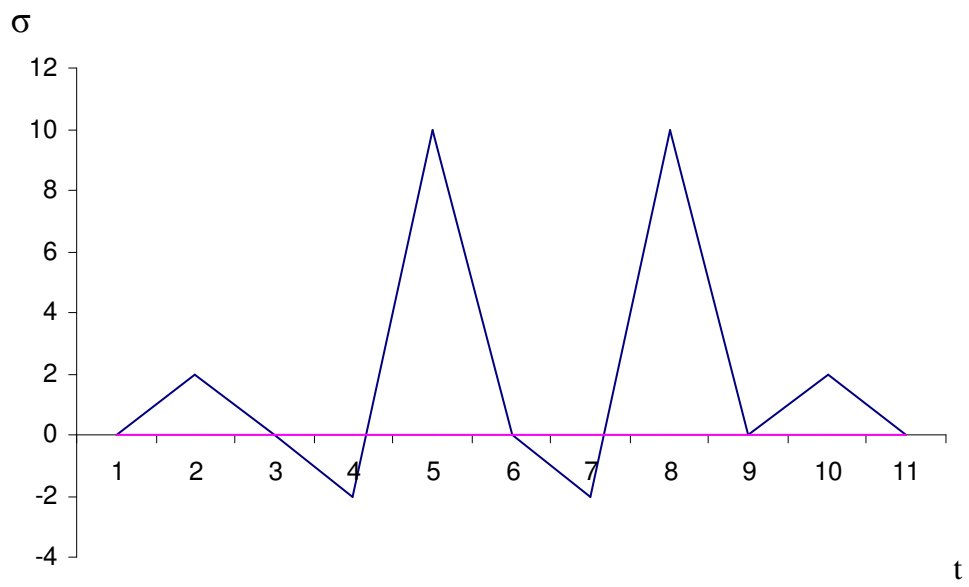
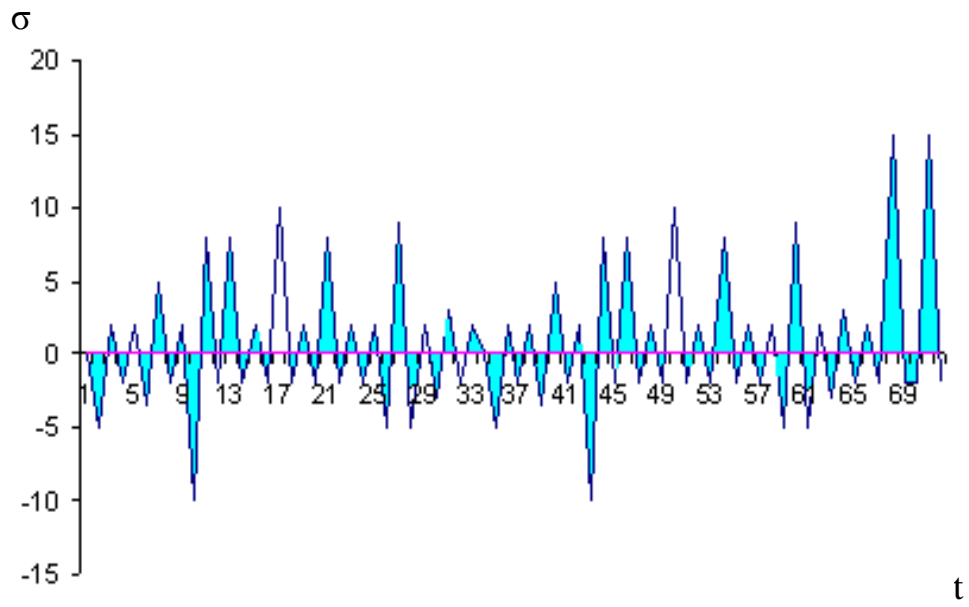


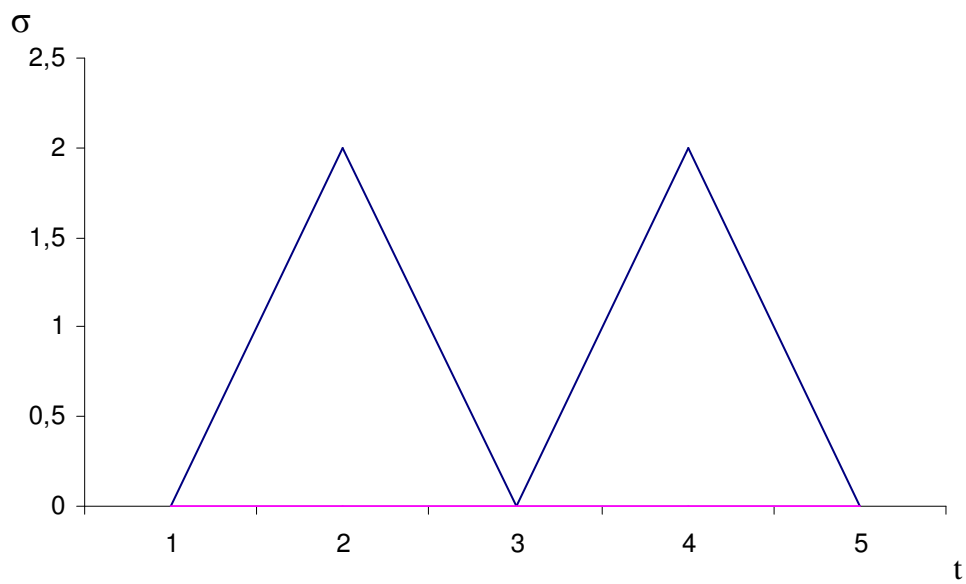
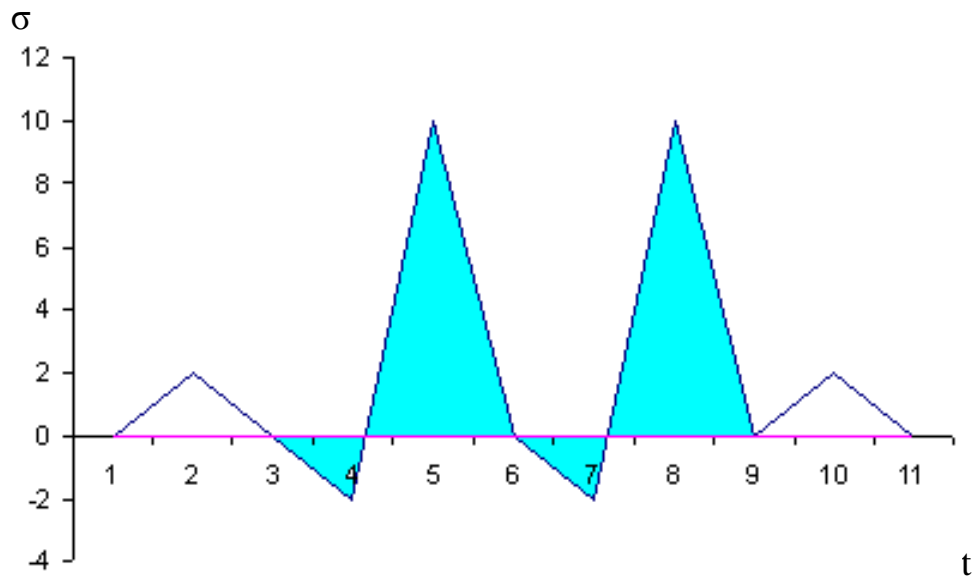


Σχ. 6.16 μέθοδος των ζευγών εύρους (*Range – Pair Method*).  
 Ιστορικό φόρτισης [18].

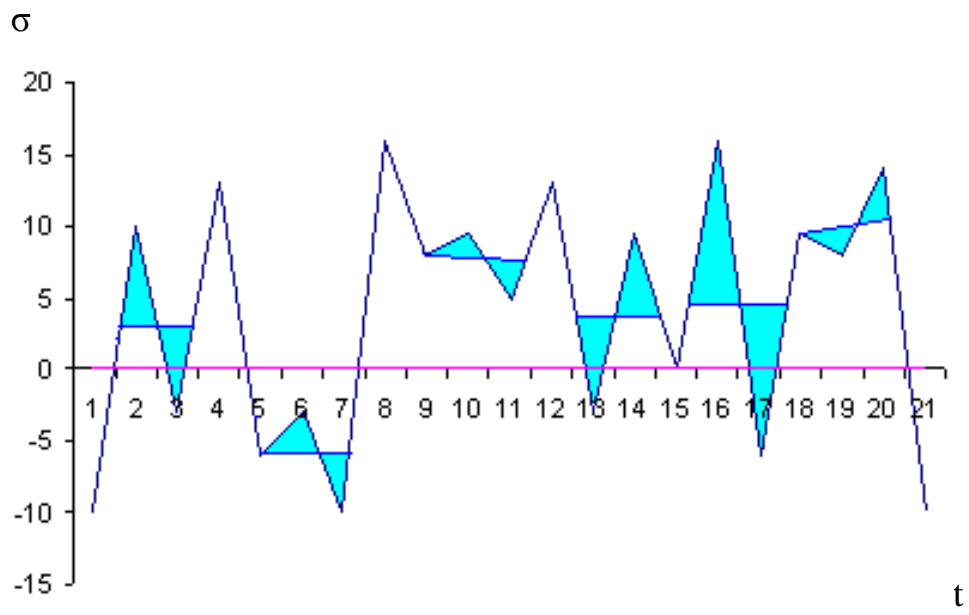
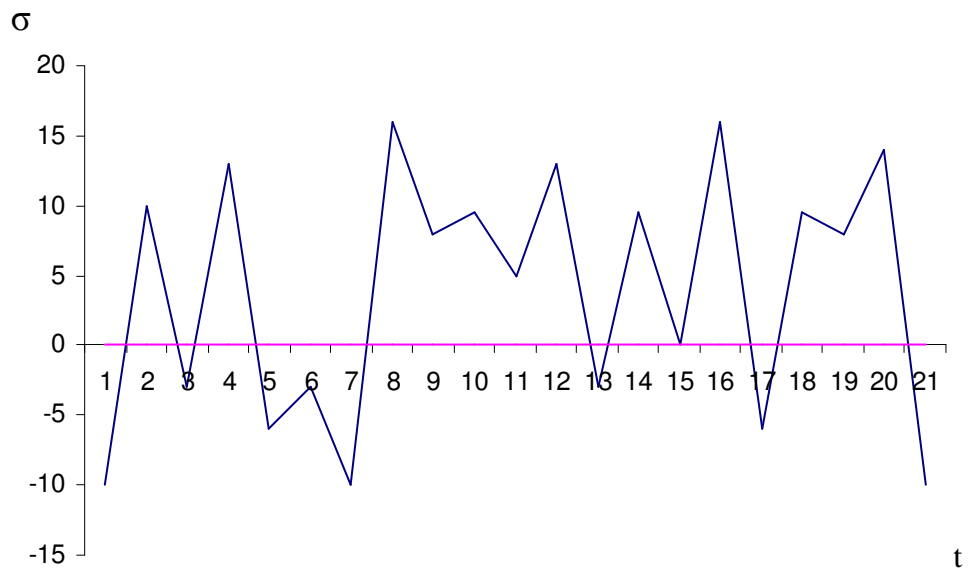


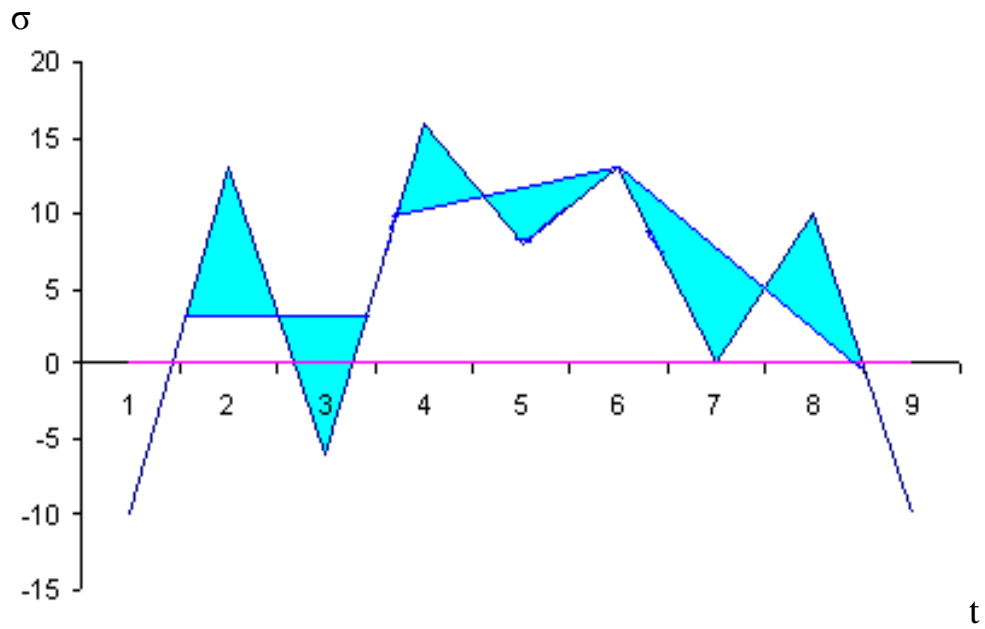
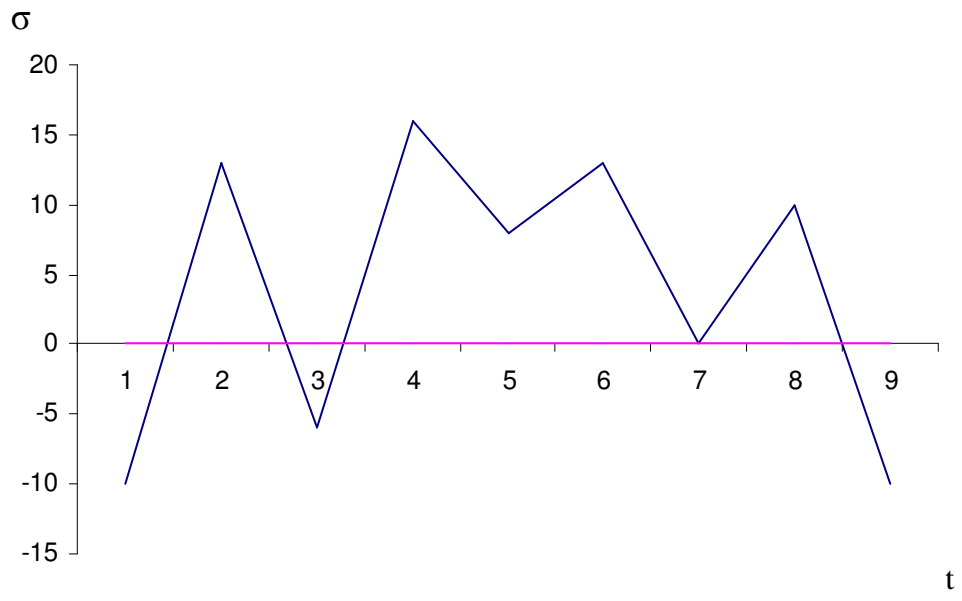
\



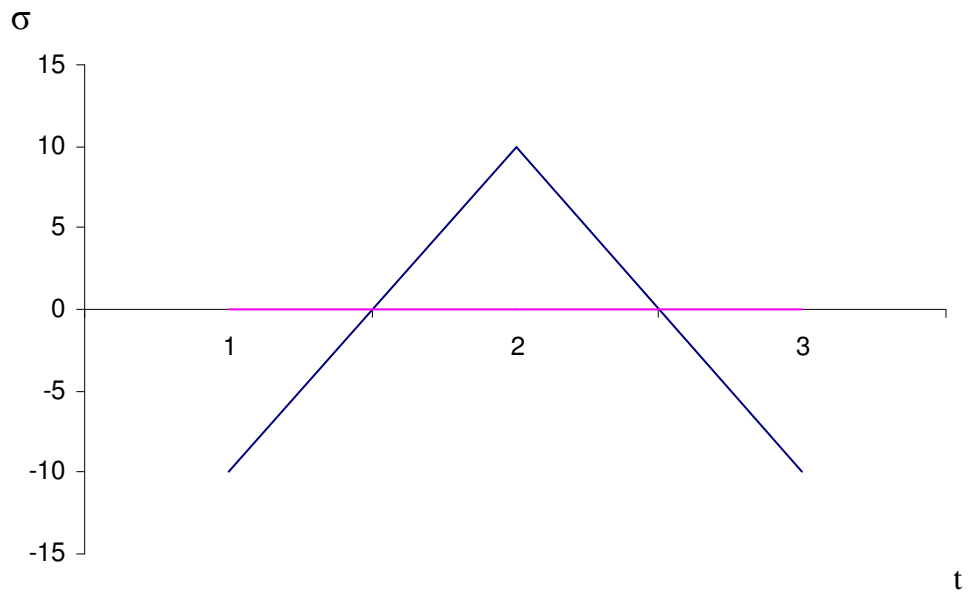


Σχ. 6.17 Μέθοδος των ζευγών εύρους (*Range – Pair Method*).  
 Ιστορικό φόρτισης [6].

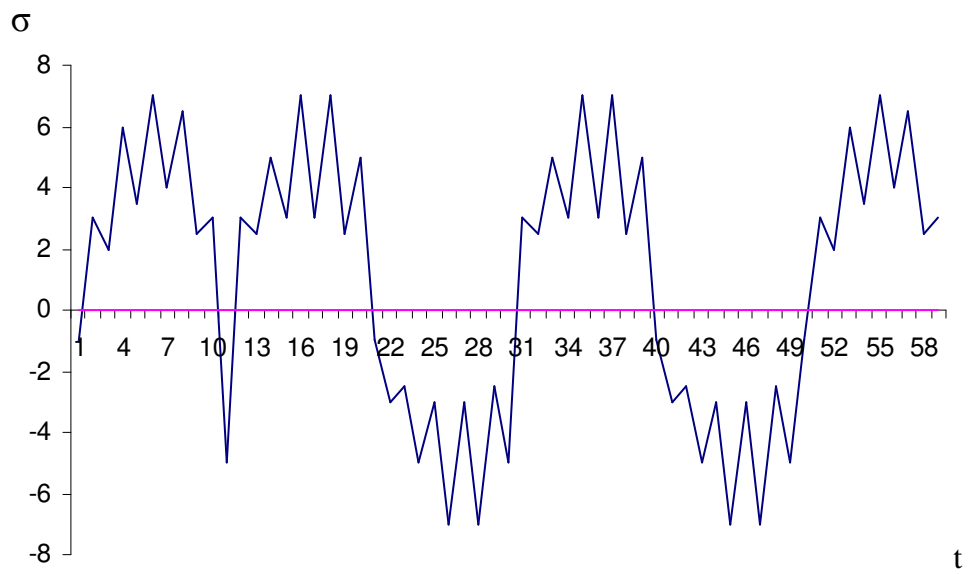


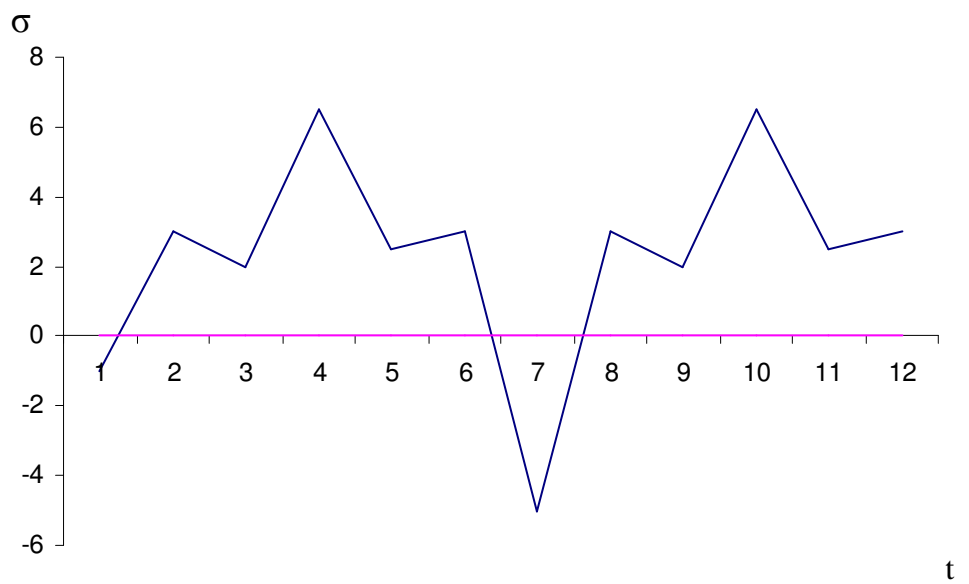
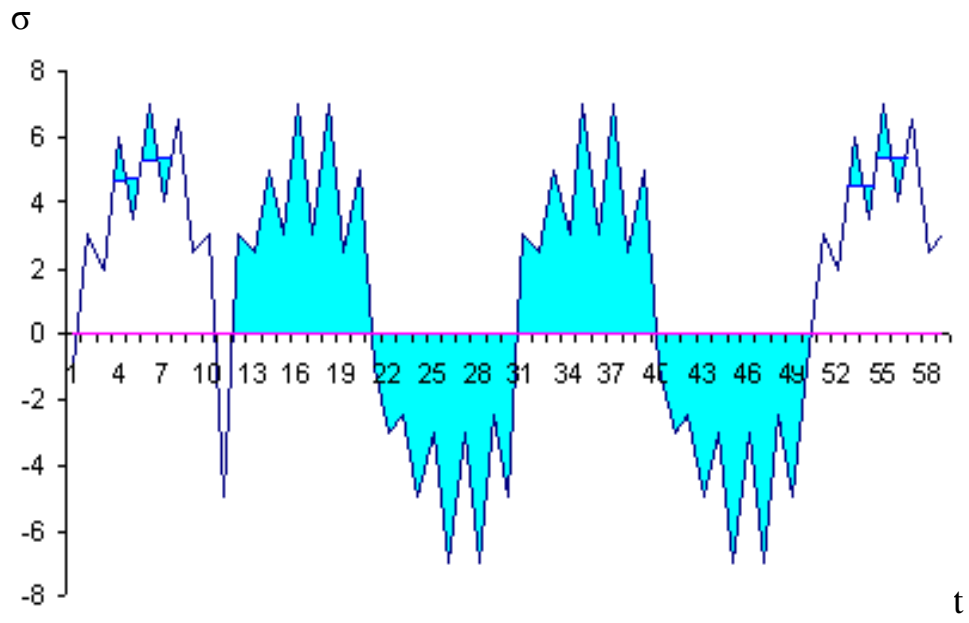


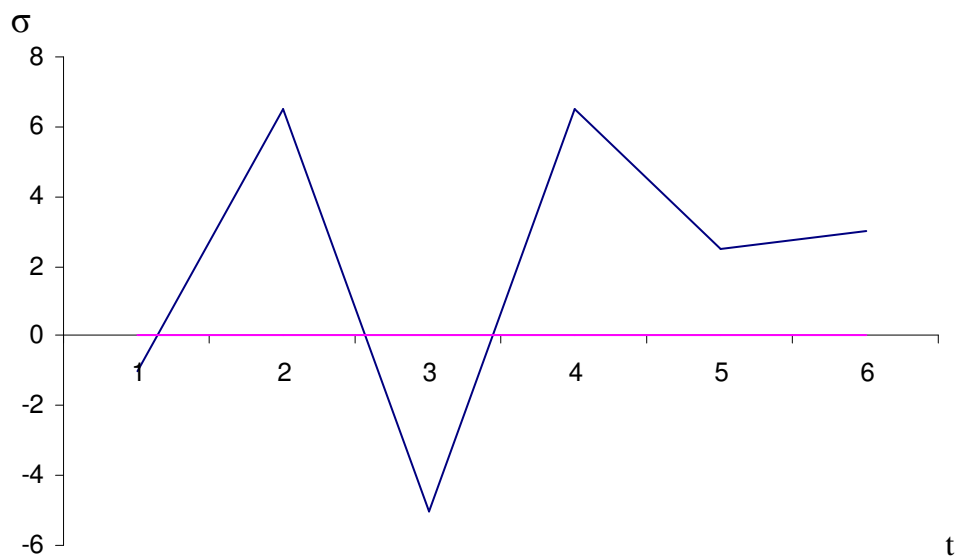
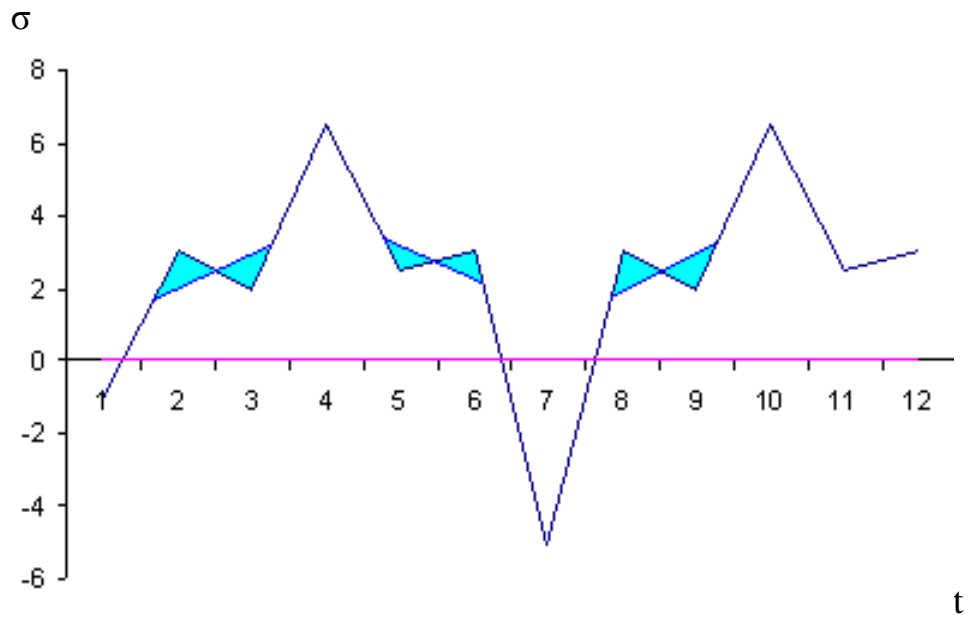




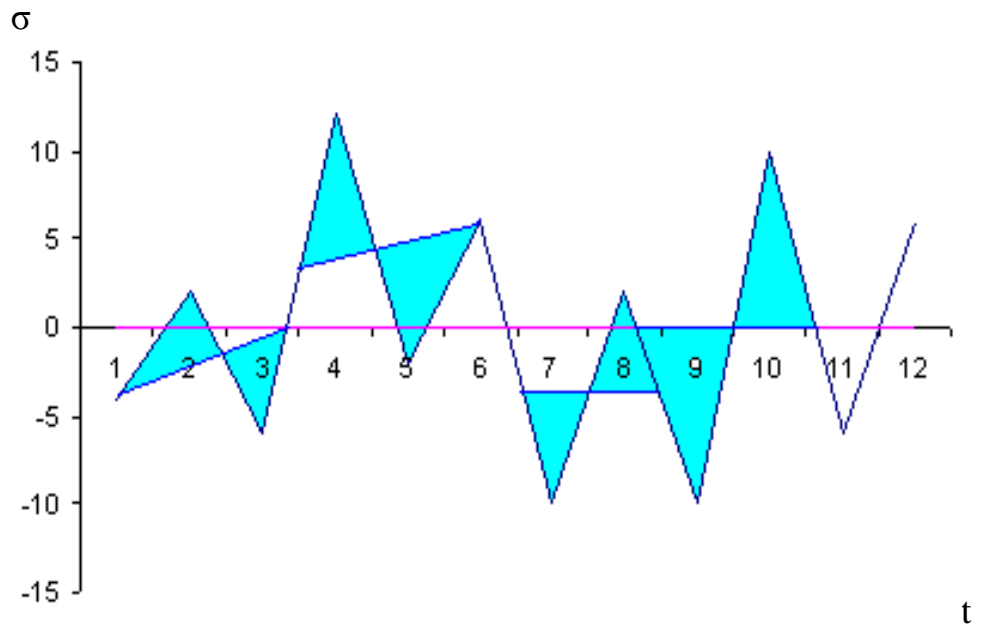
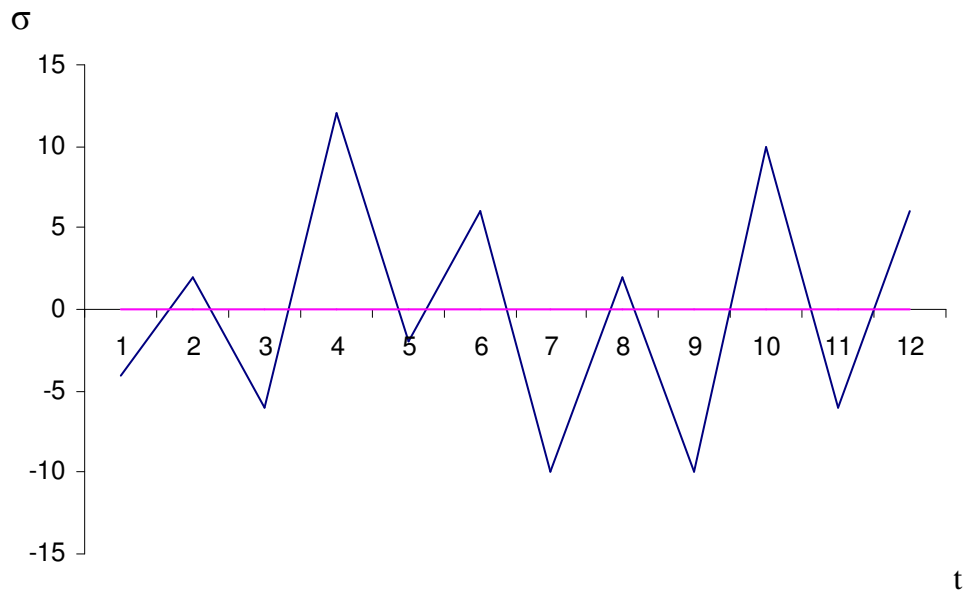
Σχ. 6.18 Μέθοδος ροής της βροχής (Rainflow method).  
 Ιστορικό φόρτισης [22].

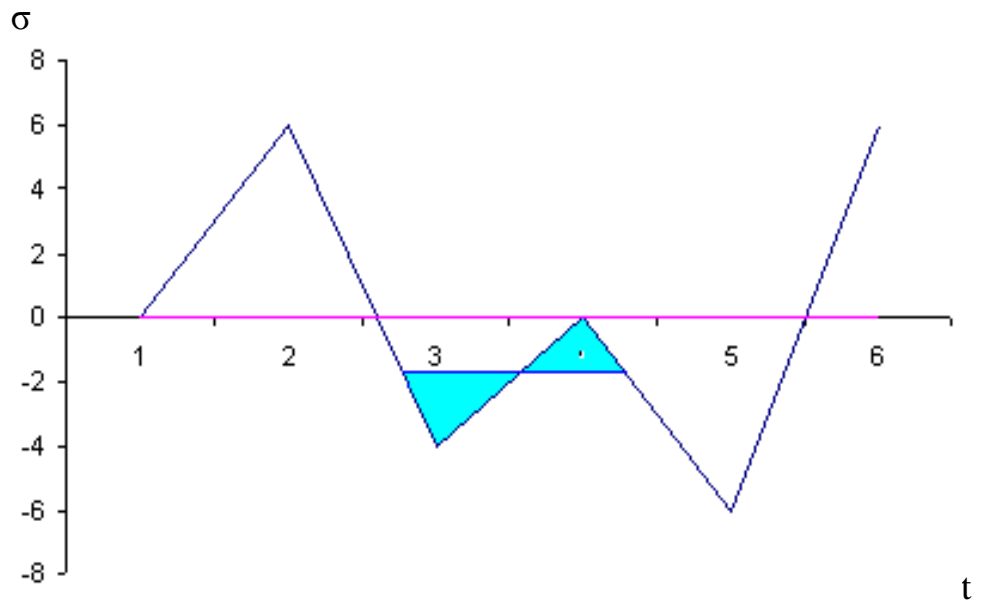
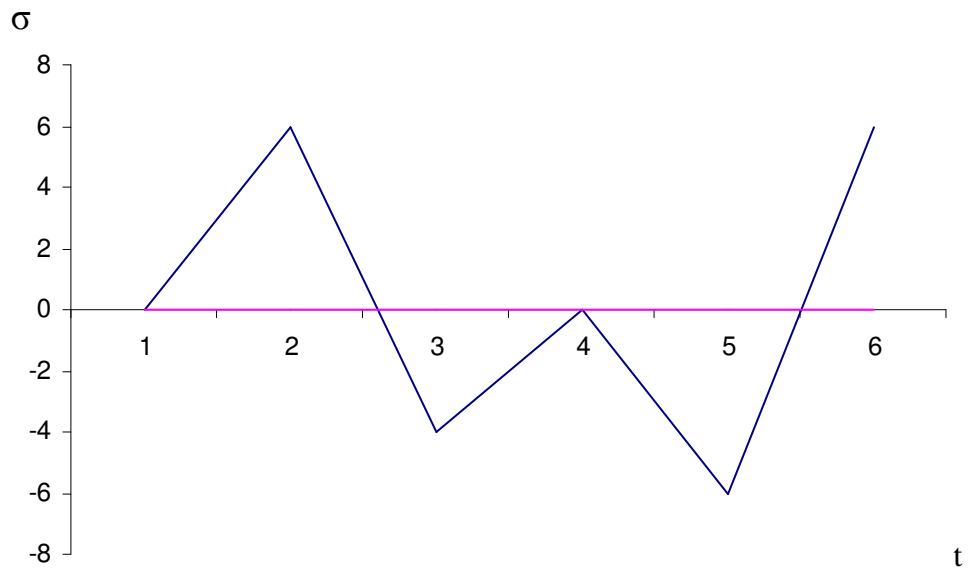




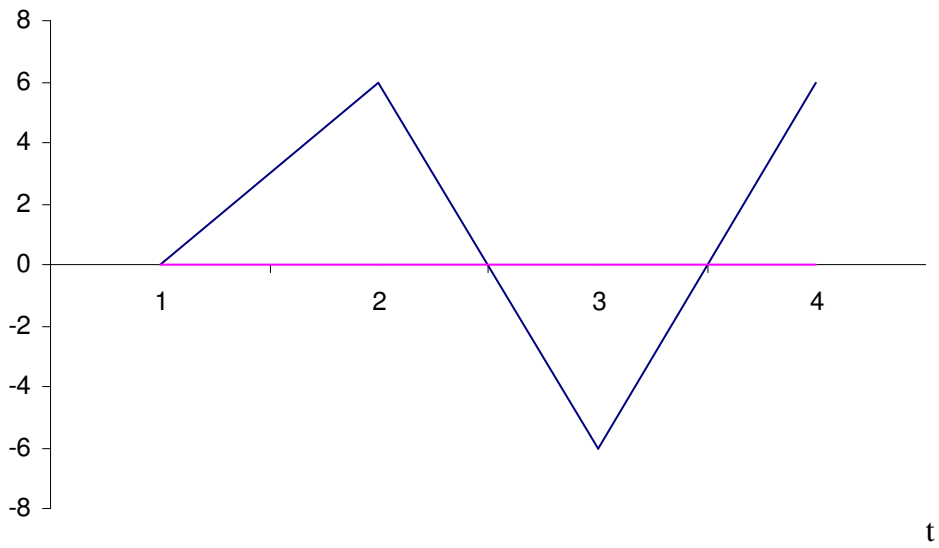


Σχ. 6.19 Μέθοδος των ζευγών εύρους (*Range – Pair Method*).  
 Ιστορικό φόρτισης [13].

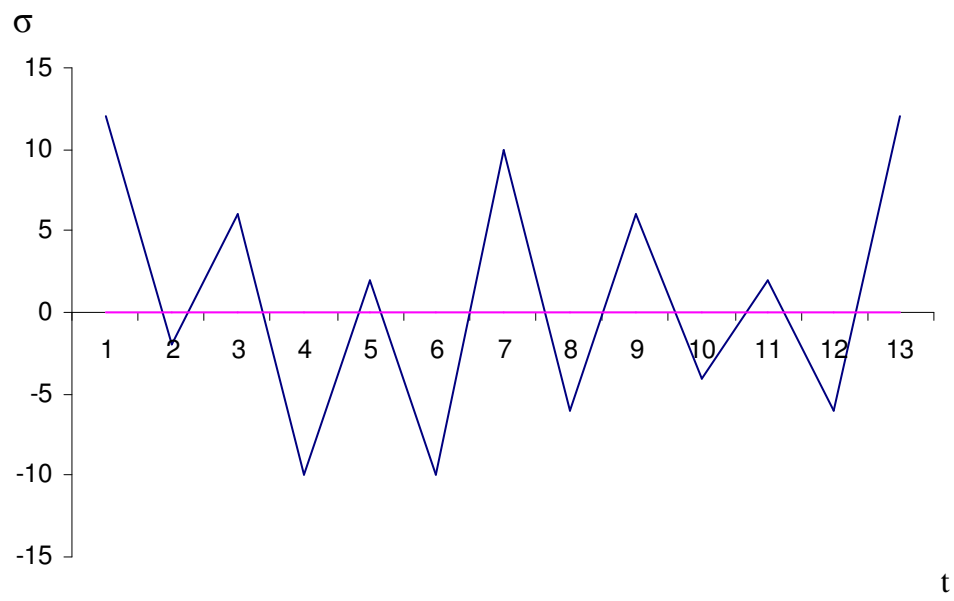


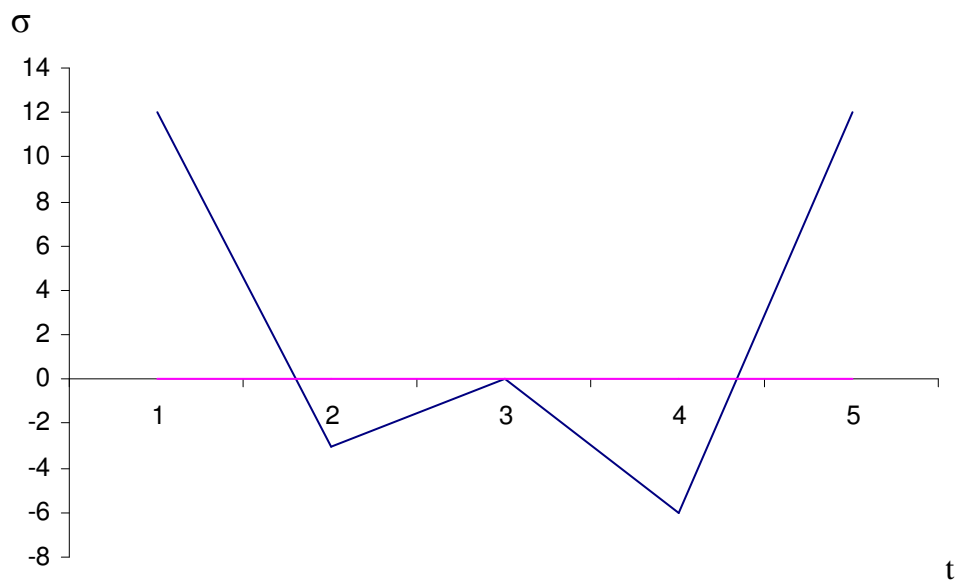
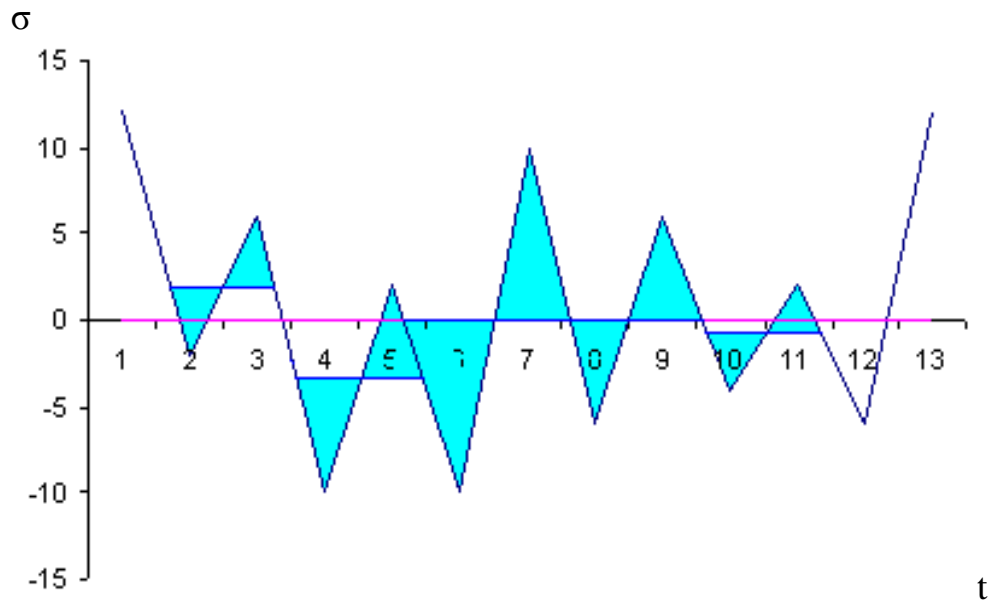


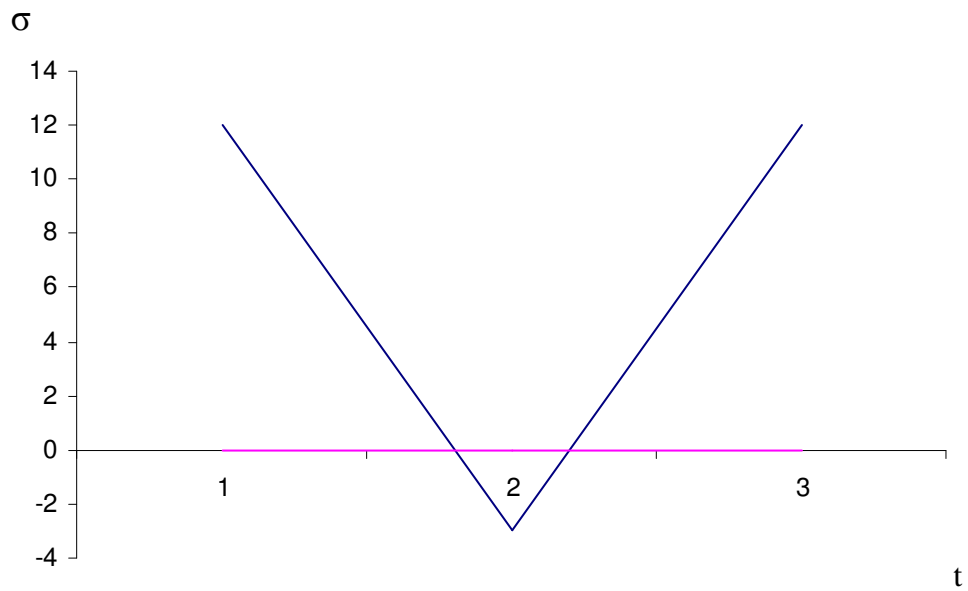
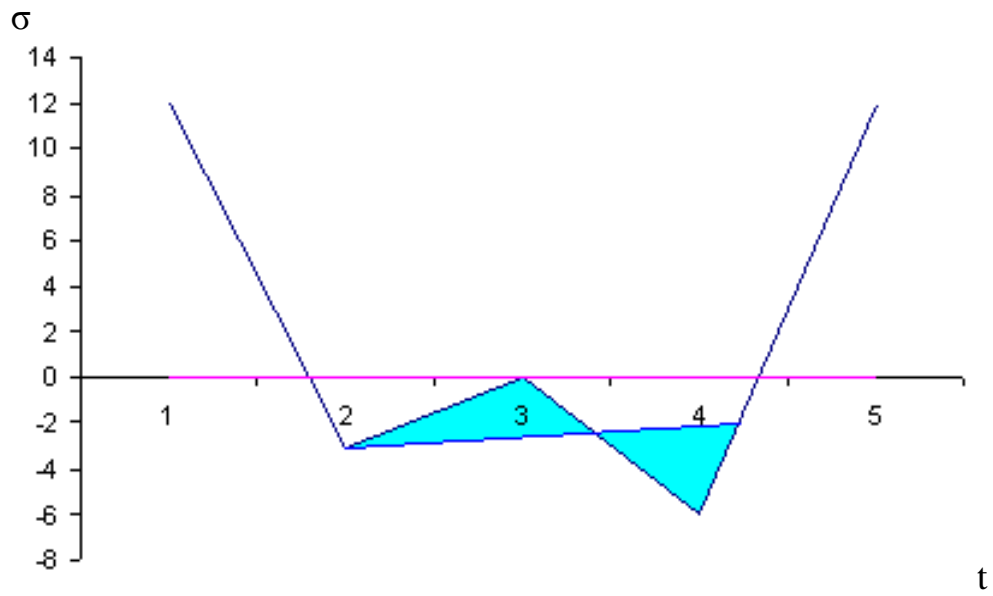
$\sigma$



Σχ. 6.20 Μέθοδος μέτρησης κορυφών (*Peak Counting*).  
 Ιστορικό φόρτισης [17].

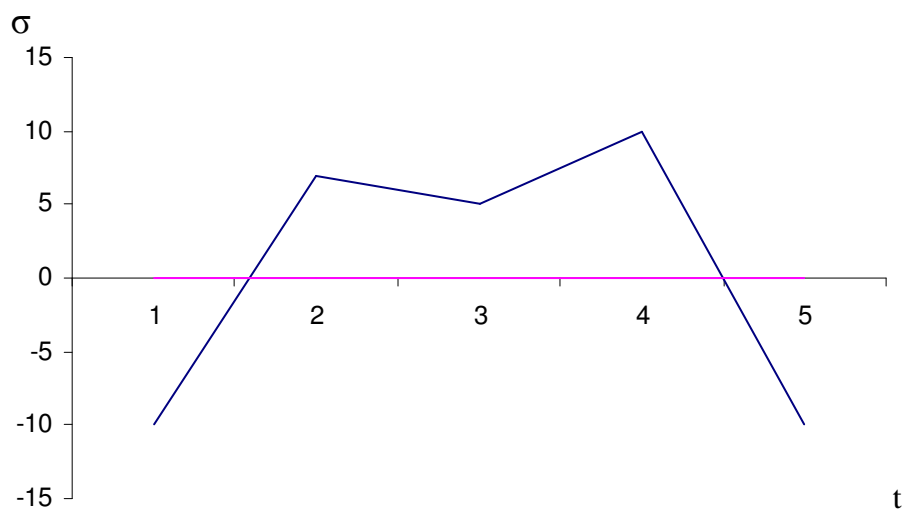
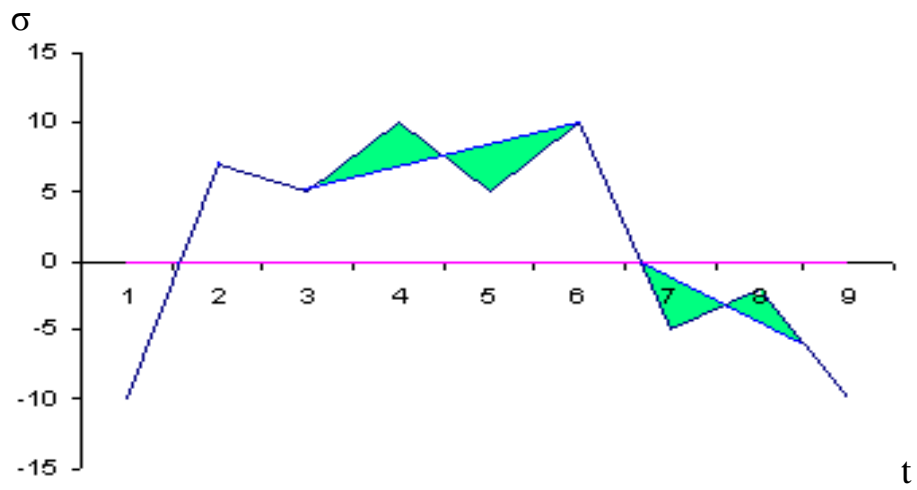
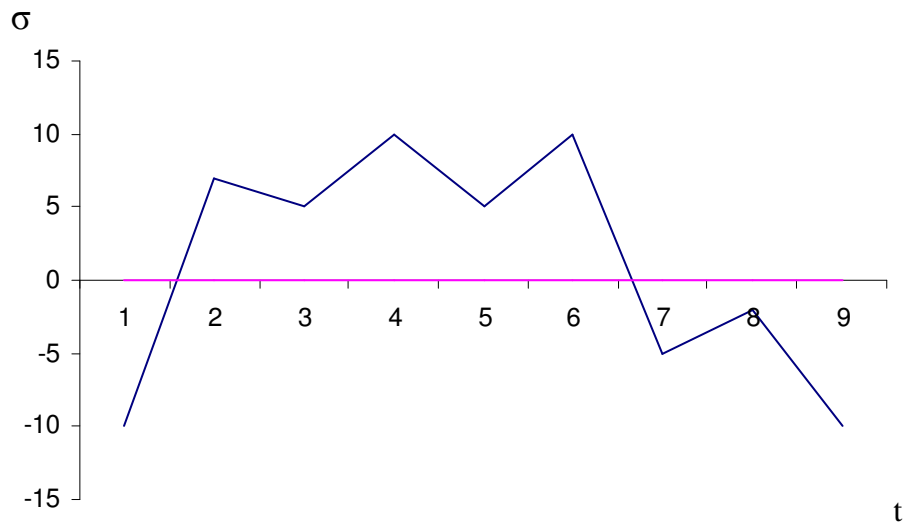


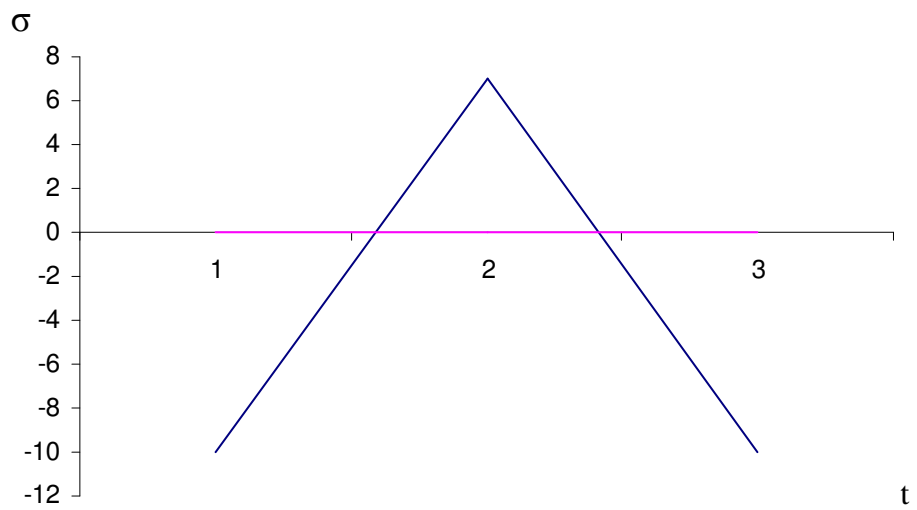
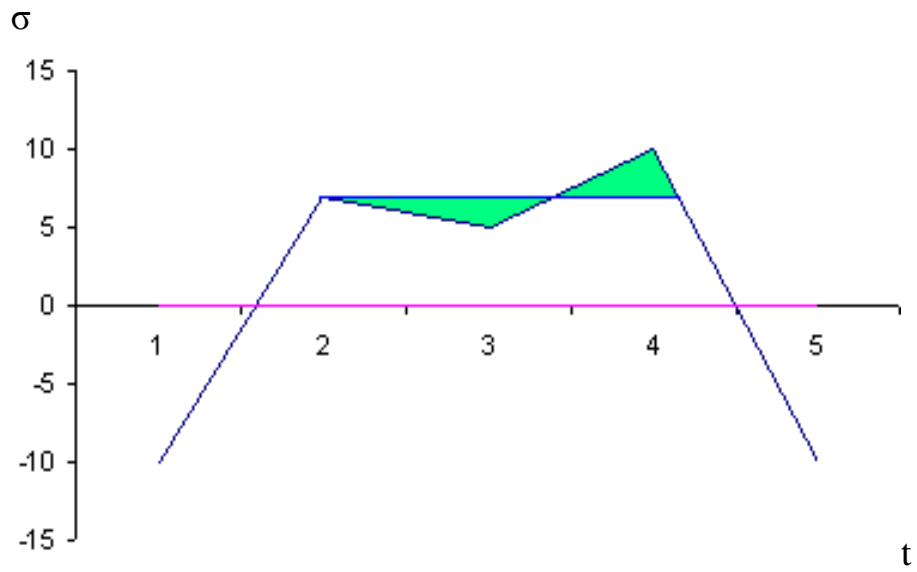




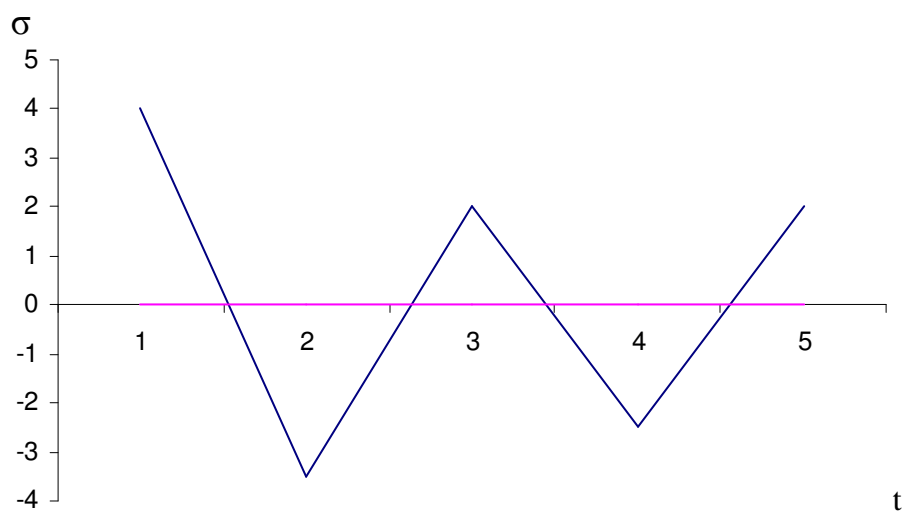
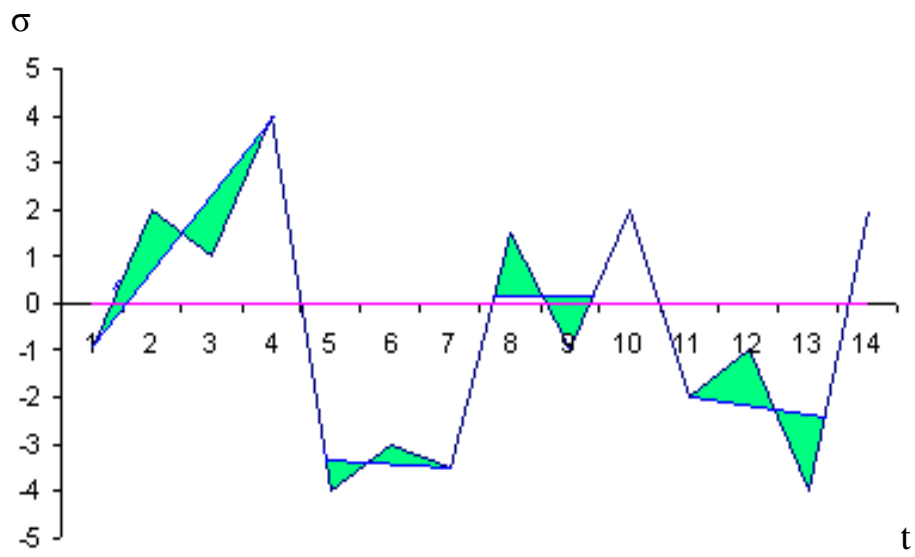
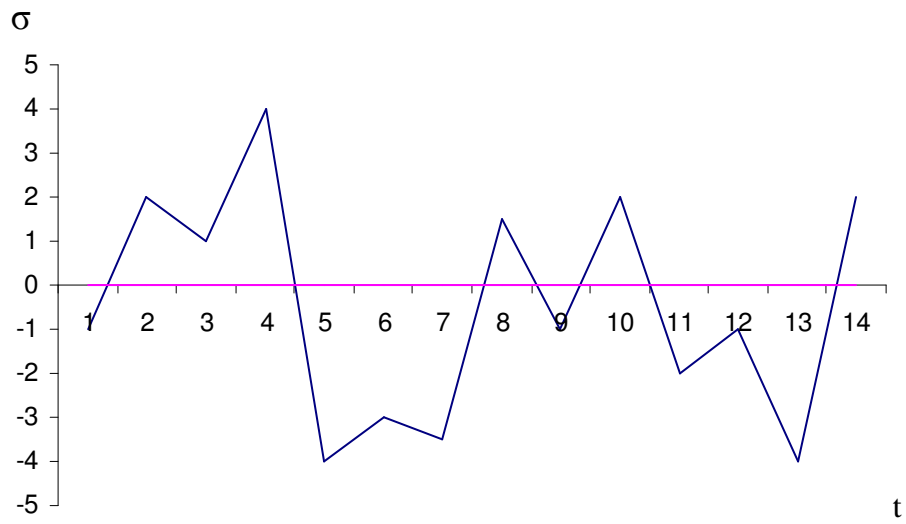
Σχ. 6.21 Μέθοδος ροής της βροχής (Rainflow method).  
 Ιστορικό φόρτισης [10].

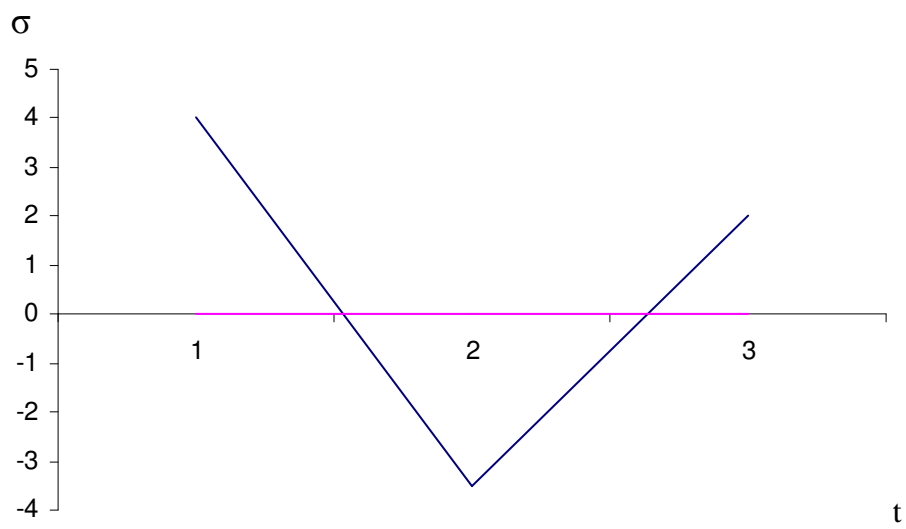
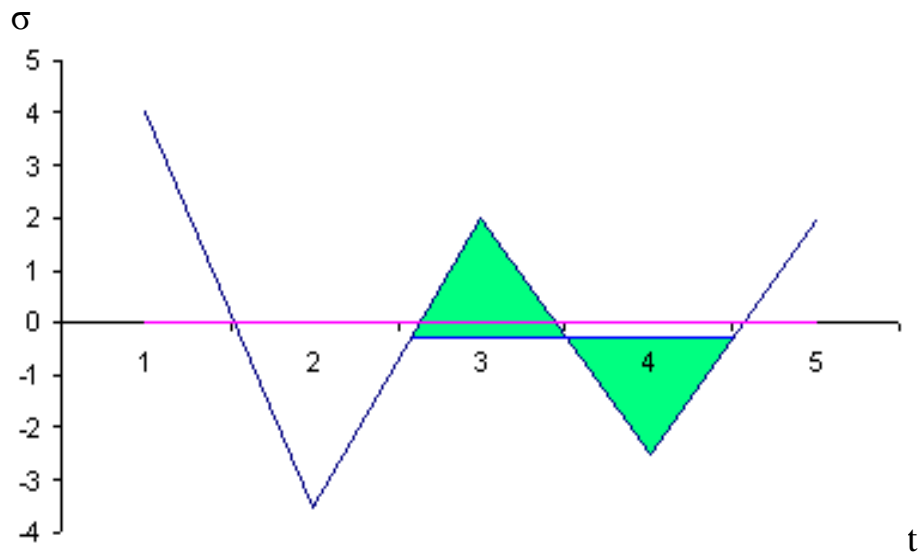




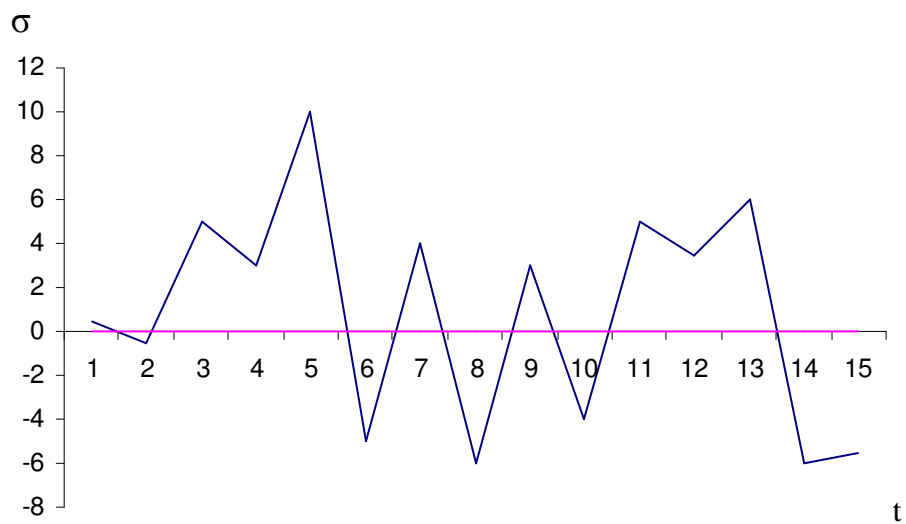


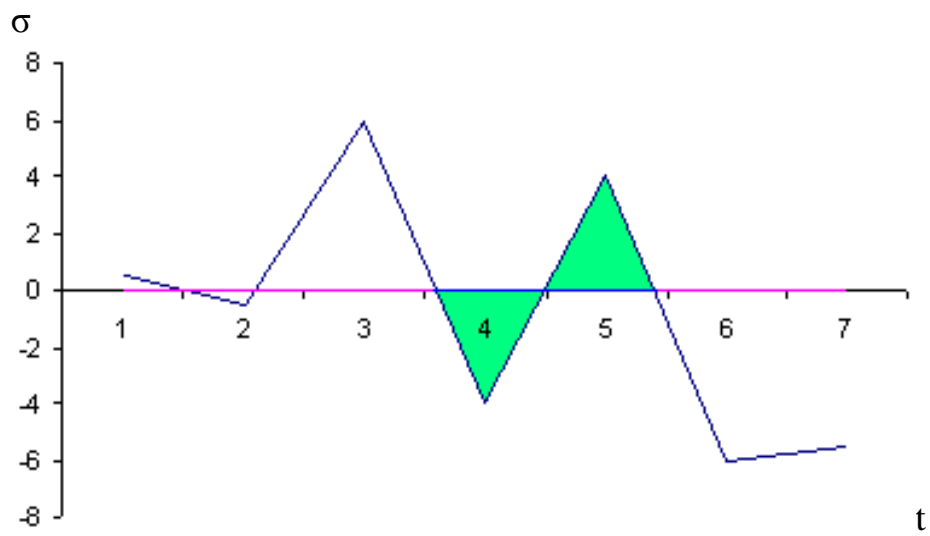
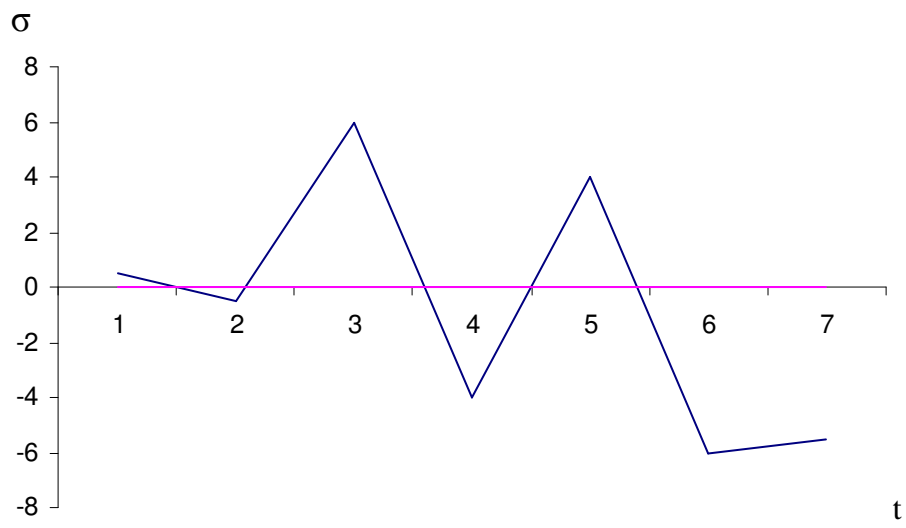
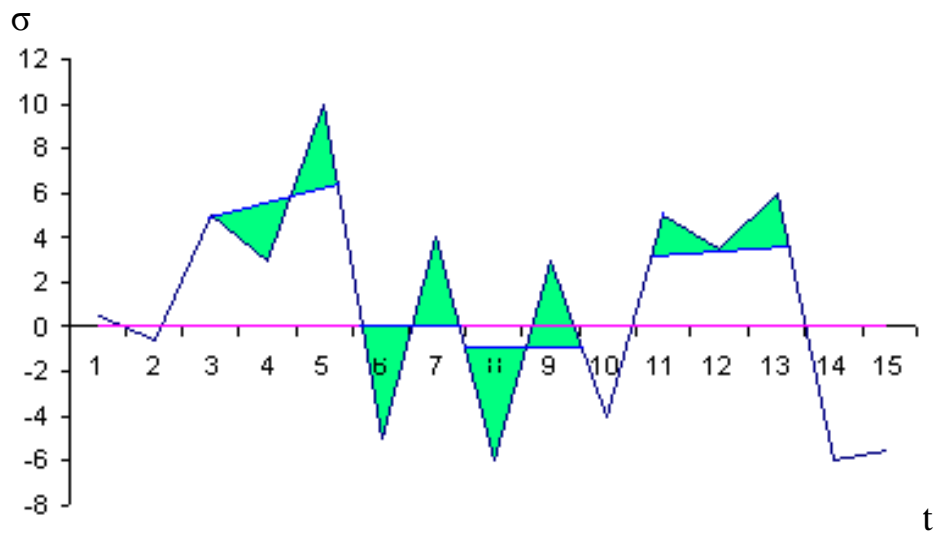
Σχ. 6.22 Μέθοδος των ζευγών εύρους (*Range – Pair Method*).  
 Ιστορικό φόρτισης [25].

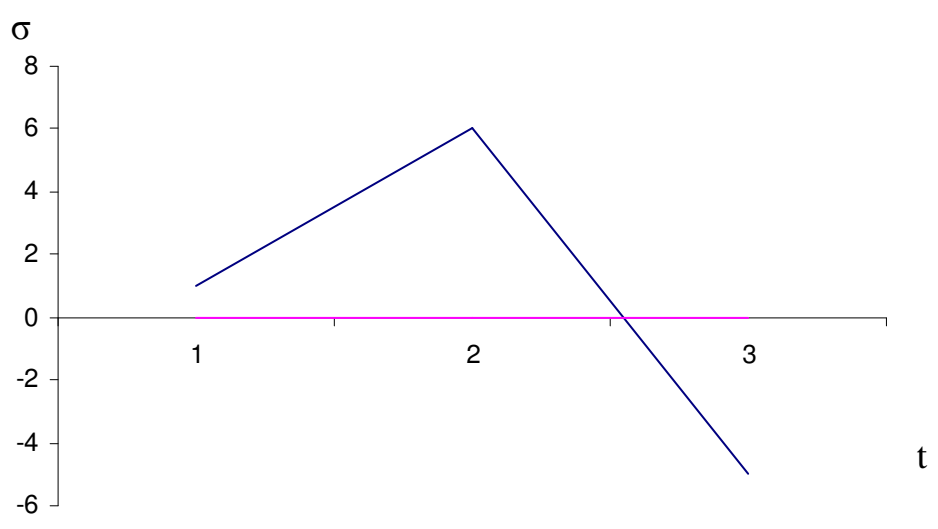
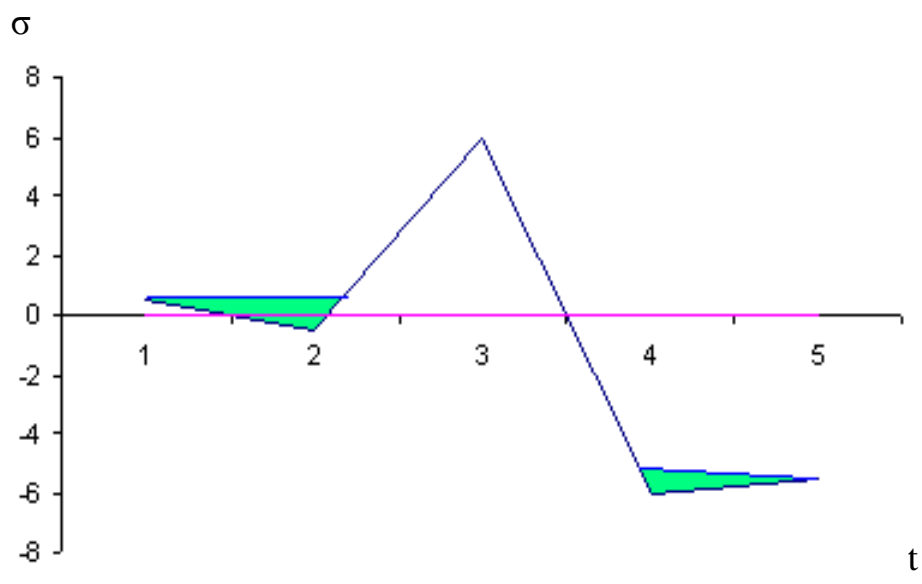
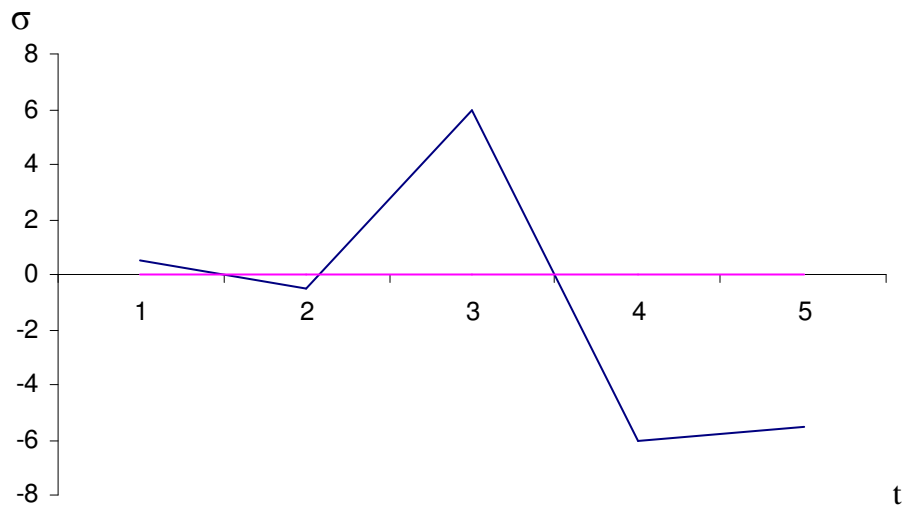




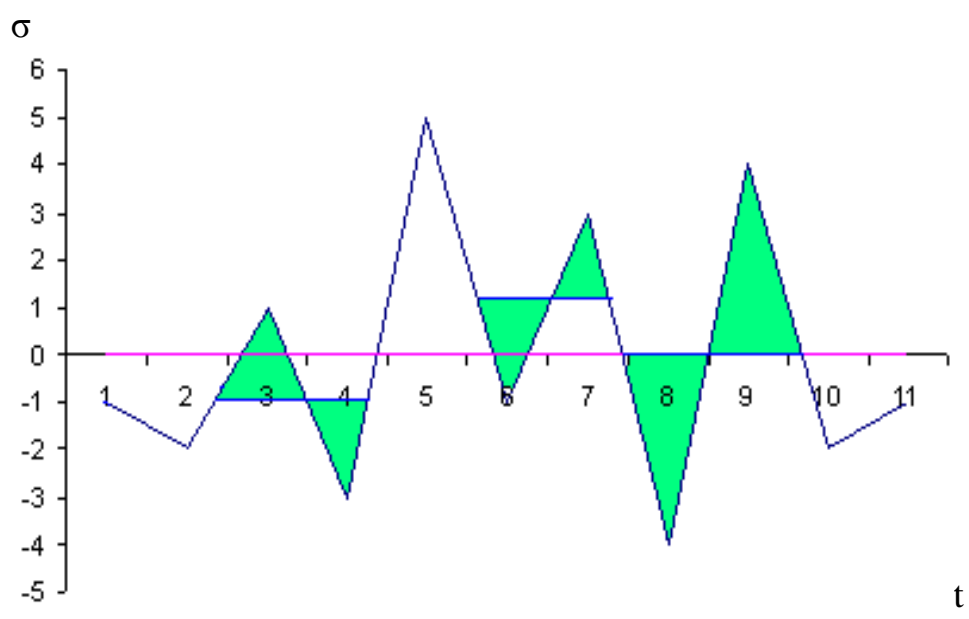
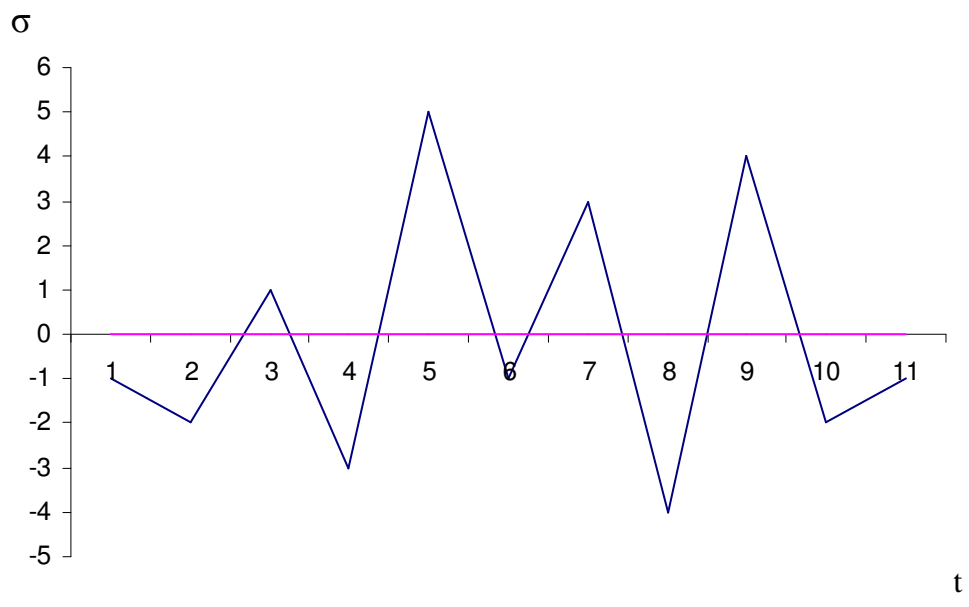
Σχ. 6.23 Μέθοδος απλής μέτρησης εύρους (Simple Range Method).  
 Ιστορικό φόρτισης [11].

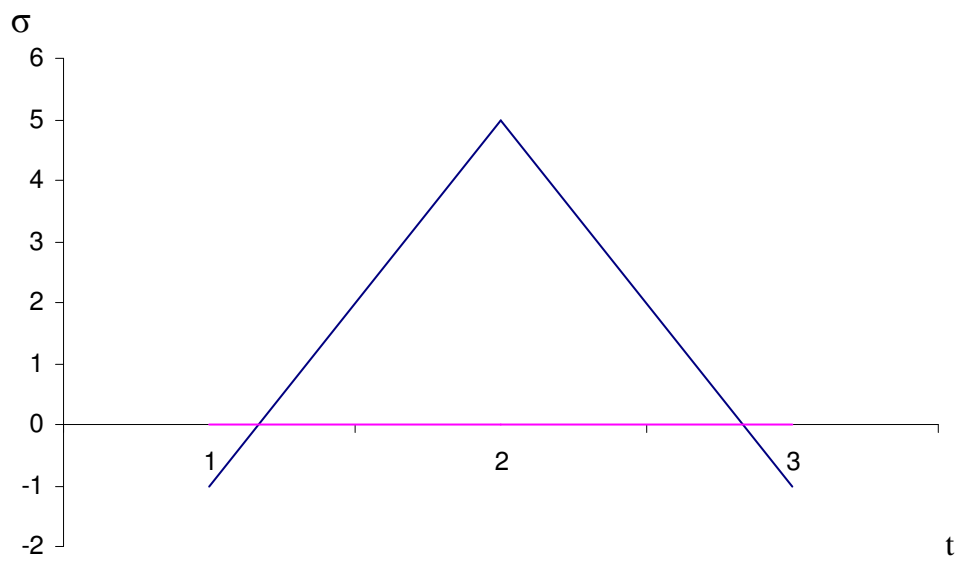
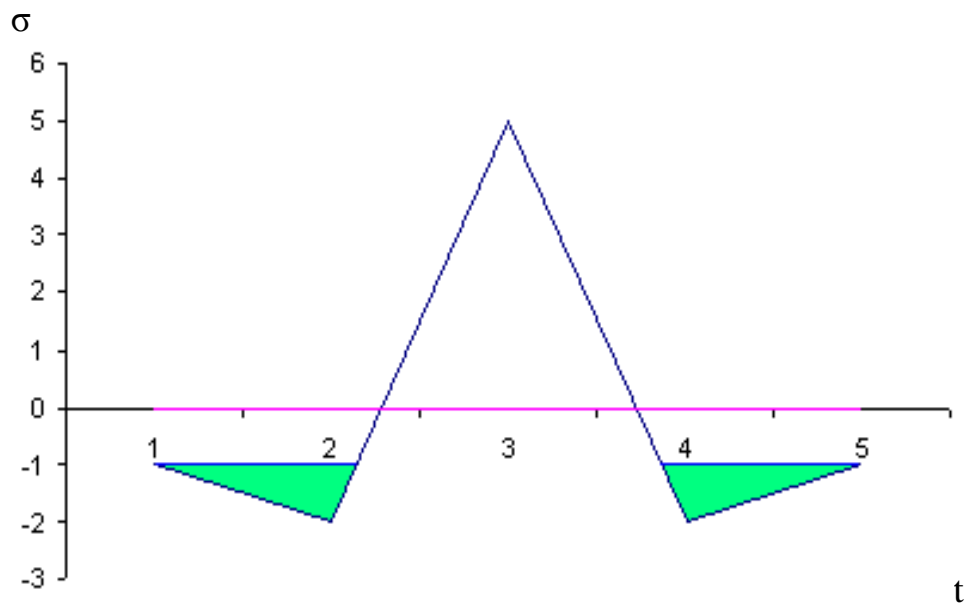
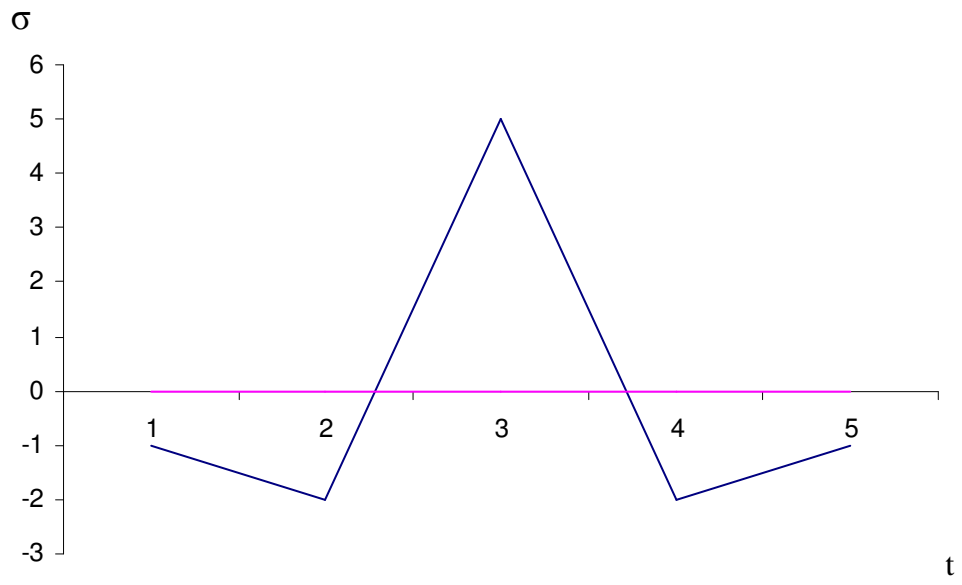






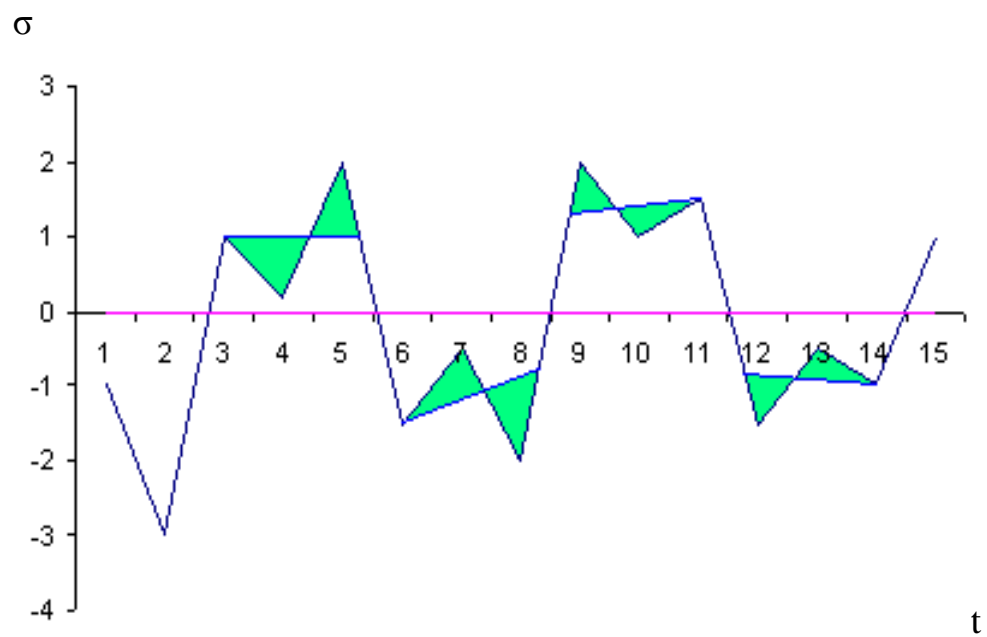
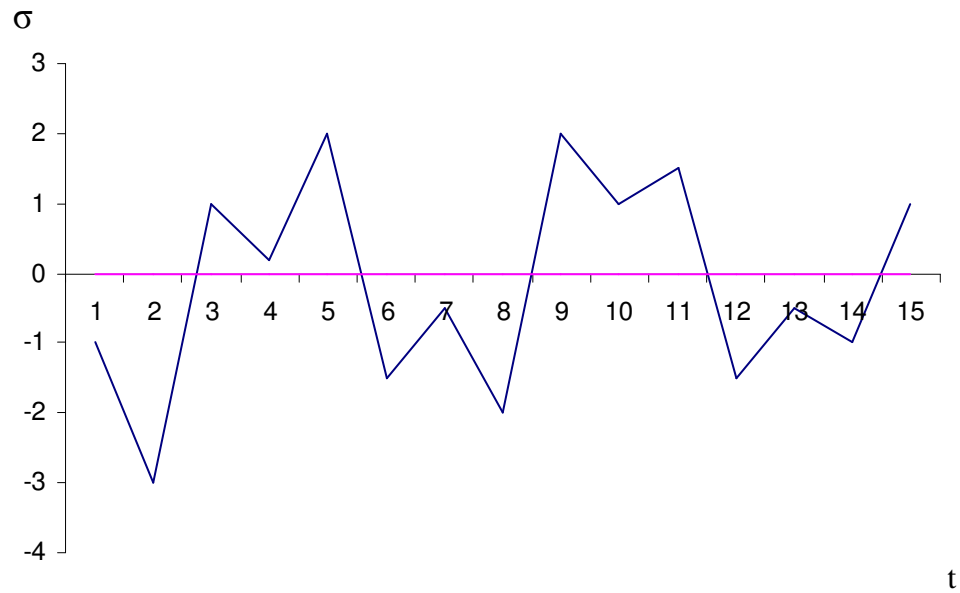
Σχ. 6.24 Μέθοδος απλής μέτρησης εύρους (Simple Range Counting).  
 Ιστορικό φόρτισης [15].

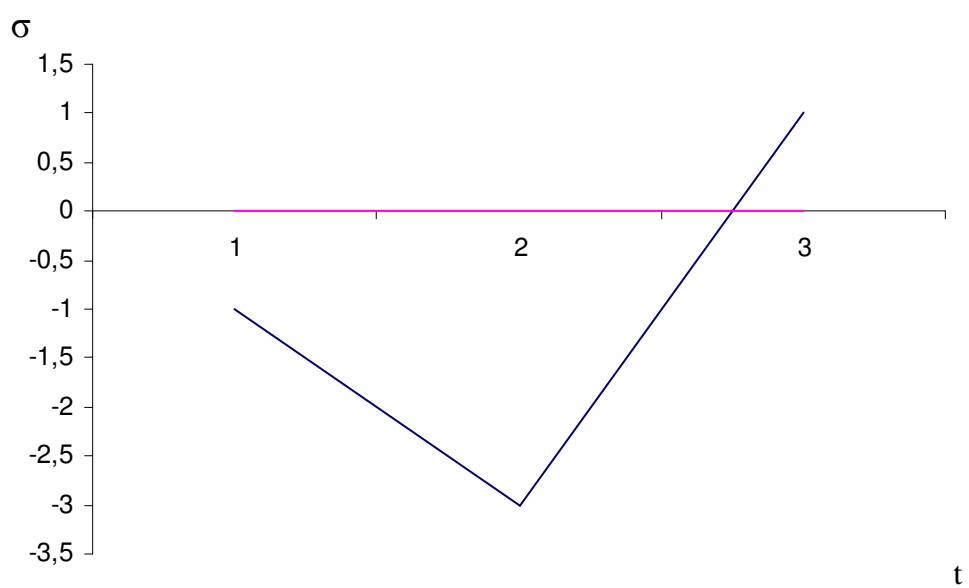
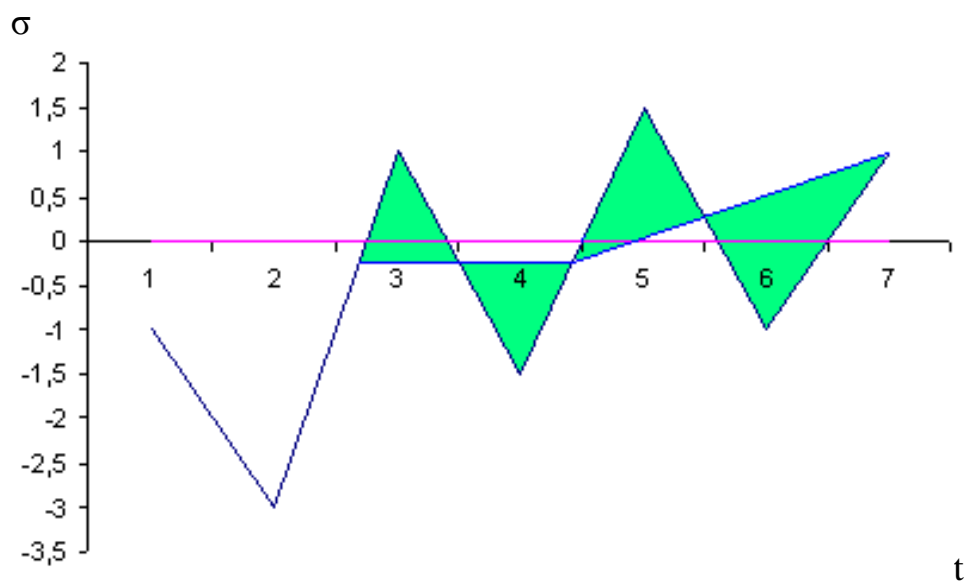
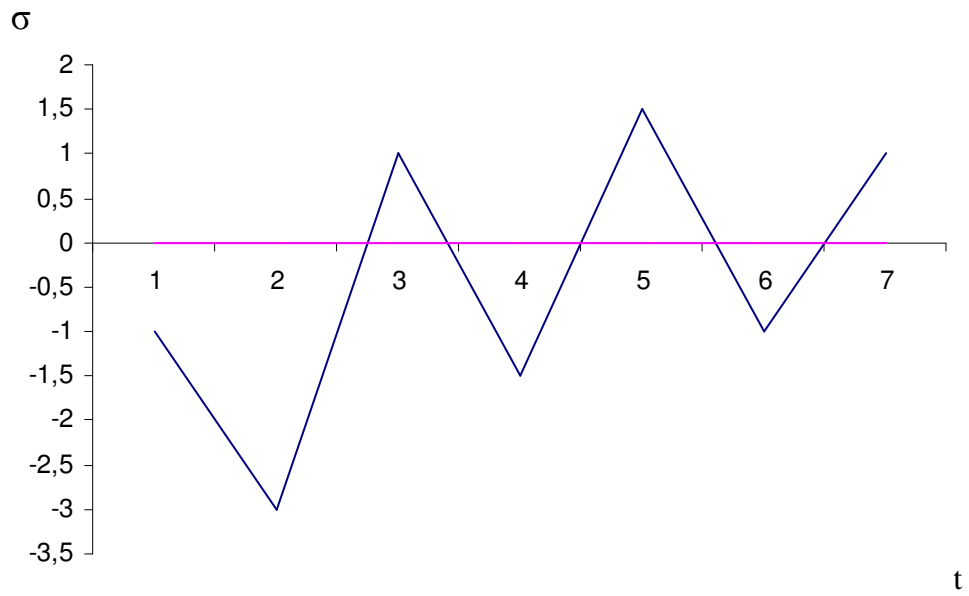






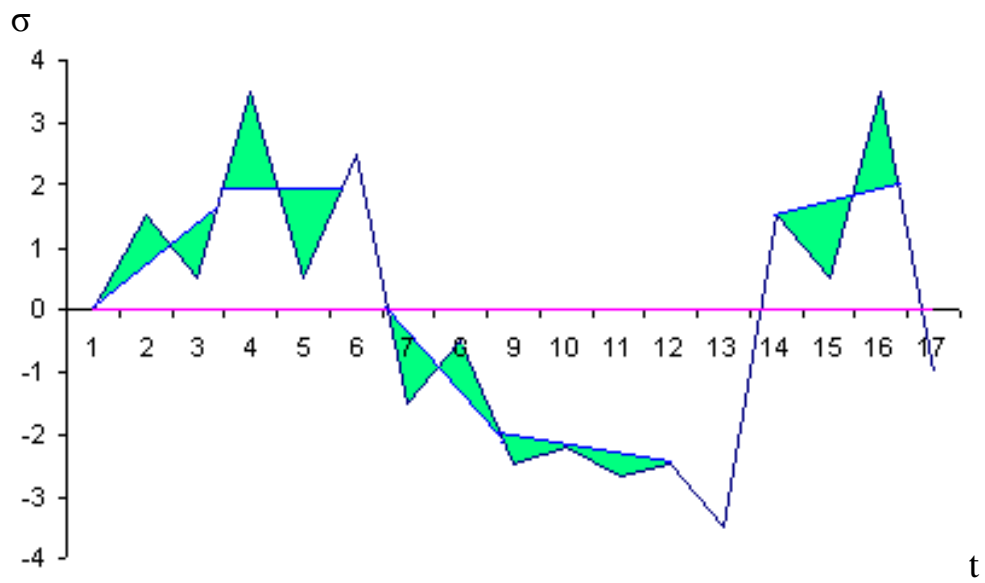
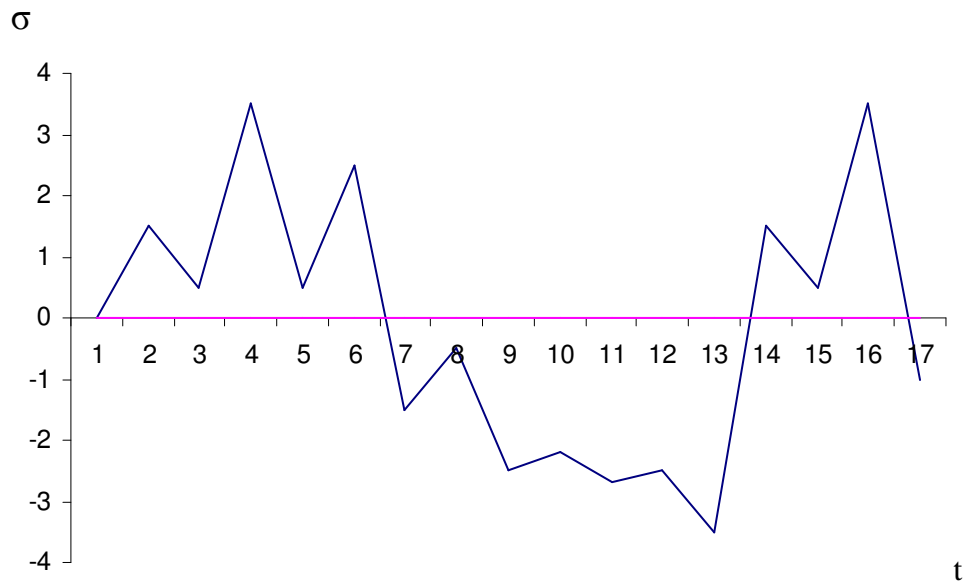
Σχ. 6.25 Μέθοδος των ζευγών εύρους (Range – Pair Method).  
 Ιστορικό φόρτισης [20].

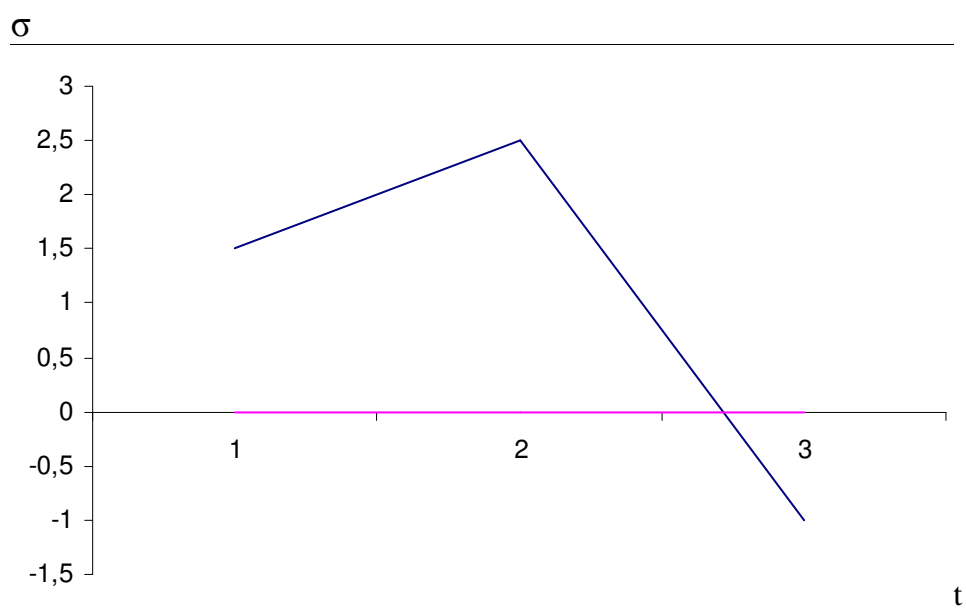
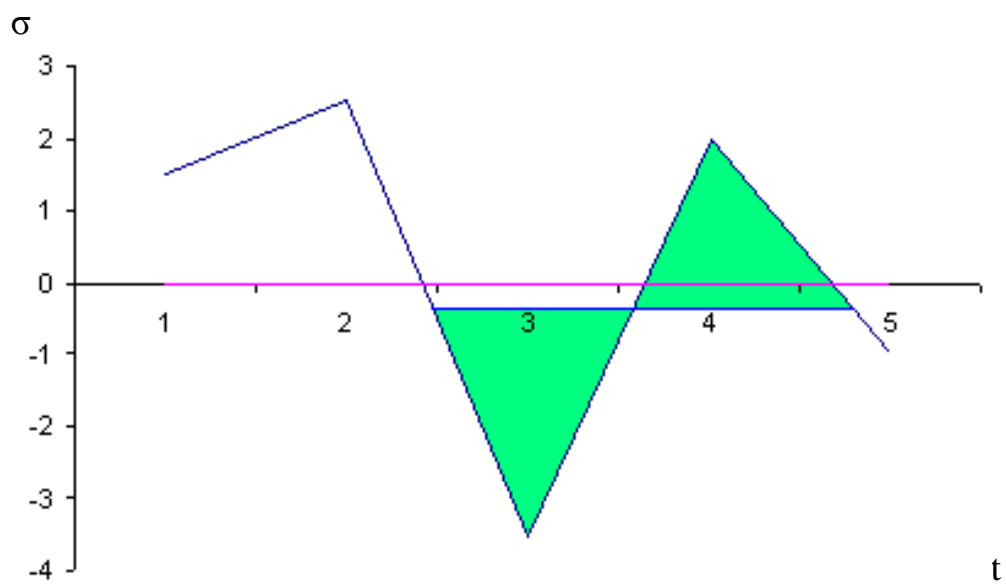
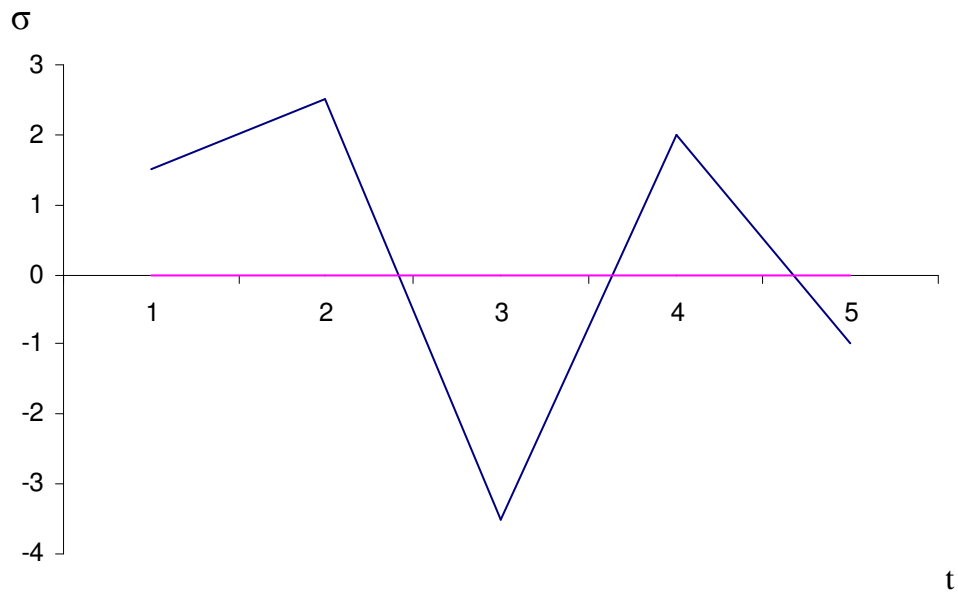




Σχ. 6.26 Μέθοδος ροής της βροχής (Rainflow method).

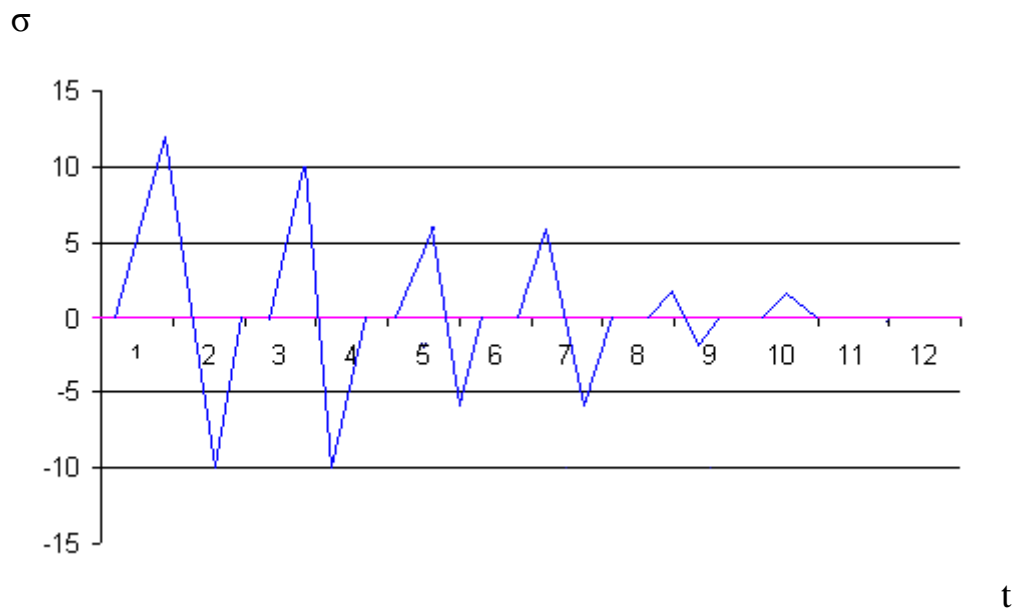
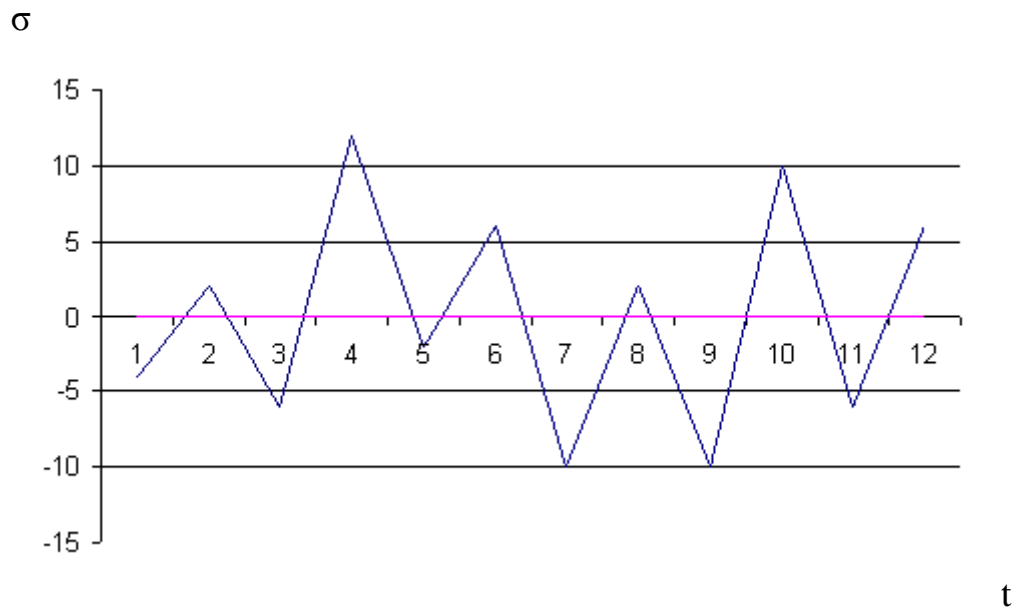
Ιστορικό φόρτισης [4].



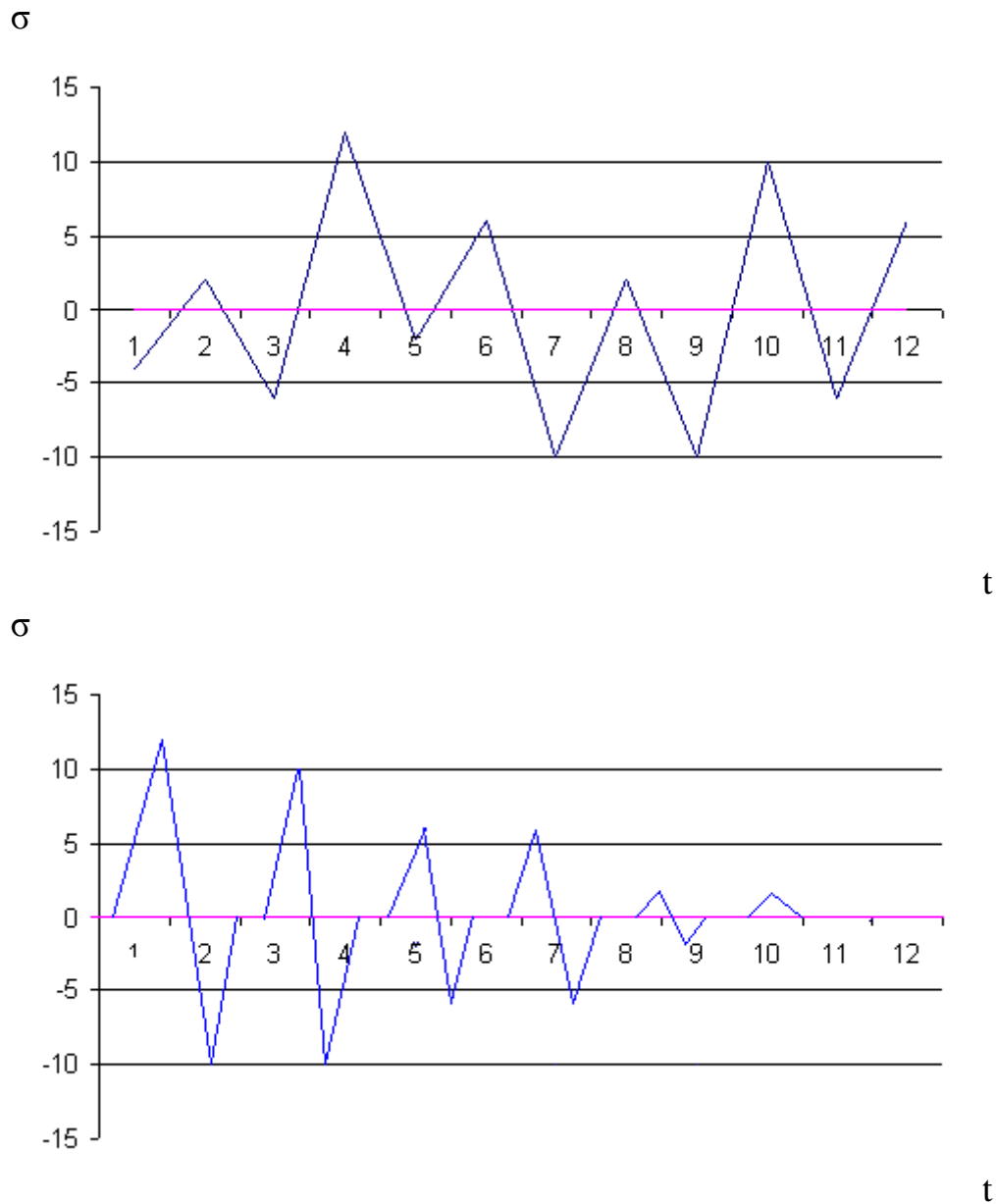


Σχ. 6.27 Μέθοδος των ζευγών εύρους (*Range – Pair Method*).

Ιστορικό φόρτισης [16].



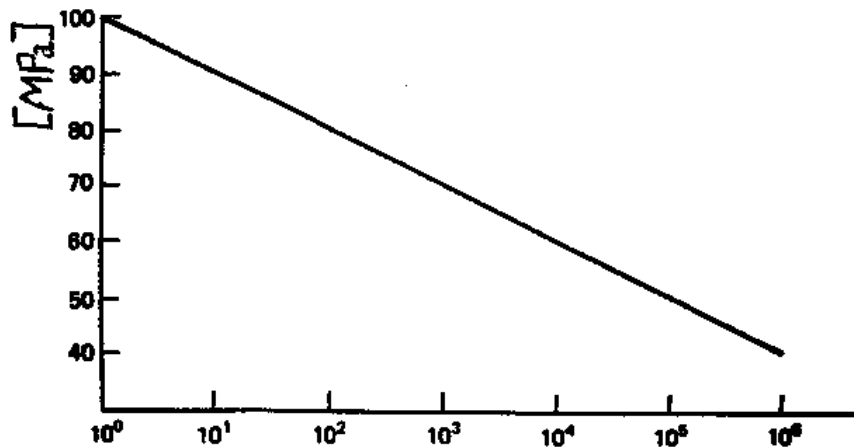
Σχ.6.28 Μέθοδος μέτρησης διέλευσης βαθμίδας (Level Crossing). Ιστορικό φόρτισης [14].



Σχ.6.29 Μέθοδος μέτρησης κορυφών (*Peak Counting*).  
 Ιστορικό φόρτισης [14].

Στην συνέχεια, θα δειχθεί με ποιόν τρόπο μπορούν τα παραπάνω σχήματα αυτού του κεφαλαίου, αφού πρώτα έχουν μετατραπεί από σύνθετα σε απλά ιστορικά φόρτισης με κάποιες από τις μεθόδους που έχουν προαναφερθεί, να επιλυθούν με τον κανόνα του Miner. Δύο κατατοπιστικά παραδείγματα μπορούν να προκύψουν από τα σχήματα 6.11 και 6.28 του ίδιου κεφαλαίου. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.30)

απεικονίζεται η καμπύλη Wohler ή S-N για τους χάλυβες όπου θα μας βοηθήσει για την επίλυση των παρακάτω ιστορικών.



Σχ. 6.30 Καμπύλη Wohler ή καμπύλη S-N για τον χάλυβα.

Οπότε, το σχήμα 6.28 έχει στο απλό ιστορικό φόρτισης του 3 πλάτη τάσεων που εφαρμόζονται πάνω στο συγκεκριμένο υλικό (πρέπει όμως να λειφθεί υπόψη ότι οι τιμές του σχήματος αυτού είναι σε κλίμακα 1:8). Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα, ο κανόνας του Miner που ισχύει για την περίπτωση αυτή είναι :

$$n_1 / N_1 + n_2 / N_2 + n_3 / N_3 = 1 \quad (6.1)$$

Από την καμπύλη S-N ή αλλιώς την καμπύλη Wohler παραπάνω (Σχήμα 6.30), παράλληλα και με το σχήμα 6.28 προκύπτουν τα παρακάτω :

$$\sigma_1 = 96 \text{ Mpa} , n_1 = 2 \xrightarrow{\text{Wohler}} N_1 = 10$$

$$\sigma_2 = 48 \text{ Mpa} , n_2 = 60.000 \xrightarrow{\text{Wohler}} N_2 = 10^5$$

$$n_3 = ; \text{ όταν } \sigma_3 = 40 \text{ Mpa} \xrightarrow{\text{Wohler}} N_3 = 10^6$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο 6.1 και τους πιο πάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι :

$$2 / 10 + 60.000 / 10^5 + n_3 / 10^6 = 1 \Rightarrow 0,2 + 0,6 + n_3 / 10^6 = 1 \Rightarrow$$

$$n_3 / 10^6 = 1 - 0,6 \Rightarrow n_3 = 0,4 \times 10^6 \Rightarrow n_3 = 400.000$$

Άρα το υλικό θα αστοχήσει μετά από 400.000 κύκλους.

Το σχήμα 6.11 έχει στο απλό ιστορικό φόρτισής του 2 πλάτη τάσεων που εφαρμόζονται πάνω στο συγκεκριμένο υλικό (πρέπει όμως να λειφθεί υπόψη ότι οι τιμές του σχήματος αυτού είναι σε κλίμακα 1:20). Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα, ο κανόνας του Miner που ισχύει για την περίπτωση αυτή είναι :

$$n_1 / N_1 + n_2 / N_2 = 1 \quad (6.2)$$

Από την καμπύλη S-N ή αλλιώς την καμπύλη Wohler παραπάνω (Σχήμα 6.30), παράλληλα και με το σχήμα 6.11 προκύπτουν τα παρακάτω :

$$\sigma_1 = 60 \text{ Mpa} , n_1 = 8.500 \xrightarrow{\text{Wohler}} N_1 = 10^4$$

$$n_2 = ; \text{ όταν } \sigma_2 = 40 \text{ Mpa} \xrightarrow{\text{Wohler}} N_2 = 10^6$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο 6.2 και τους πιο πάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι :

$$8.500 / 10^4 + n_2 / 10^6 = 1 \Rightarrow 0,85 + n_2 / 10^6 = 1 \Rightarrow n_2 / 10^6 = 1 - 0,85 \Rightarrow$$

$$n_2 = 0,15 \times 10^6 \Rightarrow n_2 = 150.000$$

Άρα το υλικό θα αστοχήσει μετά από 150.000 κύκλους.



## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, τα συμπεράσματα που προκύπτουν περιστρέφονται γύρω από τα παρακάτω θέματα :

1. Κόπωση,
2. Κανόνας του Miner,
3. Τυχαία ιστορικά φόρτισης,
4. Μέθοδοι μέτρησης κύκλων,
5. Μέθοδος Rainflow,
6. Εφαρμογές.

Παρά την εκτεταμένη προσπάθεια που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας, η πολυπλοκότητα των φαινομένων και των μεθοδολογιών που εξετάζονται δεν επέτρεψε, σε κάποιες περιπτώσεις, την ενδελεχή εξέταση κάποιων θεμάτων, ενώ η ίδια η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε δημιούργησε καινούρια ερωτήματα καθώς και ιδέες για περαιτέρω μελέτη.

Κόπωση ορίζεται, σύμφωνα με τον ορισμό ASTM, ως «η διαδικασία των προοδευτικών τοπικών μονίμων δομικών μεταβολών που συμβαίνουν στα υλικά που υποβάλλονται σε συνθήκες μεταβαλλόμενων τάσεων σε ένα ή περισσότερα σημεία και που μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές ή πλήρη θραύση μετά από ένα επαρκή αριθμό μεταβολών του φορτίου».

Η διαδικασία της κόπωσης αποτελείται από τρία στάδια:

1. Αρχικό στάδιο της ρωγμής,
2. Προοδευτική αύξηση της ρωγμής σε όλη την πλευρά του υλικού,
3. Τελική ξαφνική θραύση του αρχικού κομματιού.

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τη βελτίωση των επιδόσεων κόπωσης είναι οι βελτιώσεις στο σχεδιασμό, οι οποίες είναι:

- Εξάλειψη ή μείωση τάσης με τον εξορθολογισμό του στοιχείου,
- Αποφυγή των επιφανειακών διαμορφώσεων που προκύπτουν από διάτρηση, σφράγιση, κοπή ή άλλες διεργασίες,
- Αποτροπή της ανάπτυξης των ασυνεχειών επιφάνειας κατά την επεξεργασία,
- Μείωση ή εξάλειψη παραμενουσών υπολειμματικών τάσεων που προκαλούνται από την κατασκευή του υλικού,
- Βελτίωση στις λεπτομέρειες της κατασκευής και στερέωσης των διαδικασιών που εκτελούνται ώστε να επέλθει κόπωση του συγκεκριμένου υλικού.

Ο κανόνας του Miner έχει υπολογιστεί από τον ίδιο και χρησιμοποιείται ευρέως σε συνδυασμό με την καμπύλη του Wohler ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε, ανάλογα με το είδος του υλικού κάθε φορά, τον αριθμό των κύκλων του υλικού μέχρι να επέλθει αυτό ε κόπωση.

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής σε τυχαία ιστορικά φόρτισης, ακολουθείται κατά κανόνα η παρακάτω διαδικασία που αποτελείται από τρία στάδια. Αυτά έχουν ως εξής :

- I. Αναγωγή του τυχαίου ιστορικού καταπόνησης σε ένα σύνολο διακεκριμένων κύκλων,
- II. Αποτίμηση της βλάβης κάθε διακεκριμένου κύκλου με κάποιον κανόνα συσσώρευσης φθοράς,
- III. Πρόσθεση της βλάβης όλων των διακεκριμένων κύκλων.

Οι μέθοδοι μέτρησης κύκλων που χρησιμοποιούνται για τα τυχαία ιστορικά φόρτισης, είναι :

1. Μέτρηση Διέλευσης Βαθμίδας (Level Crossing Counting).
2. Μέτρηση Κορυφών (Peak Counting).
3. Απλή Μέτρηση Εύρους (Simple Range Counting).
4. Μέθοδος Των Ζευγών Εύρους (Range – Pair Method).

## 5. Μέτρηση Rainflow (Rainflow Counting).

Τόσο η μέθοδος της μέτρησης κορυφών όσο και η μέθοδος διέλευσης βαθμίδας, καταλήγουν στα πλέον επιβαρυντικά για το υλικό σενάρια, μια και βασίζονται στο σχηματισμό των μέγιστων δυνατών κύκλων που μπορούν να σχηματιστούν από ένα συγκεκριμένο κοπωτικό φάσμα. Εκτός αυτού, αγνοούν παντελώς την πραγματική σειρά επιβολής των φορτίων με συνέπεια οι όποιες επιδράσεις σειράς φόρτισης, οι οποίες ανάλογα και με τη μορφή του φάσματος μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο και να μη μπορούν να ληφθούν υπόψη.

Ο αλγόριθμος καταμέτρησης ροής της βροχής (γνωστό και ως «μέθοδος καταμέτρησης rainflow») χρησιμοποιείται για την ανάλυση δεδομένων κόπωσης προκειμένου να μειωθεί το φάσμα των ποικίλων τάσεων σε ένα σύνολο απλών αντίστροφων τάσεων.

Παρά το γεγονός ότι ο αλγόριθμος ροής της βροχής αποδίδει με ακρίβεια τους κοπωτικούς κύκλους που είναι ισοδύναμοι του φάσματος, αναπόφευκτα αναδιατάσσει τη σειρά επιβολής των φορτίων ενώ παράλληλα όλο το φάσμα πρέπει να υποστεί επεξεργασία πριν εισαχθεί στον οποιαδήποτε αλγόριθμο υπολογισμού ζωής. Παρόλα αυτά παραμένει πάντα μία από τις πιο δημοφιλέστερες και ακριβέστερες μεθόδους παγκοσμίως.

Η διαδικασία εφαρμογής της ροής της βροχής σε ένα υλικό που έχει υποστεί σε ένα τυχαίο ιστορικό φόρτισης είναι ως εξής :

1. Μειώνοντας το ιστορικό χρόνο σε μια αλληλουχία (εφελκυσμού) κορυφών και (θλιπτική) σκάφων,
2. Φαντάζοντας ότι το ιστορικό του χρόνου είναι ένα πρότυπο για ένα άκαμπτο φύλλο (οροφή παγόδας),
3. Γυρίζοντας το φύλλο προς τα δεξιά κατά 90 μοίρες (πρώτη φορά στην κορυφή),

4. Κάθε εφελκυστική κορυφή φαντάζεται ως πηγή του νερού που "στάζει" προς τα κάτω την παγίδα,

5. Μετρώντας τον αριθμό των κύκλων ψάχνοντας για τερματισμό κατά τη φορά της ροής.

Αυτά συμβαίνουν στην περίπτωση που:

1. Φτάνει το τέλος του ιστορικού χρόνου,

2. Θα συγχωνεύεται με μια ροή που ξεκίνησε σε προγενέστερη εφελκυστική κορυφή, ή

3. Ρέει απέναντι από εφελκυστική κορυφή της μεγαλύτερης εμβέλειας,

4. Αντιστοιχίζοντας ένα μέγεθος για κάθε μισό κύκλο ίσο με τη διαφορά πίεσης μεταξύ της έναρξης και λήξης του,

5. Αντιστοιχίζοντας τους ημικύκλους της ταυτότητας του μεγέθους (αλλά αντίθετη έννοια) για να μετρήσει τον αριθμό των πλήρων κύκλων.

Με την μέθοδο rainflow η αναγωγή του σύνθετου ιστορικού καταπόνησης σε πλήρεις κύκλους γίνεται με βάση την παρακάτω διαδικασία.

I. Αρχικά προσδιορίζονται ημικύκλοι φόρτισης. Οι κύκλοι φόρτισης που αναζητούνται συνθέτονται από ημικύκλους με την ίδια μέγιστη και ελάχιστη τάση ή παραμόρφωση, που ο ένας συμπληρώνει τον άλλο για τη δημιουργία πλήρους κύκλου.

II. Κάθε ημικύκλος προσδιορίζεται από την τροχιά μιας σταγόνας βροχής που κυλάει πάνω στις αναστροφές, αν περιστραφεί το ιστορικό κατά 90 μοίρες.

Στις εφαρμογές που ακολούθησαν μπορούμε να δούμε ότι έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα μετά από την επίλυση των επιμέρους σχημάτων, μετατρέποντας τα σύνθετα ιστορικά φόρτισης σε απλά με την βοήθεια των μεθόδων μέτρησης κύκλων όπως προαναφέρθηκαν.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. R.P.L. NIJSSEN  
‘Fatigue life prediction and strength degradation of wind turbine rotor blade composites’. PhD thesis, Faculty of Aerospace Engineering, T.U. Delft, (2006).
2. T. ENDO, M. MATSUSHI  
‘The rainflow method in fatigue – the Tatsuo Endo memorial volume’, Murakami Y., (Ed)., July, (1991).
3. S.D. DOWNING, D.F. SOCCIE  
‘Simple rainflow counting algorithms’, Int j fatigue (1982), pp. 31-40.
4. L. L. SCHLUTER, H. J. SUTHERLAND  
‘User’s Guide for LIFE2’s Rainflow Counting Algorithm’, Sandia report, Sand90–2259 1 UC–261, January (1991).
5. S. TAHERI, V. DOQUET  
‘Evaluation Of Non Conservatism Of Combined Rainflow Counting And Miner’s Rule For Damage Cumulation In Strain Controlled Fatigue’, paper # 1598, transactions, Smirt 16, Washington DC, August (2001).
6. M. BROKATE, K. DREBLER, P. KREJCI  
‘Rainflow Counting and Energy Dissipation for Hysteresis Models in Elastoplasticity’, (1998).

7. B. BULDER, D. LEKOU, F. MOUZAKIS, H. SOKER  
‘Optimat Blades Rainflow - eq1 – Benchmarking’, Optimat Blades,  
Rainflow Benchmarking, pp. 1 - 30, March (2003).
8. A. HALFPENNY  
‘A Practical Discussion on Fatigue’, nCode International Ltd.  
Managing Durability, TP-0123, (1993).
9. C. BRACCESI, F. CIANETTI, G. LORI, D. PIOLI  
‘A Frequency Method for Fatigue Life Estimation of Mechanical  
Components under Bimodal Random Stress Process’, Tech Science  
Press, SID, 1 (2005), pp. 277-290.
10. K. DREBLER, M. HACK  
‘Fatigue Lifetime Estimation based on Rainflow Counted Data  
using the Local Strain Approach’, pp. 1 - 18, (1981).
11. R. SUNDER, S. A. SEETHARAM, T. A. BHASKARAN  
‘Cycle counting for fatigue crack growth analysis’, Int J Fatigue 6,  
(1984), pp 147-156.
12. J.O. PETERS, R.O. RITCHIE  
‘Foreign-object damage and high-cycle fatigue: role of  
microstructure in Ti-6Al-4V’, International Journal of Fatigue 23  
(2001), pp. 413–S421.

13. M. OLAGNON, Z. GUEDE  
‘Rainflow fatigue analysis for loads with multimodal power spectral densities’, *Marine Structures*, 21(2008), pp.160-176.
14. Y. L. LEE, J. PAN, R. HATHAWAY, M. BARKEY  
‘Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice)’, Elsevier, Oxford (2005).
15. S. ARIDURU  
‘Fatigue Life Calculation by Rainflow Cycle Counting Method’, Department of Mechanical Engineering, Master of Science in Mechanical Engineering, December (2004).
16. PH.D. D. R. JOHNSON, M.D. H. LUBIN, M.D. F. OCHBERG  
‘The Counting Method’, Manual, [www.countingmethod.com](http://www.countingmethod.com) 203-624-2146, revised (1/1/07).
17. ASTM E 1049-85  
‘Standard practices for cycle counting in fatigue analysis’, ASTM International, (Reapproved 2005).
18. I. RYCHLIK  
‘A New Definition of the Rainflow Cycle Counting Method’, *Int. J. Fatigue* 9 (1987), pp. 119-121.
19. M. MATSUISKI, T. ENDO  
‘Fatigue of metals subjected to varying stress’, *Japan Soc. Mech. Engineering*, (1969).

20. S. H. BAEK, S. S. CHO, W. S. JOO  
‘Fatigue Life Prediction Based on the Rainflow Cycle Counting Method for the End Beam of a Freight Car Bogie’, International Journal Of Automotive Technology, 9 (2008), pp. 95-101.
21. R. O. RITCHIE, Y. MURAKAMI  
‘Comprehensive Structural Integrity, Volume 4: Cyclic Loading and Fatigue’, Fracture of materials from Nano to Macro, (2003).
22. DIETER  
‘Mechanical Metallurgy’, Mc Grow Hill, New York (1995).
23. FOCUS, STEPHENSON  
‘Fatigue Engineering’, Elsevier, Mississippi (2000).
24. [www.wikipaidia.org](http://www.wikipaidia.org)  
‘Rainflow-counting algorithm’.
25. [www.epi-eng.com/mechanical engineering basics](http://www.epi-eng.com/mechanical%20engineering%20basics)  
‘Fatigue and The Factors Which Influence Fatigue’, by EPI Inc.
26. [www.materialsengineering.com/CA](http://www.materialsengineering.com/CA)  
‘Fatigue Failures’, [fatigue.htm](http://fatigue.htm).



27. Ν. ΜΠΑΤΣΟΥΛΑΣ

‘Σημειώσεις παραδόσεων στα Γεωργικά Μηχανήματα IV’, (2010).

28. Ε. Α. ΠΑΣΙΠΟΥΛΑΡΙΔΗΣ

‘Εναπομένουσα Αντοχή Και Πρόβλεψη Ζωής Σε Σύνθετα Υλικά Μετά Από Κόπωση’, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα (2008).