



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΝΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ  
ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΕΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΦΡΑΓΚΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ**

ΧΑΝΙΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ, 2020

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η αποτύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να επαληθεύεται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις μου και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύει τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.



# ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΝΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΕΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΡΑΓΚΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ

## ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΤΡΙΧΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

## Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η δημιουργία του πανευρωπαϊκού χάρτη υδραυλικών παραμέτρων των υπόγειων υδάτων, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης της ύφεσης.

Η κυριότερη υδραυλική παράμετρος που προσδιορίζεται είναι ο λόγος των παραμέτρων μεταβιβασιμότητας και αποθηκευτικότητας ( $\frac{T}{S}$ ). Γενικά, με τον προσδιορισμό της παραμέτρου αυτής, καθίσταται δυνατή η παρατήρηση της υδραυλικής συμπεριφοράς των υδροφορέων αλλά και η εκτίμηση των αποθεμάτων των υπόγειων υδάτων. Για τον προσδιορισμό των παραπάνω υδραυλικών παραμέτρων των υδροφορέων υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που στηρίζονται στην επεξεργασία δεδομένων.

Στην προκειμένη περίπτωση έχει προταθεί η χρήση της μεθόδου ανάλυσης της ύφεσης όπως διατυπώθηκε από τους Cooper.H και Rorabough.M.

Αρχικά, απαραίτητο εργαλείο για την εκπόνηση της εργασίας αποτέλεσε η χρήση του προγράμματος Matlab. Συγκεκριμένα, μέσω καλά διατυπωμένων κωδίκων γίνεται υπολογισμός των κύριων καμπυλών ύφεσης αλλά και των υδραυλικών παραμέτρων της περιοχής μελέτης. Επεξηγηματικά, από την χάραξη των χρονοσειρών της ροής καθώς και την ανάλυση παλινδρόμησης των δεδομένων, προκύπτει ο δείκτης ύφεσης για την κάθε καμπύλη και κατά επέκταση τα ζητούμενα χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

Τέλος, για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκε μέσω του λογισμικού ArcGIS ο χάρτης της Ευρώπης με εντοπισμένα τα σημεία των υδραυλικών παραμέτρων. Γεγονός που επιτρέπει, την απεικόνιση των υδραυλικών χαρακτηριστικών με ακρίβεια αλλά και την διευκόλυνση των μελετητών να μπορούν να χρησιμοποιήσουν, τα αποτελέσματα μας ώστε να δημιουργήσουν νέα πανευρωπαϊκά μοντέλα χρησιμοποιώντας αυτές τις υδραυλικές παραμέτρους.

## Abstract

This dissertation presents the creation of the pan-European map of hydraulic parameters of groundwater, using the method of recession analysis.

The principal hydraulic parameters to be determined is the ratio of transferability and storage parameters  $\left(\frac{T}{S}\right)$ . In general, determining these parameters makes it possible not only to observe the hydraulic behavior of aquifers but also to estimate the reserves of groundwater.

There are various methods based on data processing to determine the above hydraulic parameters of aquifers. In the present case, the use of the recession analysis method, as posited by Cooper.H and Rorabough.M, has been recommended.

Initially, the use of the Matlab program was necessary to complete the dissertation. More specifically, the main recession curves and the hydraulic parameters of the area studied are calculated using well-formulated codes. To further explain, the recession index for each curve and consequently the required characteristics of the aquifer are obtained through the time series of the flow and the analysis of the data regression.

Finally, the map of Europe with the points of the hydraulic parameters was constructed using ArcGIS allowing for optimal display of the findings. This fact allows the hydraulic characteristics to be accurately depicted but also to facilitate researchers to be able to use our results in the creation of new pan-European models using this hydraulic parameters.

## Ευχαριστίες

Για την επίτευξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνέβαλαν σημαντικοί άνθρωποι για τους οποίους νιώθω ευγνωμοσύνη και θα ήθελα να τους ευχαριστήσω.

Κατά αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Γεώργιο Καρατζά για την ανάθεση της εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Τριχάκη Ιωάννη για την αμέριστη συμπαράσταση, υπομονή και κατανόηση κατά την διάρκεια όλης της προσπάθειας μου. Η συμβολή του ήταν καθοριστική και πολύ σημαντική τόσο στη διαμόρφωση του επιστημονικού υπόβαθρου της εργασίας όσο και στην επίλυση προβλημάτων που προέκυψαν κατά την συγγραφή της.

Τέλος, ευχαριστώ τον κύριο Νικολαΐδη Νικόλαο, για την συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Ξεχωριστά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την απεριόριστη αγάπη, στήριξη και φροντίδα που μου παρείχε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	6
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	7
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ / ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
<b>ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ</b> .....	9
1. Υδροφορείς .....	9
1.1 Περιορισμένος ή αρτεσιανός υδροφορέας .....	9
1.2 Ελεύθερος υδροφορέας .....	9
2. Πορώδες (n).....	10
3. Χρόνος παραμονής (tr).....	10
4. Υδραυλική αγωγιμότητα (k).....	10
5. Απορροή (q) .....	10
6. Εμπλουτισμός (w).....	11
7. Συντελεστής μεταβιβασιμότητας (T).....	12
<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ</b> .....	13
1. Brodie και Hostetler.....	13
2. Cooper. Η και Rorabaugh. M.....	19
3. Tallaksen .....	21
3.1 Μοντελοποίηση ύφεσης ως αυτορρυθμιζόμενη διαδικασία ....	25
3.2 Εμπειρικές σχέσεις .....	26
4. Steward.....	27
<b>ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b> .....	31
1. Προσδιορισμός παραμέτρου του υπόγειου υδροφορέα από μετρήσεις παροχής στο ποτάμι .....	31
1.1 Ανάλυση ύφεσης .....	31
1.2 Προεπεξεργασία .....	32

1.3	Δείκτης ύφεσης.....	32
2.	Χάραξη πανευρωπαϊκού χάρτη.....	34
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>		<b>35</b>
1.1	Υδρογραφήματα .....	35
1.2	Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης.....	54
1.3	Καμπύλη Ανάλυσης.....	72
2.1	Λόγος συντελεστών μεταβιβασιμότητας προς αποθηκευτικότητα. .	73
2.2	Συντελεστής Παλινδρόμησης (R2) .....	74
2.3	Δημιουργία πανευρωπαϊκού χάρτη.....	75
<b>ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....</b>		<b>78</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>		<b>81</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>		<b>83</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>		<b>85</b>



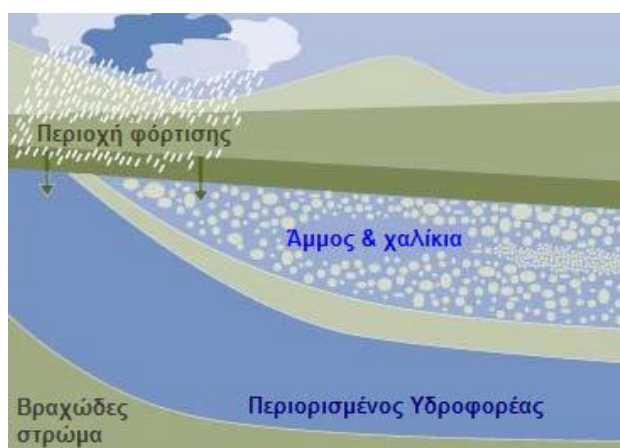
## Βασικές Εννοιες

### 1. Υδροφορείς

Ως υδροφορέας χαρακτηρίζεται ο χώρος αποθήκευσης του υπόγειου νερού και συνιστά σχηματισμό σημαντικών ποσοτήτων διαπερατών υλικών (χολικές, άμμος), κορεσμένων σε νερό, τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Οι υδροφορείς διακρίνονται σε ελεύθερους και περιορισμένους (ή αρτεσιανούς), διάκριση η οποία βασίζεται στη θέση του υδροφόρου ορίζοντα. (Καρατζάς, Γ, 2002)

#### 1.1 Περιορισμένος ή αρτεσιανός υδροφορέας

Στον περιορισμένο υδροφορέα, το νερό περιορίζεται από την άνω και κάτω επιφάνειά του, εξαιτίας, της εκεί παρουσίας αδιαπέραστων ή έστω μικρής διαπερατότητας στρωμάτων. Γεγονός που δικαιολογεί την ύπαρξη του νερού σε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. (Καρατζάς.Γ, 2002)



Εικόνα 1:Περιορισμένος υδροφορέας (Δαουλάρη Γεωργία,2007)

#### 1.2 Ελεύθερος υδροφορέας

Στον ελεύθερο υδροφορέα, η ανώτερη επιφάνεια συμπίπτει με τον υδροφόρο ορίζοντα.(Καρατζάς.Γ, 2002)



Εικόνα 2:Ελεύθερος υδροφορέας (Δαουλάρη Γεωργία, 2007)

## 2. Πορώδες (n)

Για τον προσδιορισμό του ολικού πορώδους, λαμβάνεται υπόψη το σύνολο του όγκου των κενών, ανεξάρτητα αν αυτά θεωρούνται μικρά ή μεγάλα, αν επικοινωνούν μεταξύ τους ή είναι τυφλά. Επομένως, το πορώδες (n) ή ολικό πορώδες είναι ένα μέτρο των διακένων (πόρων, κενών, ρωγμών) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων ( $V_v$ ) προστονονολικόόγκοτου πετρώματος εδάφους ( $V_0$ ) και υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση. (Καλλέργης Γ., 1996)

$$n = \frac{V_v}{V_0} \quad (1)$$

Όπου, n: ολικό πορώδες, (αδιάστατο μέγεθος)

$V_v$ : όγκος των κενών του δείγματος, ( $L^3$ )

$V_0$ : συνολικός όγκος του δείγματος, ( $L^3$ )

## 3. Χρόνος παραμονής ( $t_r$ )

Ο χρόνος παραμονής του υπόγειου νερού στο υπέδαφος αποτελεί την ηλικία του νερού, η οποία μπορεί να προσδιορισθεί με φυσικά ραδιοϊσότοπα, κυρίως το τρίπιο ( $H^3$ ) και τον άνθρακα 14 ( $C^{14}$ ).

## 4. Υδραυλική αγωγιμότητα (k)

Η υδραυλική αγωγιμότητα ονομάζεται η ιδιότητα των πετρωμάτων και διάφορων σχηματισμών του εδάφους να επιτρέπουν την κίνηση των υγρών δια μέσου αυτών. Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Μέτρο της υδραυλικής αγωγιμότητας (περατότητας) είναι ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας και έχει διαστάσεις ταχύτητας ( $\frac{L}{T}$ ). Στη γενικότητα η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από την κατακόρυφη και την οριζόντια χωρική συνιστώσα ( $K_x$  και  $K_z$ ). (Καλλέργης Γ., 1996)

## 5. Απορροή (q)

Η απορροή (q) περιγράφεται ως ο όγκος νερού του ποταμού ανά μονάδα χρόνου, η οποία λαμβάνεται θετική στην περίπτωση επαναφόρτισης και αρνητική στην περίπτωση εκφόρτισης και έχει διαστάσεις ( $\frac{L^2}{T}$ ). Στην περίπτωση μελέτης του συγκεκριμένου μεγέθους στο σημείο εξόδου του υδροφορέα αναφερόμαστε στη συνολική απορροή ανά μονάδα χρόνου. (Howard, Μακρόπουλος, Κουτσογιάννης, 2005).

## 6. Εμπλουτισμός (w)

Ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων γίνεται με φυσικό και τεχνητό τρόπο. Ο φυσικός εμπλουτισμός επιτυγχάνεται με τους εξής τρόπους:

- i. Με απευθείας κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων
- ii. Διήθηση από τα επιφανειακά νερά
- iii. Υπόγεια τροφοδοσία από γειτονική λεκάνη

Στους ελεύθερους υδροφορείς η περιοχή εμπλουτισμού μπορεί να καλύπτει όλη την περιοχή, που εκτείνονται. Στους υπό πίεση ορίζοντες, οι περιοχές εμπλουτισμού περιορίζονται στην επιφάνεια του υδροφόρου, εκτός αν έχουν υδραυλική επικοινωνία με άλλους υδροφορείς ή υδρορεύματα. Επίσης, η ποσότητα εμπλουτισμού δεν μένει σταθερή με το χρόνο, αλλά μεταβάλλεται από εποχή σε εποχή. Ο συνολικός εμπλουτισμός ενός υδροφορέα ισούται με το ποσοστό του νερού της βροχόπτωσης, το οποίο κατεισδύει και διηθείται στην κορεσμένη ζώνη και τον όγκο νερού της εξωτερικής τροφοδοσίας. Μαθηματικά ο συνολικός ( $Q_r$ ) μπορεί να εκφρασθεί από την ακόλουθη σχέση (Birkle, 1998):

$$Q_r = P - E - R + Q_{in} - Q_{out} \pm \Delta S \quad (2)$$

Όπου, P: τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

E: η πραγματική εξατμισοδιαπνοή

R: η επιφανειακή απορροή

$Q_{in}$ : η εξωτερική τροφοδοσία

$Q_{out}$ : οι εκροές

$\Delta S$ : η μεταβολή των αποθεμάτων

Σε περιπτώσεις αυτοτελών συστημάτων, η εξωτερική τροφοδοσία από γειτονικές λεκάνες θεωρείται μηδενική και οι μεταβολές στα υπόγεια αποθέματα είναι αμελητέες και συνεπώς οι παράγοντες,  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$ ,  $\Delta S$  της παραπάνω εξίσωσης (2) παραλείπονται. Η εξίσωση (2) προκύπτει από τη γενική εξίσωση υδρολογικής ισορροπίας.

$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} \pm \text{Μεταβολή αποθεμάτων}$$

Εκτός από τη φυσική τροφοδοσία για την ενίσχυση του υδατικού ισοζυγίου των υπόγειων νερών εφαρμόζεται ο τεχνητός εμπλουτισμός. Ο τεχνητός εμπλουτισμός συνίσταται στην αύξηση του ρυθμού ανανέωσης του υπόγειου νερού των υδροφόρων οριζόντων με χρησιμοποίηση περίσσειας φυσικού ή επεξεργασμένου νερού. (Bouwer, 1996)

## 7. Συντελεστής μεταβιβασιμότητας (T)

Συντελεστής μεταβιβασιμότητας, ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο, το νερό δεδομένου κινηματικού ιξώδους μεταβιβάζεται διαμέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα, με μοναδιαία κλίση. Η παραπάνω διατύπωση αποτυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$T = k \cdot b \quad (3)$$

Όπου, T: ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας,  $\left(\frac{L^2}{T}\right)$

K: η υδραυλική αγωγιμότητα,  $\left(\frac{L}{T}\right)$

b: το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα, (L)

Σύμφωνα με την παραπάνω Εξίσωση (3), ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας είναι άμεσα ανάλογος προς το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων. Συνεπώς, για έναν περιορισμένο υδροφορέα δεδομένου πάχους, ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας παραμένει σταθερός. Δεν ισχύει το ίδιο και για την περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα, εφόσον το πάχος του είναι μεταβλητό και εξαρτάται από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. (Καρατζάς, Γ, 2002)

## 8. Αποθηκευτικότητα (S)

Σαν αποθηκευτικότητα ορίζεται, η ικανότητα αποθήκευσης ύδατος των υδροφόρων στρωμάτων και εξαρτάται, από το είδος τους (περιορισμένος ή ελεύθερος υδροφορέας) και από τους υφιστάμενους, κατά περίπτωση, μηχανισμούς αποθήκευσης (συμπιεστότητα ύδατος, συμπιεστότητα υλικού, πλήρωση ή εκκένωση των πόρων). Στην περίπτωση του περιορισμένου υδροφορέα, η ικανότητα αποθήκευσης επηρεάζεται από τη συμπιεστότητα του εδάφους και του υλικού, εφόσον δεν υπάρχουν διάκενα. Έτσι, ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας σε ένα κορεσμένο πορώδη σχηματισμό, εκφράζει το ποσό του αποθηκευόμενου ύδατος που αποδίδεται από μια μονάδα όγκου του υδροφόρου στρώματος για μία μονάδα πτώσης του υδραυλικού ύψους. (Καρατζάς, Γ, 2002)

$$S_0 = \rho \cdot g \cdot (\alpha + n \cdot \beta) \quad (4)$$

Όπου,  $S_0$ : ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας,  $\left(\frac{1}{L}\right)$

$\rho$ : ο πυκνότητα του νερού,  $\left(\frac{M}{L^3}\right)$

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\left(\frac{L}{T^2}\right)$

$\alpha$ : συμπιεστότητα εδάφους,  $\left(\frac{L \cdot T^2}{M}\right)$

$\beta$ : συμπιεστότητα ύδατος,  $\left(\frac{L \cdot T^2}{M}\right)$

n: πορώδες, (αδιάστατο μέγεθος)

## Θεωρητικό Υπόβαθρο

Με αρχικά δεδομένα τις τιμές της παροχής, εκτιμώνται οι υδρογεωλογικές παράμετροι των υδροφορέων όλης της Ευρώπης. Μια τέτοια παράμετρος είναι ο συντελεστής της μεταβιβασιμότητας (T) προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας (S), δηλαδή ο λόγος  $\frac{T}{S}$ . Συγκεκριμένα, σκοπός είναι ο υπολογισμός των κύριων καμπυλών ύψησης των υπόγειων υδάτων με την χρήση ενός αλγορίθμου γραμμένου σε Matlab για την δημιουργία πανευρωπαϊκού χάρτη της υδραυλικής παραμέτρου  $\left(\frac{T}{S}\right)$ . Η προσομοίωση των υπόγειων υδάτων μεγάλης κλίμακας είναι απαραίτητη για την εκτίμηση της μέσης τιμής της μεταβιβασιμότητας. Υπάρχει πλήθος επιστημονικών άρθρων, όπως αναφέρεται παρακάτω, που διατυπώνουν την διαδικασία προσδιορισμού ξεκινώντας από τις κατάλληλες εξισώσεις ροής και καταλήγουν στην σχεδίαση της καμπύλης ύψησης.

Έτσι λοιπόν, η σύνοψη και η σύγκριση των παρακάτω επιστημονικών άρθρων έχει σκοπό τον προσδιορισμό του κατάλληλου τρόπου κατασκευής της καμπύλης ύψησης και μετέπειτα του προσδιορισμού των υδρολογικών παραμέτρων.

### 1. Brodie και Hostetler

Σύμφωνα με τους Brodie και Hostetler (2005), η καμπύλη ύψησης είναι το συγκεκριμένο τμήμα της καμπύλης που εμφανίζεται μετά την κορυφή. Αυτή η κορυφή συχνά μπορεί να απεικονίζει το συμβάν κάποιας βροχόπτωσης, παρουσιάζοντας τη μέγιστη τιμή της παροχής στο συγκεκριμένο σημείο. Μετά από αυτό το σημείο παρατηρείται η μείωση της παροχής, δηλαδή ξεκινάει η ύφεση. Η κλίση της καμπύλης στο τμήμα της ύφεσης μικραίνει με την πάροδο του χρόνου, καθώς στην αρχή εμφανίζεται απότομη κλίση και στην συνέχεια εξομαλύνεται όπως και η τιμή της παροχής. Μια περίοδος ύφεσης διαρκεί έως ότου η παροχή αρχίσει να αυξάνεται και πάλι λόγω πιθανής εμφάνισης κάποιου φαινομένου όπως για παράδειγμα βροχόπτωσης. Γενικά, οι καμπύλες ύψησης είναι τα τμήματα της γραφικής αναπαράστασης του νερού που προέρχεται από φυσικές αποθήκες, όπως είναι τα υπόγεια ύδατα. Επίσης, η απεικόνιση του νερού μπορεί να αφορά διαφορετικές αποθήκες νερού όπως λίμνες, υδροβιότοποι και κατακρημνίσεις χιονιού σε αντίστοιχα διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Η παροχή επηρεάζεται από τυχόν απώλειες νερού όπως άμεση εξάτμιση, διαπνοή από παράκτια βλάστηση ή πιθανή διήθηση σε υδροφόρους ορίζοντες. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα τμήματα ύψησης στο υδρογράφημα μπορούν να αναλυθούν μεμονωμένα ή ως ένα σύνολο τμημάτων για να συνθέσουν μια καλύτερη εικόνα της παροχής στο σύστημα.

Οι γραφικές προσεγγίσεις έχουν προσομοιωθεί μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου που μπορεί να προσεγγίζει επαρκώς τα τμήματα της ύψησης. Οι παραπάνω διαδικασίες περιγράφονται μαθηματικά μέσω υδατικών ισοζυγίων.

Θεωρείται ότι κάθε τμήμα ύφεσης συχνά περιγράφεται ως ένα κλασικό εκθετικό μοντέλο:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (1.1i)$$

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{t_r}} \quad (1.1ii)$$

Όπου,  $Q_t$ : παροχή κατά τη χρονική στιγμή  $t$

$Q_0$ : αρχική παροχή, στην αρχή του τμήματος ύφεσης

$\alpha$ : σταθερά γνωστή και ως συχνότητα αποκοπής ( $fc$ )

$t_r$ : χρόνος παραμονής και ορίζεται ως ο λόγος αποθήκευσης προς παροχή

Ο όρος  $e^a$  σε αυτήν την εξίσωση μπορεί να αντικατασταθεί από το  $k$ , που ονομάζεται σταθερός όρος, ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως ως δείκτης της βασικής απορροής στο ποτάμι (baseflow) (Nathan και McMahon, 1990). Μια άλλη παράμετρος που ερμηνεύεται από το τμήμα της ύφεσης είναι ο δείκτης ύφεσης ( $K$ ), ο οποίος είναι ο χρόνος (σε ημέρες) που απαιτείται για να υποχωρήσει η παροχή κατά μία τάξη μεγέθους, δηλαδή από την αρχική τιμή  $Q_0$  σε τελική τιμή ( $0,1 \cdot Q_0$ ). Παράλληλα, υπάρχει και ο χρόνος ημιζωής, ο οποίος είναι ο χρόνος (σε ημέρες) που χρειάζεται να για να μειωθεί η παροχή στο μισό της αρχικής τιμής. Ειδικότερα, ο χρόνος ημιζωής μπορεί στα περισσότερα φυσικά συστήματα να κυμαίνεται από 7 έως 21 ημέρες, ή σε περιπτώσεις που η παροχή προέρχεται από ιδιαίτερα μεγάλες φυσικές αποθήκες μπορεί ο χρόνος ημιζωής να είναι άνω των 120 ημερών (Smakhtin, 2001).

Η ολοκληρωμένη μορφή της κλασσικής συνάρτησης ύφεσης των Εξισώσεων (1.1) είναι:

$$Q_t = \alpha \cdot S_t \quad (1.2)$$

Όπου,  $S_t$ : αποθήκευση που παροχετεύεται στο ποτάμι τη χρονική στιγμή  $t$

Αυτή η σχέση ονομάζεται γραμμικό μοντέλο αποθήκευση-εκροής και υποδηλώνει ότι η ύφεση σαν συνάρτηση της πτώσης στάθμης θα σχεδιαστεί ως ευθεία γραμμή σε ημιλογαριθμική κλίμακα. Τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα των μεμονωμένων περιόδων ύφεσης είναι συνήθως καμπύλες και όχι ευθείες γραμμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν φυσικές αποθήκες που μπορούν εξίσου να συμβάλουν στη παροχή καθώς απελευθερώνουν νερό στο ποτάμι διαφορετικά από ότι ένας ρηχός υδροφόρος (Sujo et al., 2004). Δηλαδή, η καμπύλη ύφεσης είναι ουσιαστικά μια σύνθετη απεικόνιση του νερού που εκχέεται στο ποτάμι από πολλαπλές φυσικές αποθήκες. Αυτό συνάδει με τη θεώρηση ότι μια λεκάνη απορροής είναι μια σειρά διασυνδεδεμένων δεξαμενών (όπως βροχόπτωση, χιόνι, υδροφορείς, έδαφος, βιομάζα) με διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την επαναφόρτιση, την αποθήκευση και την απόρριψη (Smakhtin, 2001).

Σε μια τέτοια καμπύλη σχέση αποθήκευσης - εκροής είναι μη γραμμική. Ειδικότερα, υπάρχουν τρεις κύριοι λόγοι για αυτήν τη μη γραμμικότητα (Vande Griendetal., 2002):

- i. Η μείωση της στάθμης του νερού μειώνει συνεχώς το πραγματικό πάχος του υδροφορέα και μειώνει την ικανότητα αποστράγγισης.
- ii. Η υδραυλική αγωγιμότητα τείνει να μειώνεται καθώς το νερό οδηγείται σε μεγαλύτερα βάθη.
- iii. Μετά από παρατεταμένη αποστράγγιση, τα κατώτερα κανάλια ροής μπορούν να ξεραθούν.

Ένα άλλο σημείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, είναι ότι η συμπεριφορά ύφεσης σε ένα ποτάμι μπορεί να αλλάξει με την πάροδο των ετών. Αυτό αντικατοπτρίζεται στις διακυμάνσεις του σχήματος των τμημάτων ύφεσης που βρίσκονται στο υδρογραφικό δίκτυο· και οφείλεται σε παράγοντες όπως η κατανομή των βροχοπτώσεων στην περιοχή, η εναπομένουσα αποθήκευση στα επιφανειακά υδατικά συστήματα, η υγρασία της λεκάνης απορροής, το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου στρώματος ή το βάθος της διείδυσης του ποταμού στον υδροφόρο ορίζοντα. Η παροχή επηρεάζεται επίσης από εποχιακούς παράγοντες, όπως οι διακυμάνσεις της βροχόπτωσης και η εξατμισοδιαπνοή. Τα υψηλά ποσοστά εξατμισοδιαπνοής κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη παροχή.

Διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση ύφεσης για την αντιμετώπιση αυτής της μη γραμμικότητας και μεταβλητότητας στην ύφεση:

- i. Προσέγγιση του ημιλογαριθμικού διαγράμματος της καμπύλης ύφεσης ως τρεις ευθείες διαφορετικής κλίσης (Barnes, 1940). Οι κλίσεις αυτών των τριών γραμμών υποδηλώνουν ότι είναι οι σταθερές της ύφεσης για τα τρία κύρια συστατικά της παροχής αντίστοιχα (πλημμυρική αιχμή, ενδιάμεση απορροή, βασική απορροή). Η χάραξη των τριών γραμμών είναι δύσκολη λόγω της σταδιακής φύσης της αλλαγής της καμπυλότητας στην ύφεση.
- ii. Σχεδίαση των λόγων παροχών ( $\frac{Q_0}{Q_t}$ ) αντί για παροχή ( $Q_t$ ) στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα (Hino και Hasebe, 1984) για να διευκολυνθεί η καλύτερη ερμηνεία της ύφεσης.
- iii. Χρησιμοποιώντας ένα διπλό λογαριθμικό διάγραμμα παροχής συναρτήσει του χρόνου (Hewlett και Hibbert, 1963). Οποιαδήποτε απότομη αλλαγή στην κλίση ερμηνεύεται ως μεταβολή της παροχής.
- iv. Η μέθοδος συσχέτισης της παροχής του ποταμού  $Q$  που απεικονίζεται σε φυσική κλίμακα σε σχέση με την παροχή ( $Q_t$ ) σε κάποια χρονική στιγμή  $t$  για κάθε μία από τις καμπύλες ύφεσης που είναι εμφανείς (Langbein, 1938). Σύμφωνα με τις εκθετικές σχέσεις (Εξισώσεις 1.1), η σταθερά ύφεσης  $k$  μπορεί να ληφθεί από την κλίση της κύριας καμπύλης ύφεσης για τη χρονική στιγμή  $t$ .

$$k = \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^{\frac{1}{t}} \quad (1.3)$$

- v. Η χάραξη πολλαπλών καμπυλών ύφεσης που προέρχονται από το γράφημα σε ένα ημιλογαριθμικό γράφημα (Toebees και Strang, 1964).
- vi. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται από τις καμπύλες πολλαπλής ύφεσης για την δημιουργία της κύριας καμπύλης ύφεσης (Johnson και Dils, 1956). Οι περίοδοι ύφεσης καταγράφονται σε πίνακα και ταξινομούνται για κάθε χρονική στιγμή. Αυτό γίνεται είτε υπολογιστικά (Boughton, 1995) είτε με μια αναλυτική λύση (Singh, 1989).
- vii. Η μέθοδος που αναλύει τους λόγους της παροχής (Q) με την αντίστοιχη παροχή της κάθε χρονικής στιγμής ( $Q_t$ ). Για την εκτίμηση δεικτών όπως είναι η αναλογία μέσης ύφεσης (REC50) που θεωρείται ισάξια της σταθεράς ύφεσης,  $k$  (Smakhtin, 2001), πραγματοποιείται μέσω διαγράμματος συχνοτήτων.
- viii. Η μέθοδος προσδιορισμού της παροχής σύμφωνα με την συνάρτηση των Εξισώσεων (1.1) για καθένα από τα τμήματα της ύφεσης στο γράφημα. Οι σταθερές της ύφεσης που προκύπτουν στη συνέχεια υπολογίζονται κατά μέσο όρο (James και Thompson, 1970)
- ix. Η ανάλυση μετασχηματισμού Wavelet είναι μια τεχνική με σκοπό την διάσπαση του σήματος ώστε να εφαρμοστεί σε τομείς όπως η επεξεργασία εικόνας ή στον τομέα της γεωφυσικής. Η τεχνική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση της ύφεσης, χρησιμοποιώντας χάρτες συχνότητας με το χρόνο που ονομάζονται χάρτες μέσου τετράγωνου κύματος για την εξαγωγή σταθερών ύφεσης (Sujonoetal., 2004).
- x. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα αποθήκευσης – εκροής ή συνδυασμούς μοντέλων αποθήκευσης-εκροής για καλύτερη προσαρμογή στην καμπύλη της ύφεσης. Η κλασική λειτουργία εκθετικής συνάρτησης (Εξισώσεις(1.1)) αντιπροσωπεύει μια γραμμική σχέση μεταξύ αποθήκευσης και εκροής. Άλλες εξισώσεις έχουν αναπτυχθεί για να περιγράψουν διαφορετικούς τύπους φυσικών δεξαμενών (Πίνακας 1). Συνδυάζοντας αυτές τις εξισώσεις, οι υπολογισμοί έχουν μικρότερο σφάλμα και προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, μια απλή επιλογή είναι η προσθήκη μιας σταθεράς (b) στην εξίσωση της γραμμικής δεξαμενής:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-a \cdot t} + b \quad (1.4)$$

Αυτό παρέχει μια καλύτερη προσαρμογή στις καμπύλες της ύφεσης. Αυτή η παροχή μπορεί να προέρχεται από αποθήκευση υπόγειων υδάτων ή από αποθέματα πάγου ή χιονιού. Ένα τέτοιο μοντέλο βασίζεται στο συνδυασμό δύο δεξαμενών που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την καλύτερη προσαρμογή



των καμπυλών της ύφεσης σε μια μικρή λεκάνη απορροής (Moore, 1997). Αυτές οι δύο δεξαμενές αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς χρόνους παραμονής του νερού όταν ακολουθεί ανοδική και καθοδική πορεία αντίστοιχα εντός της λεκάνης απορροής.

- xi. Η μέθοδος Meyboom χρησιμοποιεί δεδομένα υδρογραφικής ροής για δύο ή περισσότερα διαδοχικά έτη (Meyboom, 1961). Η βασική ροή θεωρείται ότι οφείλεται αποκλειστικά στα υπόγεια ύδατα που απορρέουν από τον υδροφόρο ορίζοντα. Η ετήσια ύφεση ερμηνεύεται ως η μακροχρόνια πτώση της στάθμης του νερού κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου μετά την φάση της υγρής περιόδου (δηλαδή, την περίοδο που η ροή εμφανίζει την μέγιστη τιμή της). Η συνολική απόρριψη υπογείων υδάτων ( $V_{tp}$ ) στο ποτάμι κατά τη διάρκεια αυτής της ύφεσης προκύπτει ως εξής:

$$V_{tp} = \frac{Q_0 \cdot K}{2,3} \quad (1.5)$$

Όπου,  $Q_0$ : βασική παροχή στην αρχή της ύφεσης  
 $K$ : δείκτης ύφεσης

- xii. Η μέθοδος της μετατόπισης της καμπύλης βασίζεται στην ανοδική μετατόπιση της καμπύλης ύφεσης κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης (Rorabaugh 1964, Rutledge και Daniel 1994, Rutledge 1998). Η μέθοδος υποθέτει ότι η βασική παροχή οφείλεται αποκλειστικά στα υπόγεια ύδατα από ένα υδροφόρο στρώμα ομοιόμορφου πάχους. Με βάση τους αλγορίθμους, η συνολική επαναφόρτιση των υπογείων υδάτων κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης έχει αποδειχθεί ότι είναι περίπου διπλάσια από τη συνολική πιθανή εκροή στο ποτάμι μετά την κορυφή σε χρόνο παραμονής ( $t_r$ ). Τέλος, ο συνολικός όγκος της επαναφόρτισης των υπογείων υδάτων λόγω της βροχόπτωσης ( $R$ ) μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο.

$$R = \frac{2 \cdot (Q_2 - Q_1) \cdot K}{2,3026} \quad (1.6)$$

Όπου,  $Q_1$ : βασική παροχή πριν την καμπύλη ύφεσης  
 $Q_2$ : βασική ροή μετά την καμπύλη ύφεσης  
 $t_r$ : χρόνος παραμονής  
 $K$ : δείκτης ύφεσης

Conceptual Model	Storage-Outflow Relation	Recession Function	Storage Types	Source	Comments
Linear reservoir	$Q = kS$	$Q = Q_0 e^{-kt}$	General storage	Boussinesq (1877) Maillet (1905)	Linearised Dunit-Boussinesq equation. Approximation for short time periods
Horton double exponential		$Q = Q_0 e^{-\alpha_1 t^n}$	General storage	Horton (1933)	Transformation of linear reservoir model
		$Q = Q_0 (1 + (n-1)\alpha_0 t)^{n(1-n)}$		Contagne (1948)	
		$Q = Q_0 - Q_c (1 + (n-1)\alpha_0 t)^{n(1-n)} +$	Karstic aquifers	Padilla et al. (1994)	Qc is discharge from low-transmissivity components of karst
Channel Bank Storage		$Q = \alpha e^{-kt}$	Channel banks	Cooper and Rorabaugh, (1963)	Variant of linear reservoir. Also used to model evapotranspirative losses
Exponential reservoir	$Q = Q_0 e^{-\alpha S/D}$	$Q = Q_0 / (1 + \phi Q_0 t)$	Throughflow in soil		hydraulic conductivity assumed to exponentially decrease with depth
Power-law reservoir	$Q = \alpha S^\beta$	$Q = Q_0 (1 + \mu t)^\beta$ $p = \beta / (1 - \beta)$ $\mu = \alpha^{1/\beta} (\beta - 1) Q_0^{(\beta-1)\beta}$	Springs and unconfined aquifers ( $p = -2$ ) Soil moisture	Hall (1968) Brutsaert and Nieber (1977)	Recessions modelled using $p \sim 1.67$ (Wittenberg 1994)
Dunit-Boussinesq aquifer storage		$Q = Q_0 (1 + a_3 t)^{-2}$	Shallow unconfined aquifer	Boussinesq (1904)	Special case of power-law reservoir for Dunit-Boussinesq aquifer model
Depression Storage Detention Storage		$Q = \alpha_1 / (1 + \alpha_2 t)^3$	Surface depressions such as lakes and wetlands, Overland flow	Griffiths and Clausen (1997)	variant of power-law reservoir
Two parallel linear reservoirs	$Q = k_1 S_1 + k_2 S_2$	$Q = Q_1 e^{-k_1 t} + Q_2 e^{-k_2 t}$	Independent aquifers	Barnes (1939)	
Two serial linear reservoirs	$Q = k_2 S_2$ $\frac{dS_2}{dt} = Q_1 e^{-k_1 t} - k_2 S_2$	$Q = Q_0 e^{-k_2 t} + \frac{k_2 Q_1}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t})$			
Cavern Storage		$Q = \alpha_1 - \alpha_2 t$	Underground caverns in karst terrain	Griffiths and Clausen (1997)	
Hyperbola reservoir		$Q = \alpha_1 t^{-r} + b$	Ice melt, lakes	Toebe and Strang (1964)	
Constant reservoir		$Q = \alpha$	Permanent snow and ice pack, large groundwater storages		Constant stream flow over a finite time period

Πίνακας 1: Διαφορετικά μοντέλα αποθήκευσης -εκροής που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ύφεσης (Moore 1997, Griffiths και Clausen 1997, Dewandel.et.al 2003)

## 2. Cooper. H και Rorabaugh. M

Οι Cooper και Rorabaugh (H. H Cooper & M. I Rorabaugh) ασχολήθηκαν με την μεταφορά του νερού τόσο στην επιφάνεια όσο και στον υπόγειο υδροφορέα αλλά και με την αποθήκευση υπόγειων υδάτων. Γενικά, η εκμετάλλευση του νερού πρέπει να γίνεται αρχικά από πηγές νερού χαμηλής αξίας και μετέπειτα από πηγές νερού υψηλής αξίας, δηλαδή να χρησιμοποιούνται πρώτα τα επιφανειακά ύδατα και στη συνέχεια τα υπόγεια ύδατα.

Ωστόσο, το πρόβλημα είναι η αξιολόγηση των αλλαγών που γίνονται στα υπόγεια ύδατα, τα επιφανειακά ύδατα και στις δεξαμενές υπόγειων υδάτων. Οι αλλαγές αυτές είναι πιθανόν να προκαλούνται από πλημμυρικά φαινόμενα σε επιφανειακά ποτάμια ή από μεταβολές των υδρολογικών παραμέτρων στις δεξαμενές αποθήκευσης. Τα υδρογραφήματα που περιγράφουν τα πλημμυρικά φαινόμενα ποικίλλουν ευρέως και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, τα χρονικά και τοπικά δεδομένα της κατανομής των κατακρημνίσεων, αλλά και από την βαθμονομημένη καμπύλη παροχής σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα.

Οι συγγραφείς εξετάζοντας το πρόβλημα και για λύση αυτού χρησιμοποίησαν μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τις παραπάνω συνθήκες. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν τις αλλαγές στα υπόγεια ύδατα, την παροχή υπόγειων υδάτων και τον αποθηκευμένο όγκο του νερού. Παρόλα αυτά για την ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος, το εξέτασαν κάτω από διάφορες συνθήκες, αλλάζοντας παραμέτρους και υποθέτοντας κάποιες άλλες. Ειδικότερα, μελέτησαν τόσο τον περιορισμένο όσο και τον ελεύθερο υδροφορέα αλλάζοντας την κλίση και την διακύμανση του υδροφόρου ορίζοντα. Επίσης, θεώρησαν αμελητέες τις απώλειες, με την μεταβιβασιμότητα να παραμένει πρακτικά σταθερή όσον αφορά τον χώρο και το χρόνο.

Επίσης, ο Rorabaugh (M.I Rorabaugh, 1963) ασχολήθηκε πιο εμπεριστατωμένα με την μεταβιβασιμότητα και τις μεθόδους προσδιορισμού των χαρακτηριστικών ενός υδροφορέα. Συγκεκριμένα, μελέτησε τη σταθερά, του συντελεστή μεταβιβασιμότητας προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας  $\left(\frac{T}{S}\right)$ . Διαπίστωσε, ότι ο προσδιορισμός της σταθεράς αυτής μπορεί να πραγματοποιηθεί από τον υπολογισμό της κλίσης της καμπύλης της κύρια ύφεσης.

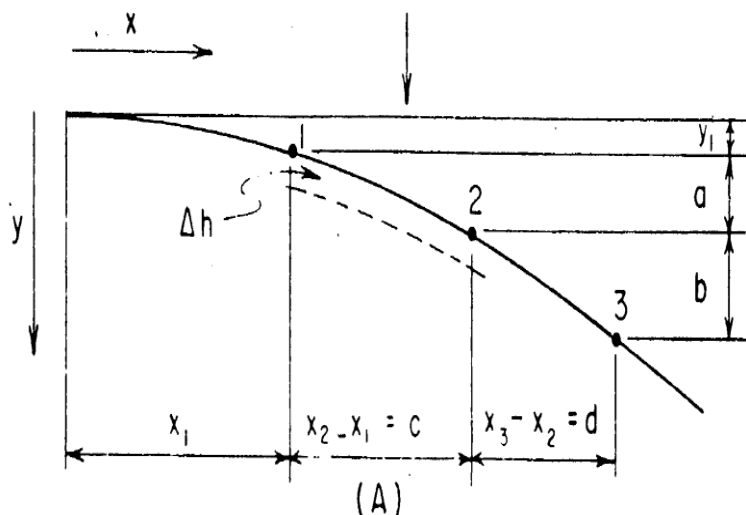
Ωστόσο, ο προσδιορισμός των συντελεστών μεταβιβασιμότητας (T), αποθηκευτικότητας (S) και κατά επέκταση της σταθεράς  $\left(\frac{T}{S}\right)$  προϋποθέτει την γνώση αρκετών μεταβλητών της περιοχής που μελετάται. Έτσι, η χάραξη της καμπύλης της ύφεσης και η διατύπωση των σωστών μαθηματικών εξισώσεων βοηθάει στον άμεσο και αξιόπιστο προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ενός υδροφορέα.

Ορισμένοι ερευνητές έχουν παρουσιάσει εξισώσεις για την παροχή του νερού σε περιορισμένο υδροφορέα, καλύπτοντας μια ποικιλία σταθερής κατάστασης και μη μόνιμων συνθηκών. Σε περιπτώσεις όμως που ο υδροφορέας είναι ελεύθερος και οι συνθήκες ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα, χρησιμοποιούνται πιο περίπλοκες εξισώσεις μετά τον προσδιορισμό των συντελεστών των υδροφορέων.

Η συνεισφορά ή η βασική παροχή ενός ρεύματος μειώνεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t_r} \quad (2.1)$$

Όπου,  $Q_0$ : η αρχική κύρια παροχή  
 $Q_t$ : η τελική κύρια παροχή  
 $t_r$ : χρόνος παραμονής



Εικόνα 3: Προφίλ στάθμης νερού σε σταθερή κατάσταση

Σχεδιάζοντας δεδομένα ύψους της στάθμης του νερού παρατηρείται ότι τις μέρες με έντονη βροχόπτωση ή μετά από στιγμιαία επαναφόρτιση η στάθμη του νερού όπως είναι λογικό, παρουσιάζει αύξηση.

$$\left(\frac{dy}{dx}\right) \cdot T = w \cdot x \quad (2.2)$$

$$dy = \left(\frac{w}{T}\right) \cdot x \cdot dx \quad (2.3)$$

Όπου,  $w$ : εμπλουτισμός ανά μονάδα περιοχής

Η απόσταση από το σημείο 1 της Εικόνας 3 έως τα υπόγεια ύδατα είναι η εξής:

$$x_1 = \frac{(a \cdot d^2 + 2 \cdot c \cdot d - b \cdot c^2)}{2 \cdot (b \cdot c - a \cdot d)} \quad (2.4)$$

$$\frac{w}{T} = \frac{2 \cdot (b \cdot c - a \cdot d)}{c \cdot d \cdot (c + d)} \quad (2.5)$$

Στην περίπτωση που σταματάει η βροχόπτωση ενώ παράλληλα δεν δίνονται πληροφορίες για τον εμπλουτισμό ( $w$ ) ή για τον συντελεστή μεταβιβασιμότητας ( $T$ ), ισχύει:

$$T \cdot \left( \frac{d_{y(n+1)}}{dx} \right) - T \cdot \left( \frac{d_{y_n}}{dx} \right) = \left( \frac{\Delta h}{\Delta s} \right) \cdot c \cdot S \quad (2.6)$$

Όπου,  $n$ : ο αριθμός του σημείου που εξετάζεται κάθε φορά

Τελικά, από την σχέση (2.5), προκύπτει :

$$\frac{T}{S} = \left( \frac{\Delta h}{\Delta t} \right) \cdot \left[ \frac{c \cdot d \cdot (c + d)}{2 \cdot (b \cdot c - a \cdot d)} \right] \quad (2.7)$$

Στη περίπτωση που στον υδροφορέα ορίζοντα υπάρχει διαρροή από τον ποταμό προς κάποια άλλη δεξαμενή ή πιθανή διήθηση σε υδροφορείς τότε προκύπτει:

$$Q_w = w \cdot (x_1 - x_w) \quad (2.8)$$

Οι σχέσεις (2.5) και (2.8) δίνουν την παρακάτω εξίσωση :

$$Q_w = \frac{2 \cdot T \cdot (b \cdot c - a \cdot d) \cdot (x_1 - x_w)}{c \cdot d \cdot (c + d)} \quad (2.9)$$

### 3. Tallaksen

Ο Tallaksen ισχυρίζεται ότι, υπάρχουν τόσοι μέθοδοι προσδιορισμού της καμπύλης ύφεσης όσες σχεδόν και οι μελέτες στο πεδίο. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη τη σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, συχνά χρησιμοποιούνται αναλυτικές εκφράσεις που αναφέρονται παρακάτω.

Η ανάλυση της ύφεσης βασίζεται στη μελέτη εκροής ( $Q = Q(t)$ ) όπου,  $Q$  είναι η παροχή και  $t_r$  ο χρόνος παραμονής. Ωστόσο, δεν υπάρχουν έγκυρες διαθέσιμες τεχνικές για τον προσδιορισμό αυτής της σχέσης. Πολλοί έχουν μελετήσει την παροχή κατά την ύφεση μέσω θεωρητικών σχέσεων, ξεκινώντας από τις βασικές εξισώσεις ροής ενώ άλλοι έχουν μελετήσει εμπειρικές σχέσεις. Με βάση τις θεωρητικές εξισώσεις για τη ροή των υπόγειων υδάτων, η αποσύνθεση του υδροφόρου ορίζοντα και ο ρυθμός εκροής μπορεί να διατυπωθεί ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών του υδροφορέα.

Ειδικότερα, οι θεωρητικές εξισώσεις για την ροή υπογείων υδάτων από την εξίσωση Boussinesq παρουσιάστηκαν από τον Singh (1968, 1969), καθώς και τους Brutsaert και Nieber (1977), τον περασμένο αιώνα, οι οποίοι έδωσαν μια πληθώρα

θεωρητικών εξισώσεων για τον υδροφορέα πολλές από τις οποίες μπορούν να προκύψουν άμεσα από το έργο του Boussinesq.

Ο Boussinesq γραμμικοποίησε την εξίσωση ροής υποθέτοντας ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργεί ως ένα σύστημα ύδρευσης Dupuit - Boussinesq. Αυτό είναι ένα σύστημα, σύμφωνα με τον Dupuit, στο οποίο η κάθετη παροχή είναι αμελητέα, ενώ παράλληλα ισχύει ότι η επίδραση του τριχοειδούς φαινομένου μπορεί να παραλειφθεί. Ακολουθεί μια γραμμικοποιημένη εξίσωση Dupuit-Boussinesq

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{C}} \quad (3.1a)$$

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-a_1 \cdot t}$$

$$Q_t = Q_0 \cdot k^t \quad (3.1)$$

Όπου,  $Q_t$ : παροχή στο χρόνο  $t$   
 $Q_0$ : παροχή όταν  $t = 0$   
 $C, a_1$  και  $k$ : σταθερές

Η καμπύλη αποτυπώνεται ως μια ευθεία γραμμή με κλίση  $\log k$  σε ημιλογαριθμικό γράφημα του  $t$  ως προς το  $\log Q_t$ . Όσον αφορά τον συμβολισμό  $C$  στην Εξίσωση(3.1a) είναι ο χρόνος που έχει περάσει μεταξύ μιας οποιασδήποτε παροχής  $Q$  και της επακόλουθης παροχής  $\frac{Q}{e}$  στην ύφεση. Το  $C$  σχετίζεται με το χρόνο ημιζωής σύμφωνα με την εξίσωση

$$C = -\frac{t_{0,5}}{\left(\ln \frac{1}{2}\right)} \quad (3.2)$$

Όπου,  $t=0,5$  :χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί στο ήμισυ η κύρια παροχή  
 $C$ : διάσταση του χρόνου  
 $k$  :αδιάστατη ποσότητα που εξαρτάται από το χρόνο

Το  $C$  σχετίζεται με το  $k$  σύμφωνα με την ακόλουθη έκφραση:

$$C = -\frac{t}{\ln k} \quad (3.3)$$

Όπου,  $t = 1$  αντιπροσωπεύει μία μονάδα χρόνου

$k$ : από την Εξίσωση (3.3) μπορεί να πάρει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ , αλλά συνήθως για μια τιμή  $k$  στο αρχικό τμήμα της καμπύλης ύφεσης, ισχύει  $k > 0,7$ . Στην περίπτωση που παρουσιάζονται πολύ αργοί ρυθμοί ύφεσης, το  $k$  παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές. Αν ωστόσο ο ρυθμός ύφεσης παραμένει σταθερός πρέπει να εφαρμοστούν, στο πλαίσιο της στατιστικής ανάλυσης, ειδικές παραδοχές σχετικά με τις ιδιότητες του υδροφορέα. Επομένως, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη αυτές οι παράμετροι της σταθερής ύφεσης όταν είναι απαραίτητο.

Ο Horton (1933) πρότεινε τη μη γραμμική σχέση:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot t^m} \quad (3.4)$$

Όπου,  $\alpha_2$  και  $m$  είναι σταθερές

Αυτή η έκφραση συχνά αναφέρεται ως εξίσωση Horton. Η Εξίσωση (3.4) μπορεί να εξαχθεί από την παραπάνω Εξίσωση (3.2) μετά από μετασχηματισμό (Hall, 1968).

Ο Boussinesq παρουσίασε το 1904 μια ακριβή λύση για τη μη γραμμική διαφορική εξίσωση ροής υποθέτοντας ένα υπόδειγμα υδροφόρου ορίζοντα Dupuit-Boussinesq με μηδενική στάθμη νερού στο ποτάμι (Hall, 1968).

Η μη γραμμική σχέση αποδίδεται ως

$$Q_t = Q_0 \cdot (1 + \alpha_3 \cdot t)^{-2} \quad (3.5)$$

Όπου,  $\alpha_3$  είναι μια σταθερά

Η Εξίσωση (3.5) σύμφωνα με το Boussinesq, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Maillet στην ανάλυση χαμηλής παροχής του ποταμού Vanne (Brutsaert και Nieber, 1977). Ο Maillet δημοσίευσε το 1905 ένα βιβλίο στο οποίο απέδειξε την εφαρμοσιμότητα των Εξισώσεων (3.1) και (3.5) (Hall, 1968).

Οι Werner και Sundquist (1951) περιέγραψαν, την εκροή από έναν περιορισμένο υδροφόρο ορίζοντα,  $(Q_t)$  ως ένα σύνολο ( $n$ ) εκθετικών όρων.

$$Q_t = Q_0 \cdot \sum_{i=1}^n b_i \cdot e^{-(a_i \cdot t)} \quad (3.6)$$

Όπου,  $a_i$  και  $b_i$  είναι σταθερές

Συνήθως, χρειάζεται μόνο ένας όρος, οδηγώντας στην απλή εκθετική λειτουργία Εξίσωση (3.1). Ο Nutbrown (1975) εφάρμοσε την ανάλυση της ροής των υπόγειων υδάτων ένα μερικό διεισδυτικό ρεύμα. Με βάση τις εξισώσεις ροής και την εγκυρότητα των υποθέσεων Dupuit, το  $(Q_t)$  εκφράστηκε ως εξής:

$$Q_t = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot K_i^t \quad (3.7)$$

Όπου,  $A, I$  είναι σταθερές

Οι σταθερές  $A, I$  εξαρτώνται από την αρχική τιμή της ροής,  $Q_0$ , και από την αρχική τιμή της κατανομής των υδραυλικών υψών στον υδροφόρο ορίζοντα. Ο

Nutbrown και ο Downing (1976) δήλωσαν ότι υπάρχει ένας μόνο εκθετικός όρος στην Εξίσωση(3.7) όταν η ροή στον υδροφορέα είναι σχετικά ομαλή. Το αποτέλεσμα δεν συνάδει με εκείνο που προκύπτει σύμφωνα με τους Singh και Stall (1971), καθώς οι εξισώσεις ισχύουν υπό διαφορετικές οριακές συνθήκες των χαρακτηριστικών του υδροφορέα. (Tallaksen, 1995)

Η εκροή που δίνεται από την Εξίσωση (3.1) είναι ισοδύναμη με την εκροή (Q) που δίνεται σύμφωνα με το γραμμικό μοντέλο αποθήκευσης χωρίς εισροή (I) ( $p = 1$  και  $K = \frac{1}{c}$  στην Εξίσωση (3.8)). Η εκθετική εξίσωση γενικά δεν αποτυπώνει ικανοποιητικά τη παροχή κατά την ύφεση σε ένα ευρύ φάσμα παροχών. Επίσης, η αποθήκευση της λεκάνης απορροής πρέπει να εκφράζεται με μη γραμμικό τρόπο.

Η εκροή ενός μοντέλου αποθήκευσης μπορεί να προκύψει από τον τύπο:

$$Q = K \cdot S^p \quad (3.8)$$

Όπου,  $S$  :είναι αποθηκευτικότητα  
 $K$  και  $p$ : είναι σταθερές

Το μοντέλο αποθήκευσης είναι γραμμικό μόνο αν το τμήμα της καμπύλης ύφεσης είναι γραμμικό. Αν το  $p$  είναι μεγάλο, η καμπύλη ύφεσης θα παρουσιάζει τα κοίλα προς τα κάτω ενώ αν είναι μικρό, τότε θα ισχύει το ανάποδο δηλαδή, θα εμφανίζει τα κοίλα προς τα πάνω. Στη περίπτωση που το  $p$  είναι συνάρτηση του  $S$ , η εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$Q = K \cdot S^{(1+q \cdot S)} \quad (3.9)$$

Όπου,  $q$  είναι μια σταθερά

Η μεταβολή της αποθήκευσης με το χρόνο, επιλέγεται μόνο για τα τμήματα κατά την διάρκεια της ύφεσης (Wittenberg,1993), η οποία μπορεί να υπολογιστεί δεδομένης της εξίσωσης συνέχειας

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (3.10)$$

Για μη γραμμικά μοντέλα ( $p \neq 1$  (Brutsaert και Nieber, 1977)στην Εξίσωση(3.10)) με μηδενικές εισροές, η εκροή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_t = Q_0 \cdot (1 + a_4 \cdot t)^{\frac{1}{1-p}} \quad (3.11)$$

Όπου,  $a_4$  : είναι μια σταθερά



Η σταθερά αυτή ( $a_4$ ) είναι ίδια με αυτήν που αναφέρθηκε παραπάνω στην Εξίσωση (3.6). Για  $p = 2$ , δείχνει ότι ο υδροφόρος ορίζοντας που σχεδιάστηκε σύμφωνα με την Εξίσωση (3.6) έχει τα ίδια χαρακτηριστικά αποστράγγισης με το μοντέλο αποθήκευσης.

Η καμπύλη ύφεσης μπορεί να σχεδιαστεί ως συνδυασμός γραμμικών καμπυλών, αντί να εφαρμοσθεί μια μη γραμμική εξίσωση αποστράγγισης. Ειδικότερα, ένας υδροφορέας μπορεί να είναι γραμμικοποιημένος, μοντελοποιώντας το ως σύνολο των ( $n$ ) γραμμικών στοιχείων με μια σειρά από σταθερές ύφεσης  $C_i$ , που προσδιορίζονται από την εξίσωση:

$$Q_t = \sum_{i=0}^n Q_{0i} \cdot e^{-\frac{t}{C_i}} \quad (3.12)$$

Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι η ροή είναι το άθροισμα διαφορετικών εκθετικών όρων. Έχει την ίδια μορφή με τις Εξισώσεις (3.7) και (3.8).

### 3.1 Μοντελοποίηση ύφεσης ως αυτορρυθμιζόμενη διαδικασία

Σύμφωνα με την Εξίσωση(2b), για  $t = 1$  και την προσθήκη ενός όρου σφάλματος, δίνεται η παρακάτω έκφραση:

$$Q_{t+1} = k \cdot Q_t + e_{t+1} \quad (3.13)$$

Όπου,  $e_t$ : θεωρούνται ανεξάρτητα κανονικά κατανομημένα σφάλματα με μηδενικό μέσο όρο και σταθερή διακύμανση

Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε από τους James και Thompson (1970) και Vogel και Kroll (1991) για τη μοντελοποίηση των εκροών. Ο όρος σφάλματος περιλαμβάνει τα δύο μοντέλα και τα αντίστοιχα σφάλματα μέτρησης. Τα σφάλματα ροής δεν μπορούν γενικά να θεωρούνται ανεξάρτητα από τη μετρούμενη ροή και εκφράζονται συνήθως σε ποσοστό της παροχής.

Συμπεριλαμβανομένων δύο σταθερών κλίσης  $k_1$  και  $k_2$ , η Εξίσωση (3.13) μπορεί να επεκταθεί σε ένα δεύτερο μοντέλο,

$$Q_{t+1} = f \cdot Q_t + g \cdot Q_{t-1} + e_{t+1} \quad (3.14)$$

Όπου,  $f = k_1 + k_2$   
 $g = -k_1 \cdot k_2$

### 3.2 Εμπειρικές σχέσεις

Υπάρχει επίσης δυνατότητα εφαρμογής της Εξίσωσης (3.1) σε πολλές εμπειρικές μελέτες, καθιστώντας την σε μια από τις πιο χρήσιμες εξισώσεις στην ανάλυση της ύφεσης. Μια απλή εναλλακτική λύση για την Εξίσωση (3.1) επιτυγχάνεται προσθέτοντας μια σταθερά:

$$Q_t = (Q_0 - b) \cdot e^{-\frac{t}{c}} + b \quad (3.15)$$

Η εξίσωση σύμφωνα με τους Toebes και Strang (1964), προτείνεται για χρήση σε περιοχές που καλύπτονται με χιόνι και πάγο. Ειδικότερα, η Εξίσωση (3.15) εφαρμόστηκε από τους Radczuk και Szarska (1989) σε ποτάμια στην Πολωνία, προσδιορίζοντας το  $b$  ως τη βασική απορροή.

Με βάση μια εμπειρική μελέτη, ο Otnes αργότερα διαπίστωσε την εξίσωση (Otnes, 1978)

$$Q_t = a_6 \cdot t^{-r} \quad (3.16)$$

Όπου,  $a_6$  και  $r$  είναι σταθερές

Για ( $r > 1$ ) περιγράφονται κατάλληλα οι νορβηγικές λεκάνες απορροής. Μέχρι πρόσφατα, οι μελέτες στη Νορβηγία βασίζονται συνήθως στην Εξίσωση (3.16).

Συνοπτικά, εξισώσεις με μόνο μία σταθερά είναι προτιμότερες, καθώς είναι δύσκολο να ερμηνευθεί η σημασία δύο ή περισσότερων παραμέτρων. Από την άλλη πλευρά, εξισώσεις με περισσότερες από μία παραμέτρους καταλήγουν σε καλύτερα αποτελέσματα και περιγράφουν καλύτερα την λεκάνη απορροής που μελετάται την κάθε φορά. Όταν το κλίμα της περιοχής που μελετάται είναι υγρό, δηλαδή υπάρχουν συχνές βροχοπτώσεις παρατηρείται διακοπή της περιόδου ύφεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παράγεται μια σειρά από τμήματα ύφεσης με διαφορετική διάρκεια. Αρκετές μέθοδοι έχουν εξελιχθεί έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια κύρια καμπύλη παρά τη μεγάλη μεταβλητότητα που συναντάται στην ύφεση των επιμέρους τμημάτων. Τα τμήματα αυτά αντιπροσωπεύουν διαφορετικά στάδια και περιγράφουν την φυσική βραχυπρόθεσμη ή εποχιακή διακύμανση της ύφεσης.

Βασιζόμενοι στην μελέτη του Tallaksen, πολλοί ερευνητές έχουν δημοσιεύσει αντίστοιχες μελέτες (Arnold et al., 1995, Nathan και Mc.Mahon, 1990, Sujono et al., 2004, Brodie και Hostetler, 2004)

#### 4. Steward

Ο Steward είναι και αυτός ένας από τους υποστηρικτές της θεωρίας ότι η ανάλυση και ο προσδιορισμός της καμπύλης της ύφεσης είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί την κατάλληλη έρευνα και σύγκριση των στοιχείων για την ολοκληρωμένη και σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων.

Συγκεκριμένα, θεωρεί ότι οι ερευνητές θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν περισσότερες από μία μέθοδο λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών της κάθε λεκάνης απορροής που μελετάται (Brutsaert και Nieber 1977, Vogel και Kroll 1992, Kirchner 2009).

Το ζήτημα του κατά πόσο οι αποθήκες νερού μπορούν να αντιμετωπίζονται ως γραμμικές δεξαμενές ή ως μη γραμμικές έχει επίσης συζητηθεί ευρέως στην βιβλιογραφία στην περίπτωση της ανάλυσης ύφεσης, μεταξύ άλλων, από τους Brutsaert και Nieber (1977), Tallaksen (1995), Lamb και Beven (1997) και Feniciaetal,(2006).

Οι γραμμικές δεξαμενές απαιτούν μόνο μία παράμετρο και είναι πιο ελκυστικές μαθηματικά. Αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής.

Στη μη γραμμικότητα γίνεται χρήση δύο ή περισσότερων γραμμικών δεξαμενών. Παράλληλα, απαιτούνται περισσότερες παράμετροι (τρεις στην περίπτωση δύο δεξαμενών).

Η γραμμική αποθήκευση εκφράζεται με τη διατύπωση:

$$V = \frac{Q}{\beta} \quad (4.1)$$

Όπου,  $V$ : όγκος αποθήκευσης  
 $\beta$ : μια σταθερά ( $T^{-1}$ )

Η εκθετική σχέση ακολουθείται για τη βασική ροή ύφεσης:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-b \cdot t} \quad (4.2)$$

Όπου,  $Q_0$ : η αρχική παροχή ύφεσης της ύφεσης

Ωστόσο, στην περίπτωση της μη γραμμικότητας χρησιμοποιείται συχνά (Wittenberg, 1999), η παρακάτω εξίσωση:

$$V = e \cdot Q^b \quad (4.3)$$

Όπου,  $e$  και  $b$  είναι σταθερές

Από την Εξίσωση (4.3) μπορεί να εξαχθεί η εξίσωση της ύφεσης ως,

$$Q_t = Q_0 \cdot \left[ 1 + \frac{(1-b) \cdot Q_0^{(1-b)}}{e \cdot b} \cdot t \right]^{\frac{1}{(b-1)}} \quad (4.4)$$

Ο εκθέτης  $b$  έχει βρεθεί ότι λαμβάνει διάφορες τιμές μεταξύ 0 και 1,1 με μέσο όρο κοντά στο 0,5 (Wittenberg, 1999).

- Για  $b=1$  δίνει το μοντέλο γραμμικής αποθήκευσης (Εξίσωση (4.1) και Εξίσωση (4.2))
- Για  $b=0,5$  ισχύει η Εξίσωση (4.3)

$$Q_t = Q_0 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{a \cdot e} \cdot Q_0^{0,5} \cdot t \right]^{-2} \quad (4.5)$$

Αυτή η τετραγωνική εξίσωση είναι παρόμοια με την εξίσωση που προέκυψε νωρίτερα από τον Boussinesq (1903). Αποτελεί, αναλυτική λύση των υπόγειων υδάτων εντός του υδροφορέα.

$$Q_t = Q_0 \cdot (1 + a \cdot t)^{-2} \quad (4.6)$$

με

$$a = \frac{K \cdot B}{P \cdot L^2} \quad (4.7)$$

Όπου,  $K$  :υδραυλική αγωγιμότητα

$P$ : το ενεργό πορώδες

$B$ : το πραγματικό πάχος του υδροφορέα

$L$ : το μήκος της διαδρομής που διανύει το νερό (Dewandel, 2003)

Αυτή η τετραγωνική μορφή είναι πιθανό να δώσει σωστές τιμές για τις ιδιότητες του υδροφόρου ορίζοντα διότι αποτελεί μια ακριβή αναλυτική λύση της εξίσωσης της διάχυσης. Ενώ υπάρχουν άλλες μορφές, όπως για παράδειγμα οι εκθετικές εξισώσεις, που είναι πιο προσεγγιστικές.

Οι Brutsaert και Nieber (1977) παρουσίασαν μια μέθοδο που συσχετίζει την αποταμίευση με τη βασική απορροή, η οποία περιγράφει τη παροχή από ένα παρακείμενο υδροφορέα σε ένα ποτάμι. Η αρνητική κλίση της καμπύλης ύψους, είναι δηλαδή η κλίση της καμπύλης που σχεδιάζεται κατά την εκφόρτιση (Kirchner, 2009). Η μέθοδος δίνει

$$Q = \frac{(Q_{t-1} + Q_t)}{2} \quad (4.8)$$

με αρνητική τιμή παροχής ισχύει,

$$-\frac{dQ}{dt} = Q_t - Q_{(t-1)} \quad (4.9)$$

Η μεταβολή της αποθήκευσης νερού στη λεκάνη απορροής δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας:

$$\frac{dV}{dt} = R - E - Q \quad (4.10)$$

Όπου, R: βροχόπτωση  
E: εξατμισοδιαπνοή

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει επαναφόρτιση ή κάποια άντληση, ισχύει:

$$\frac{dV}{dt} = -Q \quad (4.11)$$

η οποία σε συνδυασμό με την Εξίσωση (4.5) οδηγεί σε

$$-\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{e \cdot b} \cdot Q^{2-b} = c \cdot Q^d \quad (4.12)$$

Ο εκθέτης  $d$  ανάλογα με το σύστημα που περιγράφει η Εξίσωση (4.12) παίρνει διαφορετικές τιμές. Ειδικότερα, όταν παρατηρείται γραμμική συμπεριφορά ισχύει  $d = 1$ , στην αντίθετη περίπτωση, για μη γραμμική συσχέτιση, το  $d$  είναι διάφορο του μηδενός ( $d \neq 0$ ).

Σύμφωνα με ερευνητές, οι οποίοι έχουν μελετήσει την εξάρτηση του  $\left(-\frac{dQ}{dt}\right)$ , το  $d$  για τις χαμηλές παροχές έχει συχνά μέσο όρο κοντά στο 1,5 (Brutsaert και Nieber 1977, Wittnberg 1999, Dewandel 2003, Stoelzle et al., 2013). Ενώ υψηλότερες τιμές του  $d$ , όπως για παράδειγμα  $d=3$ , αφορούν μεγαλύτερες παροχές στα πρώτα τμήματα της ύφεσης. Ωστόσο, υπάρχουν προβλήματα κατά τον προσδιορισμό των τιμών της παραμέτρου  $d$ , που οφείλονται σε δυο λόγους:

- i. Διαφορετικά κριτήρια επιλογής για σημεία δεδομένων και
- ii. Διαφορετικές μέθοδοι προσαρμογής παραμέτρων στο μοντέλο αποθήκευσης – εκροής.

Υπάρχει γενικά μεγάλη διασπορά των σημείων, τα οποία κάνουν την προσαρμογή των παραμέτρων δύσκολη. Σαφώς η εξατμισοδιαπνοή είναι πιθανό να επηρεάζει την διασπορά καθώς έχει παραλειφθεί από την Εξίσωση (4.8).

Μια νέα προσέγγιση στην εφαρμογή της ανάλυσης κατά την διάρκεια της ύφεσης γίνεται μέσω γραφικής παράστασης. Το σκεπτικό για αυτό οφείλεται στο ότι η γρήγορη παροχή και η βασική παροχή προκύπτουν από διαφορετικές αποθήκες εντός της λεκάνης απορροής. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δεν είναι χαρακτηριστικά για την λεκάνη απορροής και αυτό τα καθιστά παραπλανητικά για την εξαγωγή συμπερασμάτων όπως έχει αποδειχθεί για τη λεκάνη απορροής Glendhu (Bonnelletal.,1990).

## 5. Μέθοδος IDW (Inverse Distance Weighted Method)

Οι μέθοδοι γεωστατιστικής ανάλυσης αποσκοπούν στον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής μεταβλητών σε σημεία μιας περιοχής όπου οι μεταβλητές αυτές δεν είναι γνωστές. Ωστόσο, οι κλασικές γεωστατικές μέθοδοι περιέχουν περίπλοκους μαθηματικούς περιορισμούς που αφορούν την εφαρμογή τους.

Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος IDW, σύμφωνα με την οποία μπορούν να πραγματοποιηθούν υπολογισμοί στον εξεταζόμενο χώρο χρησιμοποιώντας τουλάχιστον δυο σημειακές μετρήσεις.

Η τιμή της υδραυλικής παραμέτρου  $\frac{T}{S}$  σε κάθε σημείο μιας επιφάνειας εκτιμάται από τις σημειακές μετρήσεις με τον ακόλουθο τρόπο:

$$P_j = \sum W_{jg} \cdot P_g \quad (5.1)$$

Όπου,  $P_j$ : τιμή στο σημείο j

$P_g$ : υδραυλικής παραμέτρου  $\frac{T}{S}$  στο σημείο g

$W_{jg}$ : συντελεστής βάρους του σταθμού g στο σημείο j

Για τη μέθοδο IDW οι συντελεστές βάρους  $W_{jg}$  αποτελούν συνάρτηση μόνο της απόστασης καθενός από τα σημεία J και καθενός από τους σταθμούς G. Έτσι, ο συντελεστής βάρους για τη μέτρηση  $P_g$  προκύπτει από την ακόλουθη σχέση :

$$W_{jg} = \frac{d(j, g)^{-b}}{\sum_g d(j, g)^{-b}} \quad (5.2)$$

Όπου,  $d(j, g)$ : η απόσταση μεταξύ των σημείων και του σταθμού

b: επιλεγόμενη παράμετρος

Η επιλεγόμενη παράμετρος b ανάλογα με την τιμή της εκφράζει και μια διαφορετική συνθήκη. Ειδικότερα, όταν η τιμή της b ισούται με την μονάδα τότε θεωρείται ότι η παράμετρος εκφράζει τον συντελεστή αντίστροφης απόστασης. Επίσης στη περίπτωση που  $b=2$  τότε χαρακτηρίζεται ως ο συντελεστής τετραγώνου αντίστροφης απόστασης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν ένα σημείο είναι ταυτόχρονα και σταθμός, τότε η Εξίσωση (5.2) δεν μπορεί να οριστεί και να προκύψει αποτέλεσμα. Σε αυτή την περίπτωση, το σημείο της επιφάνειας παίρνει την τιμή της μέτρησης στο σταθμό και οι υπόλοιποι συντελεστές βάρους είναι μηδενικοί.

Τέλος, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η χρήση της μεθόδου IDW δίνει σαφείς απαντήσεις και είναι αποτελεσματική στη χάραξη ενός πανευρωπαϊκού χάρτη.

## Μεθοδολογία

Η επιλογή της μεθόδου για την παρούσα εργασία δεν είναι απλή απόρροια των παραπάνω θεωρητικών δεδομένων. Ειδικότερα, όλες οι επιστημονικές δημοσιεύσεις που παρατέθηκαν έχουν ισάξια βαρύτητα, καθώς πραγματεύονται με αντίστοιχο τρόπο την τεχνική της ανάλυσης της ύφεσης.

Ωστόσο, τελική επιλογή αποτέλεσε η μέθοδος των Cooper.H.και Rorabaugh.M. με κριτήριο την συνδυαστική και πολυεπίπεδη προσέγγιση της εκτίμησης των παραμέτρων του υδροφορέα.

1. Προσδιορισμός παραμέτρου του υπόγειου υδροφορέα από μετρήσεις παροχής στο ποτάμι.

Για τον προσδιορισμό της παραμέτρου του υδροφορέα, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος στο περιβάλλον προγραμματισμού Matlab με σκοπό τον υπολογισμό των κύριων καμπυλών ύφεσης των υπόγειων υδάτων λόγω της απορροής τους από ποταμούς προς τους υπόγειους υδροφορείς και αντίστροφα. Επίσης, μέσω αυτής της διαδικασίας υπολογίστηκε η χρήσιμη παράμετρος  $\frac{T}{S}$ , η υδραυλική σταθερά του συντελεστή μεταβιβασιμότητας (T) προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας (S).

Συγκεκριμένα, η κατάλληλη αυτή επεξεργασία πραγματοποιήθηκε σε εφαρμογές ηλεκτρονικών υπολογιστών που μπορούν εύκολα να διαβάζουν διαθέσιμα δεδομένα, να κάνουν υπολογισμούς και να παρέχουν αποτελέσματα χωρίς την ανάγκη αλληλεπίδρασης με το χρήστη. Αυτή η επεξεργασία λοιπόν, πραγματοποιείται σε ένα μοντέλο γλώσσας προγραμματισμού MATLAB βασιζόμενη σε προηγούμενες εργασίες και με αντίστοιχο τρόπο όπως γίνεται η επεξεργασία στο μοντέλο RECESS που αναπτύχθηκε από την USGS. Όσον αφορά το μοντέλο RECESS και το χαρακτηριστικό του, που θα λειτουργούσε ως τροχοπέδη στην παρούσα εργασία, είναι η ανάγκη για άμεση αλληλεπίδραση του χρήστη με το μοντέλο. Διότι, ο καθορισμός των τμημάτων της ύφεσης αποτελεί απαραίτητο βήμα για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Αντιθέτως, με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε σε MATLAB δεν υπάρχει ανάγκη να αλληλεπιδρά ο εκάστοτε χρήστης με το πρόγραμμα, καθώς αυτόματα επιλέγονται τα τμήματα εκείνα που θα είναι χρήσιμα για τον υπολογισμό των παραμέτρων του υδροφορέα. Τέλος, η επιλογή αυτή των σχετικών τμημάτων είναι πλήρως αυτοματοποιημένη βάσει κανόνων που στηρίζονται στην επιστημονική βιβλιογραφία.

### 1.1 Ανάλυση ύφεσης

Η διαδικασία ανάλυσης της ύφεσης πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Κατά αρχάς, στο πρώτο στάδιο, το μοντέλο αναλύει τις χρονοσειρές της απορροής. Στην

συνέχεια της διαδικασίας, γίνεται ανάλυση παλινδρόμησης για τον υπολογισμό του δείκτη ύφεσης. Ενώ στο τέλος, με δεδομένο τον δείκτη ύφεσης, γίνεται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών του υδροφορέα.

Αναλυτικότερα, στη παραπάνω διαδικασία, το μοντέλο προσδιορίζει εκείνα τα τμήματα που ο αριθμός των διαδοχικών ημερών ύφεσης είναι πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο. Ο λόγος αυτού του καθορισμού έγκειται στην αναγκαιότητα προσδιορισμού επαρκούς αριθμού σημείων, ώστε να εκτελεστεί με αποτελεσματικότητα η ανάλυση παλινδρόμησης στο επόμενο στάδιο. Στο μεταγενέστερο στάδιο, λοιπόν, ο δείκτης ύφεσης προκύπτει από το ημιλογαριθμικό διάγραμμα της απορροής με την πάροδο του χρόνου ενώ παράλληλα σημαντικό στάδιο στην επεξεργασία αποτελεί και ο προσδιορισμός των γεωμετρικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής μέσω της πλατφόρμας GIS.

## 1.2 Προεπεξεργασία

Όπως έχει αναφερθεί λεπτομερειακά στο θεωρητικό υπόβαθρο, είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της κύριας παροχής από άλλες διαδικασίες εκτός των υπόγειων υδάτων. Στη βασική απορροή είναι πιθανόν να συμβάλει η επιφανειακή ή και υπόγεια απορροή αλλά ακόμα και η εξατμισοδιαπνοή. Για το λόγο αυτό και με σκοπό την αποφυγή του προβλήματος αυτού, στον καθορισμό των ημερών για τον ορισμό ενός τμήματος ύφεσης, δεν λαμβάνεται υπόψη το αρχικό χρονικό διάστημα των δύο ημερών στην καμπύλη ύφεσης (Tallaksen, 1995).

## 1.3 Δείκτης ύφεσης

Για τον υπολογισμό του δείκτη ύφεσης και κατά συνέπεια της κύριας καμπύλης ύφεσης, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα MATLAB μέσω μιας πλήρως αυτοματοποιημένης διαδικασίας. Η εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα μπορεί να έχει την μορφή κάποιου αρχείου εύκολα αναγνώσιμου από τη γλώσσα προγραμματισμού ή να έχει την μορφή πινάκων τους οποίους το MATLAB αναγνωρίζει πολύ εύκολα και είναι πολύ γρήγορο στην εργασία με αυτούς.

Μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των στοιχείων, το πρόγραμμα επεξεργάζεται το σύνολο των δεδομένων όλων των σταθμών. Από τον κάθε σταθμό επιλέγονται τα τμήματα που εμφανίζουν συνεχή ύφεση στον καθορισμένο αριθμό ημερών. Επομένως, δεκτά γίνονται τα τμήματα αυτά όπου δεν παρουσιάζουν κάποια ασυνέχεια λόγω μη καταγραφής ή έλλειψης των δεδομένων. Ταυτόχρονα όμως δεν γίνεται δεκτό και το αρχικό τμήμα της καμπύλης ύφεσης που αντιστοιχεί στο αρχικό χρονικό διάστημα, δηλαδή στον αριθμό των δυο πρώτων ημερών όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Όταν ο αλγόριθμος εντοπίζει όλα τα τμήματα ενός συγκεκριμένου σταθμού, τα αναλύει και υπολογίζει την καλύτερη γραμμική προσαρμογή μεταξύ του χρόνου και του λογαρίθμου της παροχής. Η μαθηματική έκφραση έχει την εξής μορφή:

$$t_r = K_1 \cdot \log Q + K_2 \quad (1)$$

Όπου,  $t_r$ : χρόνος παραμονής (d)

$\log Q$ : λογάριθμος της παροχής σε  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$K_1, K_2$  : συντελεστές που προσδιορίζονται με γραμμική παλινδρόμηση



Ο δείκτης ύφεσης ( $K_1$ ) είναι η απόλυτη τιμή του χρόνου παραμονής (ημέρες) προς την λογαριθμική παροχή ( $\log Q$ ). Δηλαδή:

$$\text{Δείκτης ύφεσης} = |K_1| \quad (2)$$

Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει αυτή τη διαδικασία για τον συνολικό αριθμό των τμημάτων. Έτσι, υπολογίζεται ο δείκτης ύφεσης για κάθε σταθμό. Στη συνέχεια, εκτελούνται υπολογισμοί για να την καλύτερη γραμμική έκφραση της Εξίσωσης (1).

$$K = a_1 \cdot \log Q + a_2 \quad (3)$$

Οι συντελεστές  $a_1$  και  $a_2$  της παραπάνω Εξίσωσης (3) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών (A, B, C) της πολυωνυμικής συνάρτησης του χρόνου με τον λογάριθμο της παροχής, δηλαδή της κύριας καμπύλης ύφεσης.

$$t = A \cdot (\log Q)^2 + B \cdot (\log Q) + C \quad (4)$$

Όπου  $t$ : χρόνος (days)

A, B, C: συντελεστές πολυωνυμικής συνάρτησης

Η κύρια καμπύλη ύφεσης είναι το αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης της Εξίσωσης (3)

$$\Rightarrow \int K \cdot d(\log Q) = \int (a_1 \cdot \log Q + a_2) \cdot d(\log Q) = \frac{a_1}{2} \cdot (\log Q)^2 + a_2 \cdot (\log Q) + c_1 \quad (5)$$

Από την Εξίσωση (1) προκύπτει ότι το  $K$  εκφράζει τον ρυθμό μεταβολής του χρόνου προς το ρυθμό μεταβολής της λογαριθμικής παροχής (Εξίσωση (6)). Λογαριθμίζοντας την Εξίσωση (6), λύνεται το σύστημα των Εξισώσεων (5) και (6). Προκύπτει έτσι, το άθροισμα του χρόνου με την σταθερά  $c$  (Εξίσωση (7)).

$$\stackrel{(1)}{\Rightarrow} K = \frac{dt}{d(\log Q)} \quad (6)$$

$$\int K \cdot d(\log Q) = \int \frac{dt}{d(\log Q)} \cdot d(\log Q) = t + c \quad (7)$$

Όπου,  $C_1$ : συντελεστής με  $C_1 = t + c$

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (5) και (7), προκύπτει μια νέα Εξίσωση (8) που έχει ακριβέστερη μορφή από αυτή της Εξίσωσης (4).

$$t = \frac{a_1}{2} \cdot (\log Q)^2 + a_2 \cdot (\log Q) + c_1 - c \quad (8)$$

Τέλος, από την Εξίσωση (8) είναι εύκολο να προσδιοριστούν οι συντελεστές A και B της Εξίσωσης (4) ως εξής:

$$A = \frac{a_1}{2} \quad (9)$$

$$B = a_2 \quad (10)$$

$$C = c_1 - c \quad (11)$$

Όσον αφορά, την σταθερά C, ισχύει ότι μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι για την κύρια καμπύλη ύφεσης σε χρόνο  $t = 0$ , το  $\log Q$  παίρνει τη μέγιστη τιμή του από όλα τα επιλεγμένα τμήματα ύφεσης. Αυτό οδηγεί σε μια μοναδική αναγνώριση της παραμέτρου C από την Εξίσωση (4):

$$C = -A \cdot (\log Q_{\max})^2 - B \cdot (\log Q_{\max}) \quad (12)$$

## 2. Χάραξη πανευρωπαϊκού χάρτη

Η ολοκληρωμένη απεικόνιση των αποτελεσμάτων και η χάραξη του πανευρωπαϊκού χάρτη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της μεθόδου IDW (Inverse Distance Weighted Method), η οποία παρουσιάζει μια παρεμβολή αντίστροφης απόστασης για ένα άγνωστο σημείο, από ένα δείγμα γνωστών τιμών.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιούνται στατιστικές παράμετροι για την ανάλυση και τοπογραφική απεικόνιση αυτών, σε συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS). Τέτοια χρήσιμα στατιστικά στοιχεία αποτελούν οι τιμές της μεταβλητές  $\left(\frac{T}{S}\right)$ , δηλαδή οι τιμές των συντελεστών μεταβιβασιμότητας προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας.

Επεξηγηματικά, για την εκτέλεση της μεθόδου αυτής, θα πρέπει να ακολουθηθούν μια σειρά από εντολές που θα βοηθήσουν στη πραγμάτωση της. Αρχικά, θα πρέπει να συγκεντρωθούν οι πληροφορίες των σταθμών και με βάση αυτές να καταρτιστούν οι επιφάνειες. Στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η οριοθέτηση της περιοχής, στην οποία θα πραγματοποιηθεί η επεξεργασία. Ενώ στο τελικό στάδιο, η μέθοδος αφήνει το περιθώριο στο χρήστη να καθορίζει τη σπουδαιότητα των γνωστών σημείων για τον προσδιορισμό της παρεμβαλλόμενης τιμής, βασισμένη στην απόσταση τους από το άγνωστο σημείο. Ειδικότερα, αν ο χρήστης επιλέξει να δώσει έμφαση στα πιο κοντινά σημεία, τότε τα σημεία αυτά έχουν μεγαλύτερη επιρροή και η επιφάνεια έχει περισσότερες λεπτομέρειες δηλαδή παρουσιάζεται μικρότερη ομαλότητα. Αντίθετα όταν η απόσταση αυξηθεί, εξασφαλίζεται μεγαλύτερη επίδραση των πιο μακρινών σημείων του δείγματος για την εύρεση της άγνωστης τιμής.

## Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάζονται σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, παρατίθενται αναλυτικά στην παράγραφο αυτή. Συγκεκριμένα, το μοντέλο ανέλυσε τις πλήρεις χρονοσειρές που ήταν διαθέσιμες σε πανευρωπαϊκή κλίμακα, από το συνολικό αριθμό των 2601 σταθμών.

Στη διάρκεια καθεμιάς από τις χρονοσειρές, υπολογίζονται τα τμήματα της ύφεσης, με κριτήριο έναν ελάχιστο αριθμό απαιτούμενων ημερών ώστε να ληφθεί υπόψη ένα τμήμα ύφεσης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των απαιτούμενων ημερών τόσο μικραίνει ο κίνδυνος η ύφεση να έχει επηρεαστεί από παράγοντες όπως η βροχόπτωση, η επιφανειακή απορροή κ.λ.π. Επίσης όσο μεγαλώνει ο απαιτούμενος αριθμός ημερών, τόσο μειώνεται το πλήθος των σταθμών στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία, διότι πολλοί σταθμοί παρουσιάζουν τμήματα ύφεσης για περιορισμένο αριθμό ημερών. Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη για το πώς επηρεάζει ο αριθμός των απαιτούμενων ημερών τη θεώρηση ενός τμήματος ύφεσης, με εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης των δεδομένων από τους διαθέσιμους σταθμούς. Εξετάστηκαν διαφορετικές τιμές του απαιτούμενου αριθμού ημερών (από τέσσερις έως τριάντα) και για κάθε αριθμό ημερών υπολογίστηκαν πληροφορίες για την ταυτότητα και των αριθμό των σταθμών (Station ID, Station Number), τη σταθερά του συντελεστή μεταβιβασιμότητας προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας (TowerS), τη σταθερά του συντελεστή μεταβιβασιμότητας προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας για τη μεγαλύτερη τμηματική ύφεση (TloverS), την επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη της διατομής (Area) και το μήκος του ποταμού (Aval).

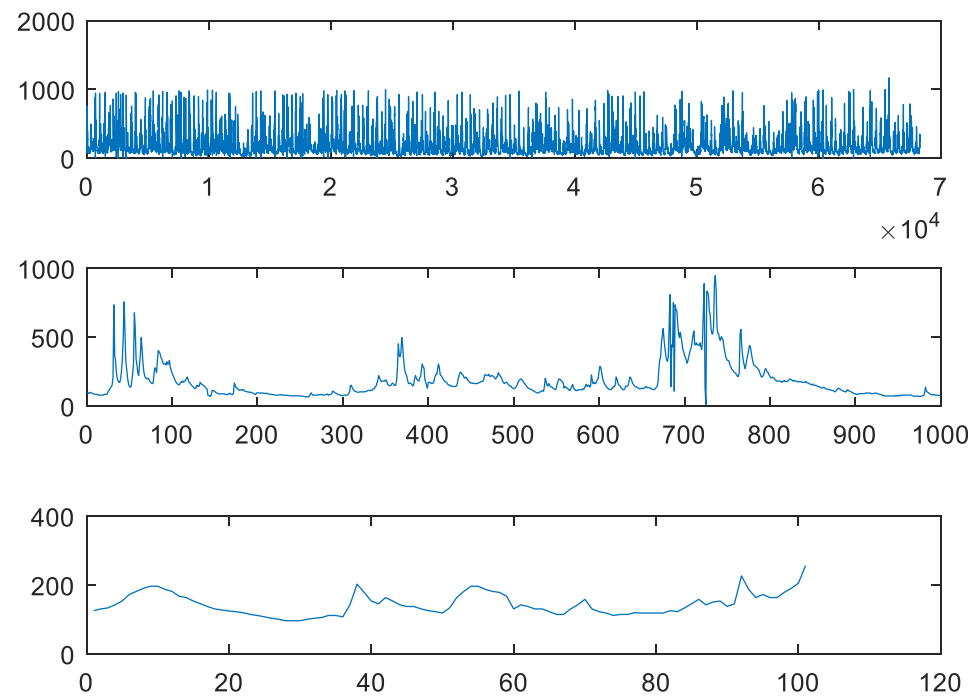
Από το σύνολο των σταθμών (2601), χρησιμοποιήθηκαν δύο εξ αυτών από κάθε χώρα με σκοπό την απεικόνιση των πηγαιδιών. Οι σταθμοί αυτοί επιλέχθηκαν με κριτήριο την πλήρη λειτουργικότητα τους και την δυνατότητα διεξαγωγής αποτελεσμάτων.

Ωστόσο για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την ολοκληρωμένη παρουσίαση αυτών, επιλέχθηκαν τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις απαιτούμενων ημερών για την θεώρηση ενός τμήματος ύφεσης. Οι τρεις αυτές περιπτώσεις αφορούν το σύνολο των συνεχόμενων ημερών που εξετάζονται κάθε φορά για να οριστεί το τμήμα ύφεσης. Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται για το μεγαλύτερο αριθμό σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε καμιά από τις περιπτώσεις. Έτσι λοιπόν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν με το μικρότερο αριθμό απαιτούμενων ημερών που μελετήθηκαν, δηλαδή το διάστημα των τεσσάρων ημερών. Ενώ παράλληλα, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα για απαιτούμενο αριθμό ημερών δεκαπέντε (μέση κατάσταση) και τέλος για απαιτούμενο αριθμό ημερών τις τριάντα συνεχόμενες ημέρες, που είναι και η ανάλυση που ενδέχεται να επηρεάζεται λιγότερο από εξωτερικούς παράγοντες.

### 1.1 Υδρογραφήματα

Για την ανάλυση και τον υπολογισμό της καλύτερης γραμμικής προσαρμογής μεταξύ του χρόνου με την λογαριθμική παροχή κατασκευάστηκαν τα υδρογραφήματα. Κάθε υδρογράφημα εμφανίζεται πλήρες στο επάνω τμήμα του

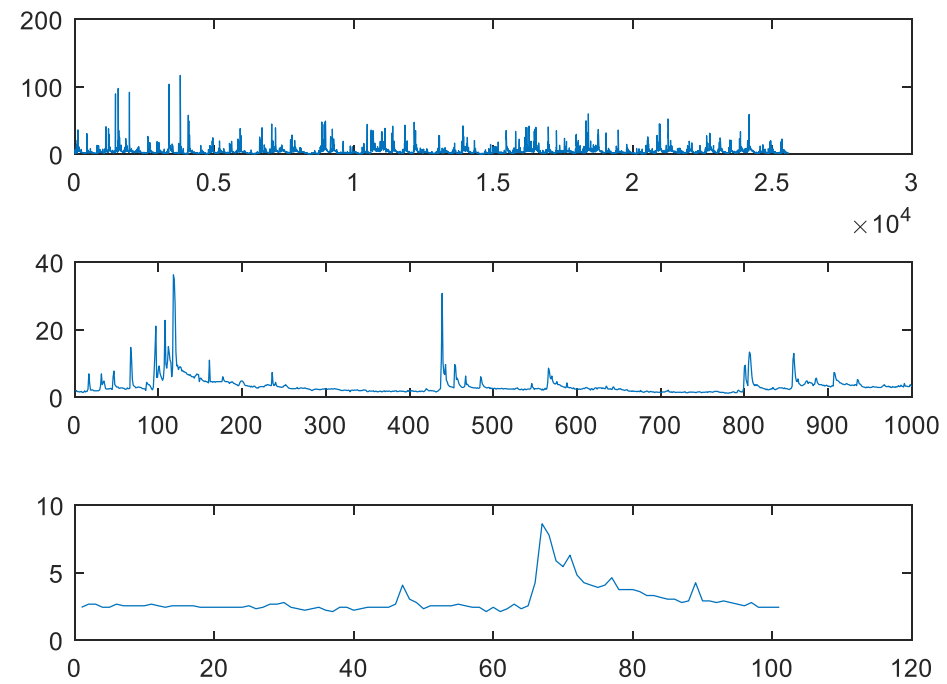
παραθύρου, ενώ στο ενδιάμεσο τμήμα του γραφήματος μεγεθύνεται. Ειδικότερα, στη μεγέθυνση απεικονίζεται ένα τμήμα του υδρογραφήματος που αντιστοιχεί σε 1000 ημέρες για την καλύτερη απεικόνιση των διακυμάνσεων μέσα σε περίπου 3 χρόνια. Τέλος, στο τελευταίο κομμάτι του γραφήματος παρουσιάζεται ένα τμήμα από το υδρογράφημα που αντιστοιχεί σε 100 ημέρες για να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του σταθμού εντός λίγων μηνών.



Εικόνα 4: 1° Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2° Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

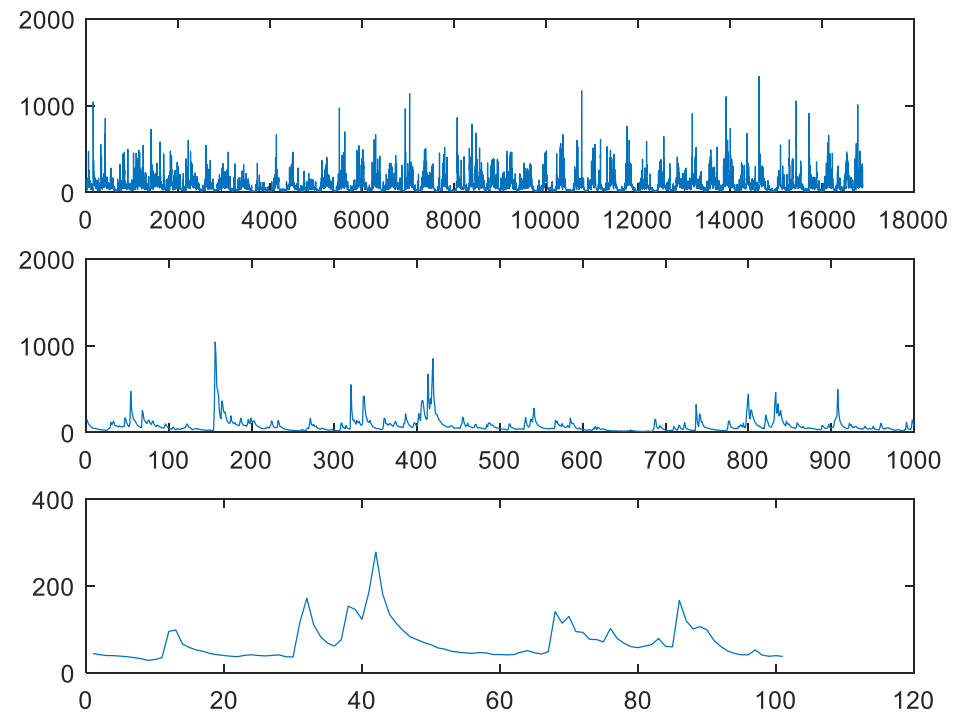
3° Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 5: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

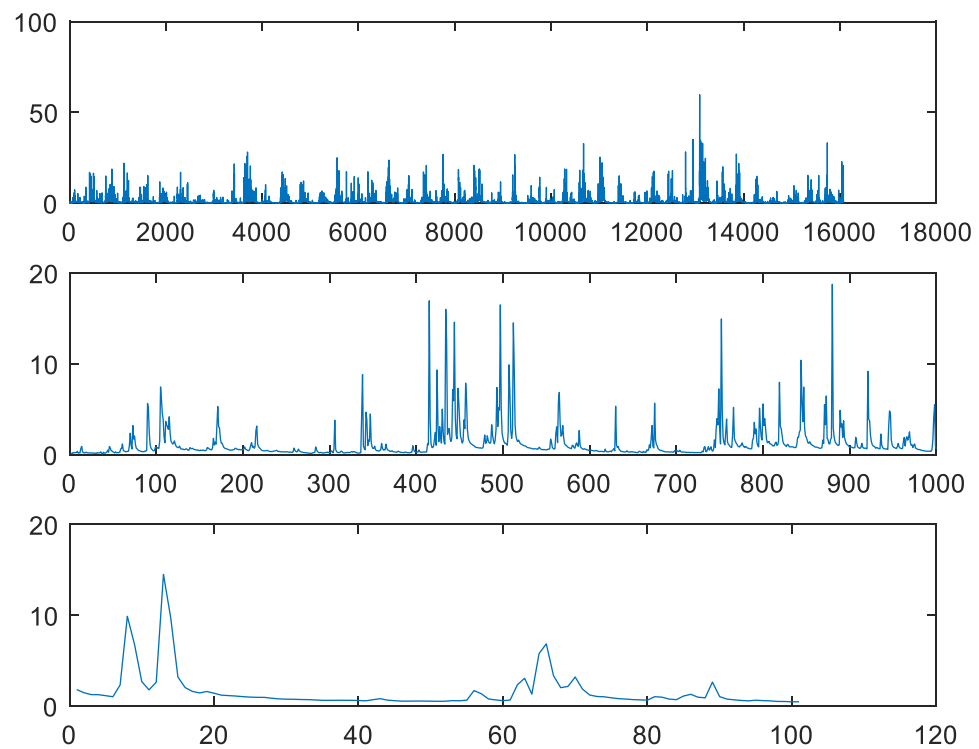
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 6: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών

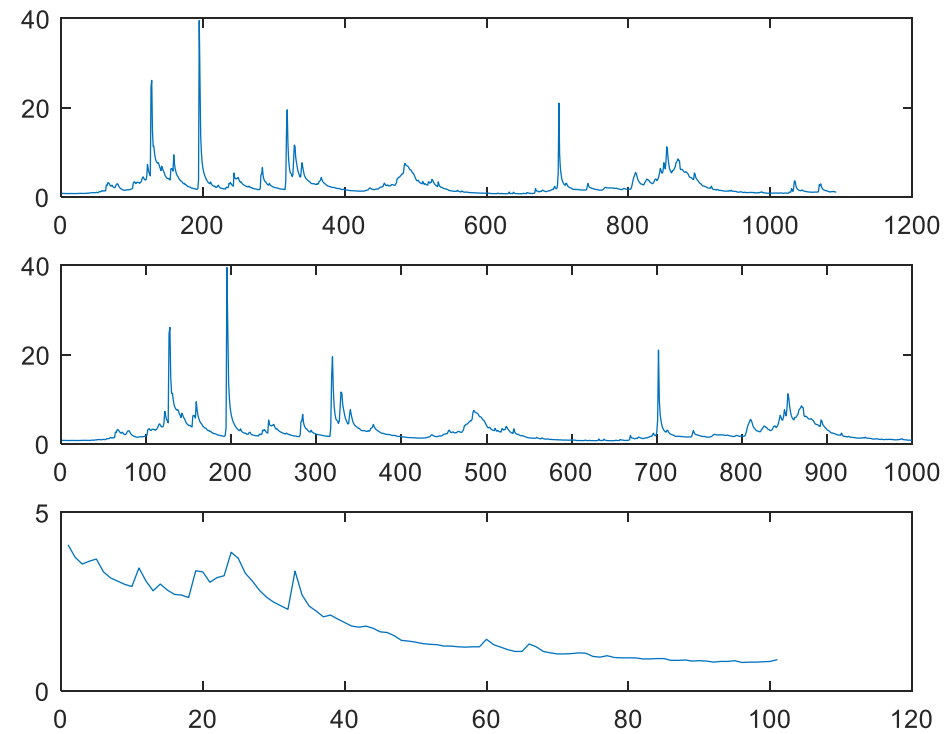


Εικόνα 7: 1° Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2° Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

3° Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών

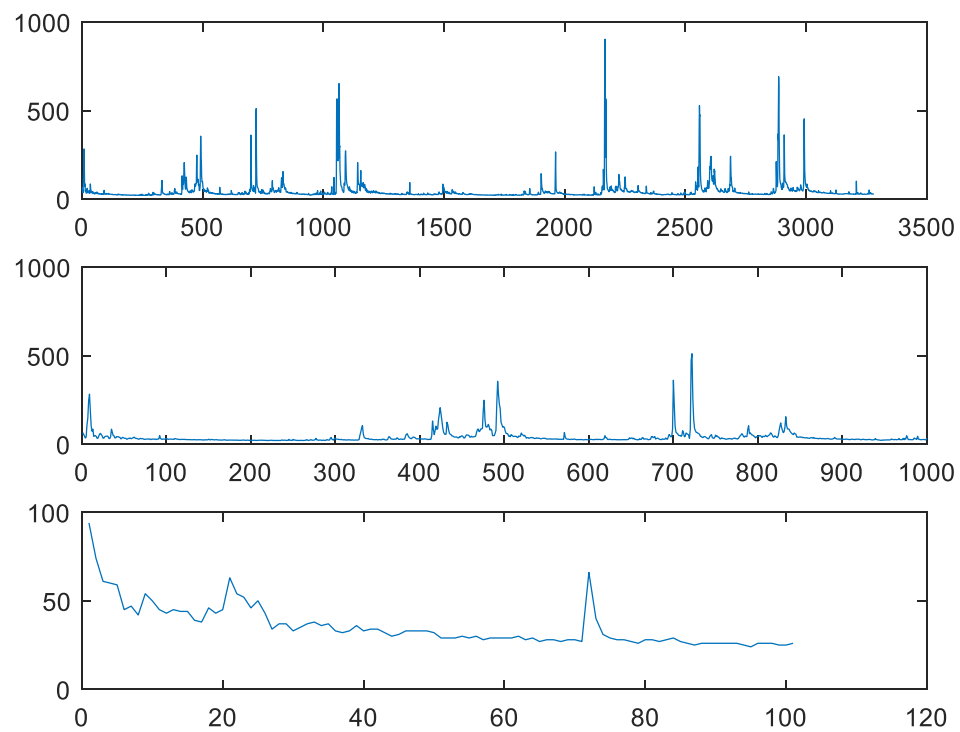




Εικόνα 8: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

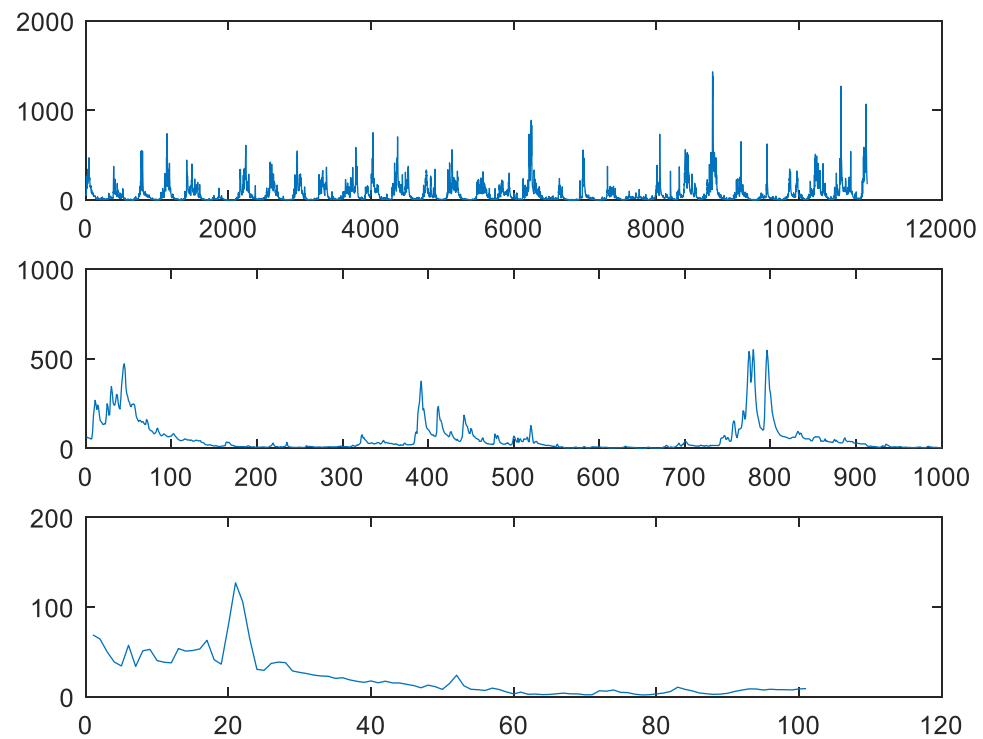
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 9: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

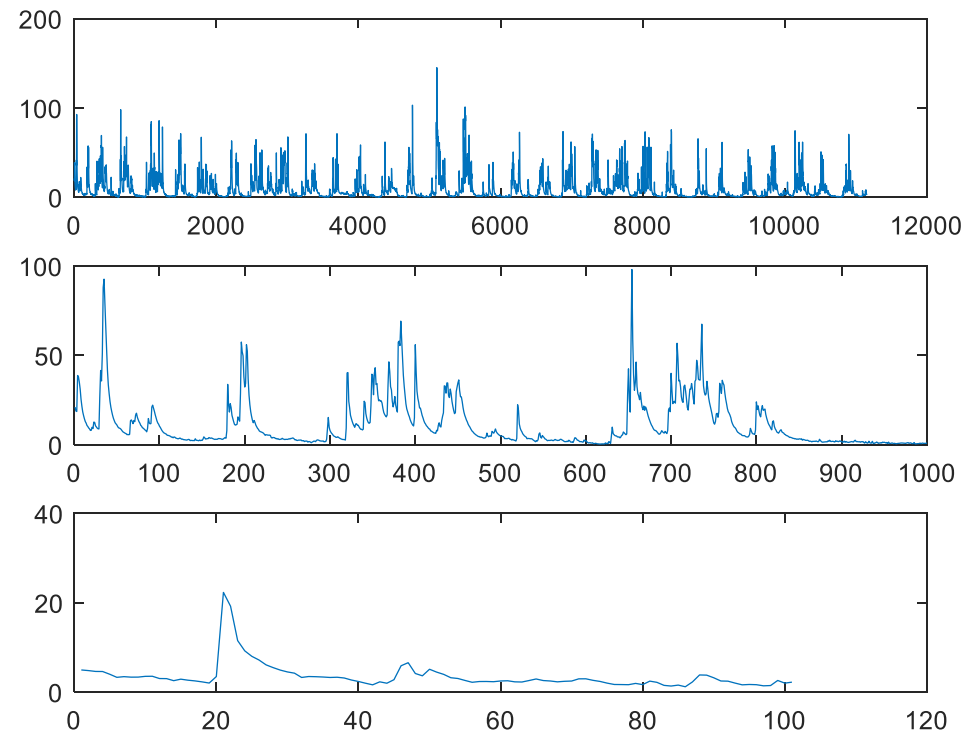
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 10: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

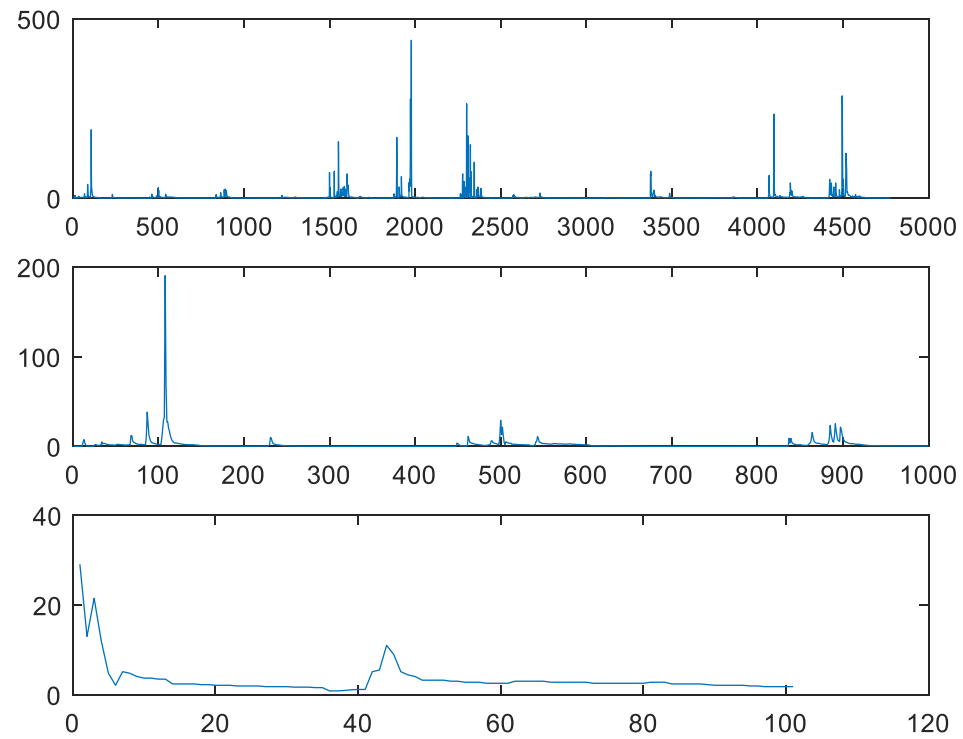
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 11: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

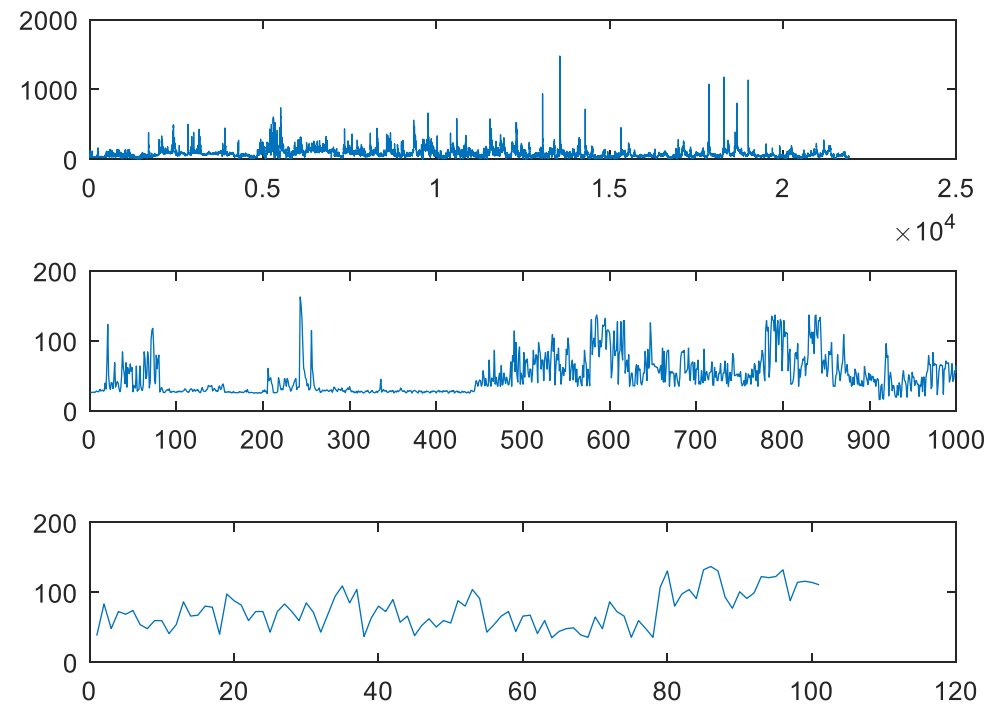
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 12: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

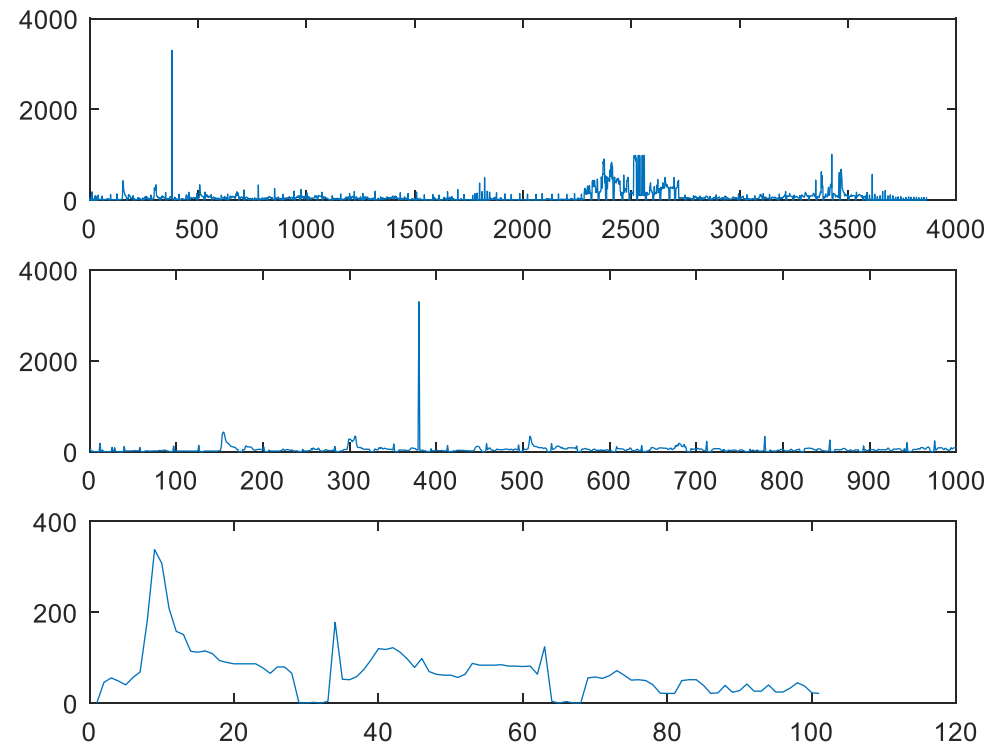
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 13: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

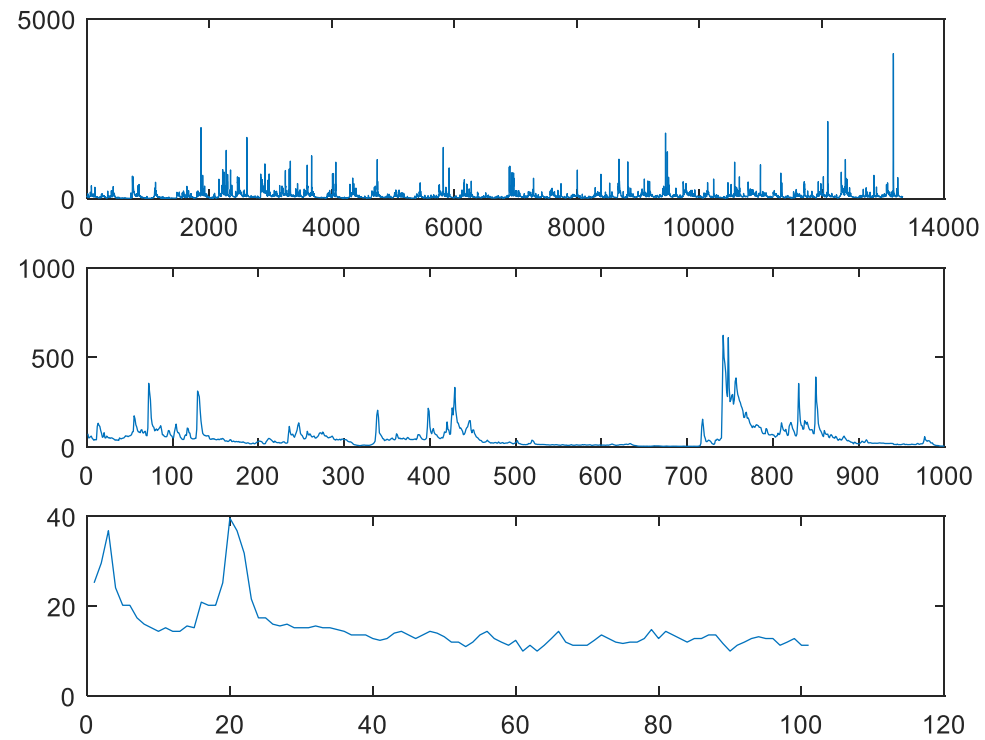
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 14: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών

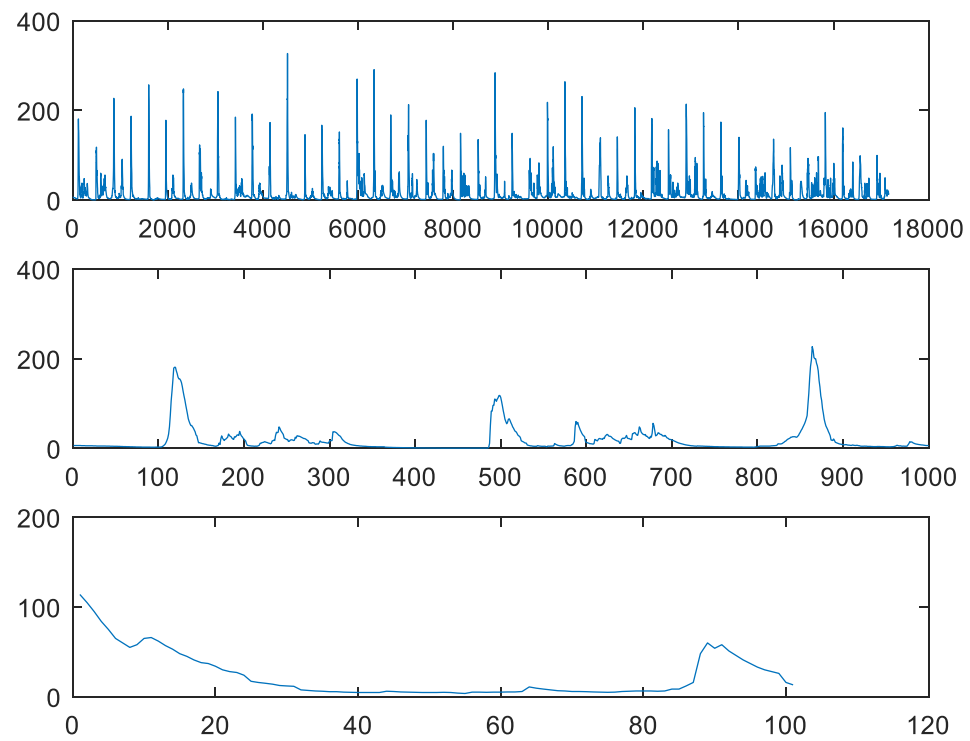


Εικόνα 15: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών

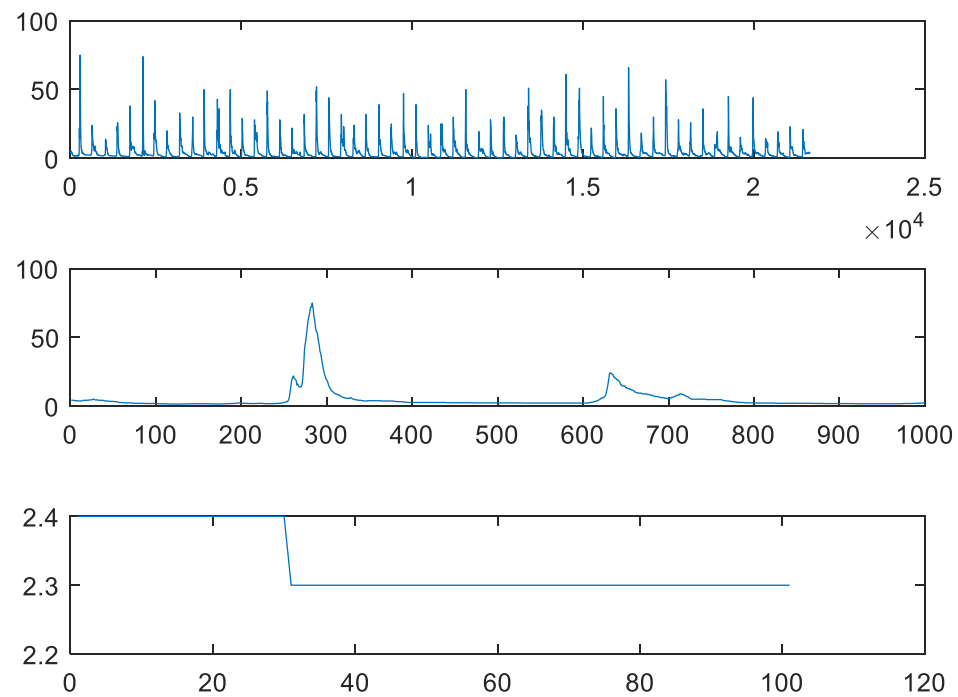




Εικόνα 16: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

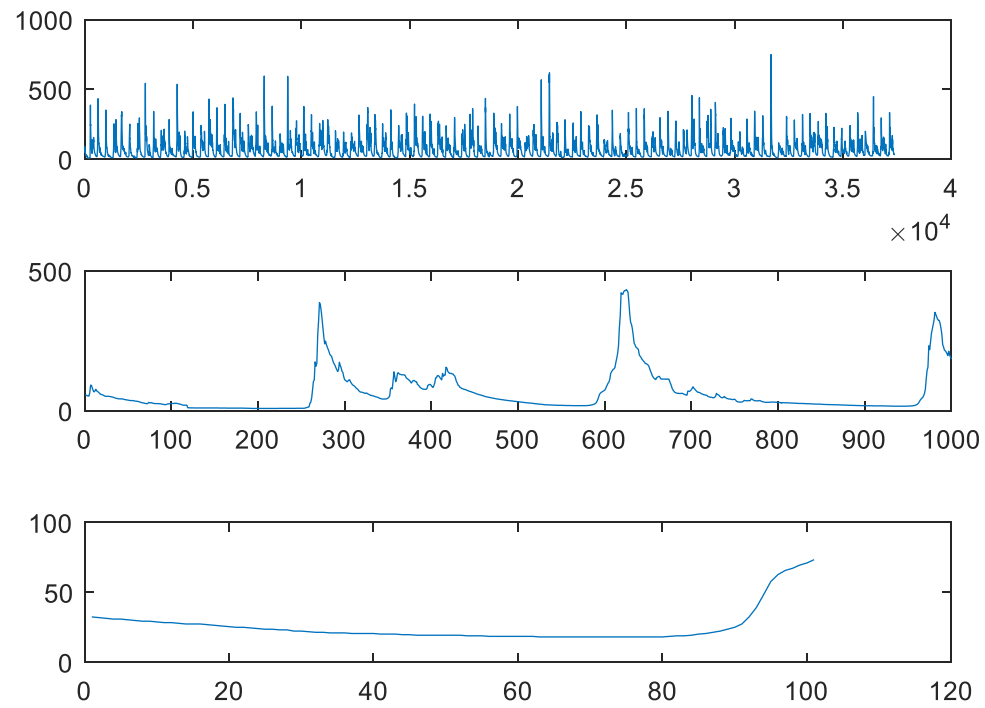
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 17: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

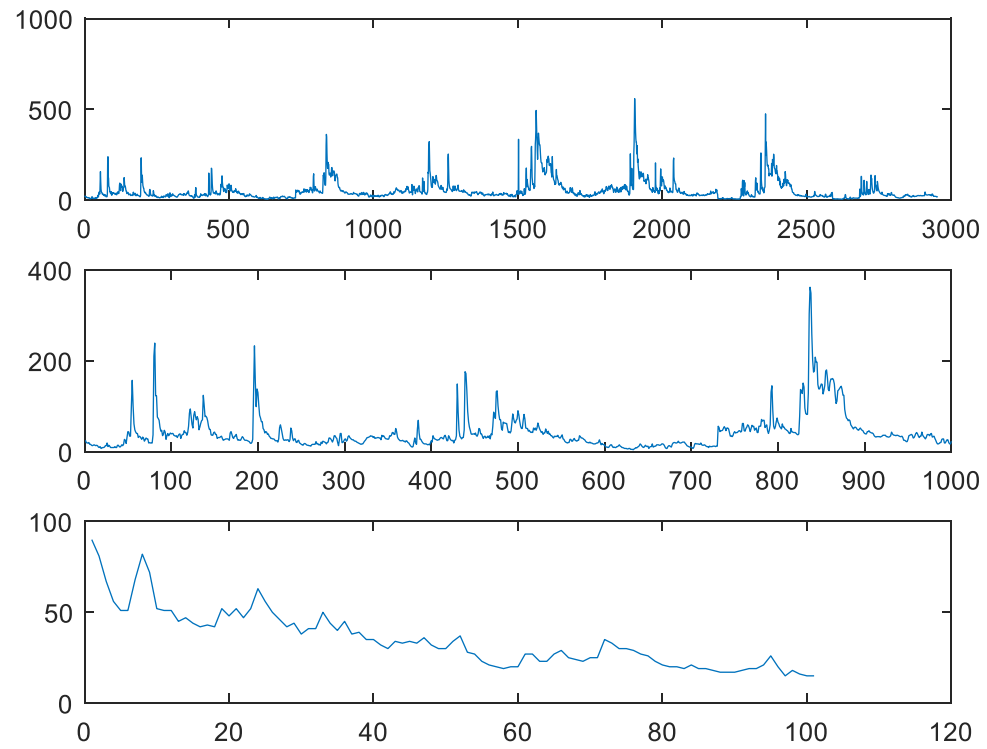
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 18: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

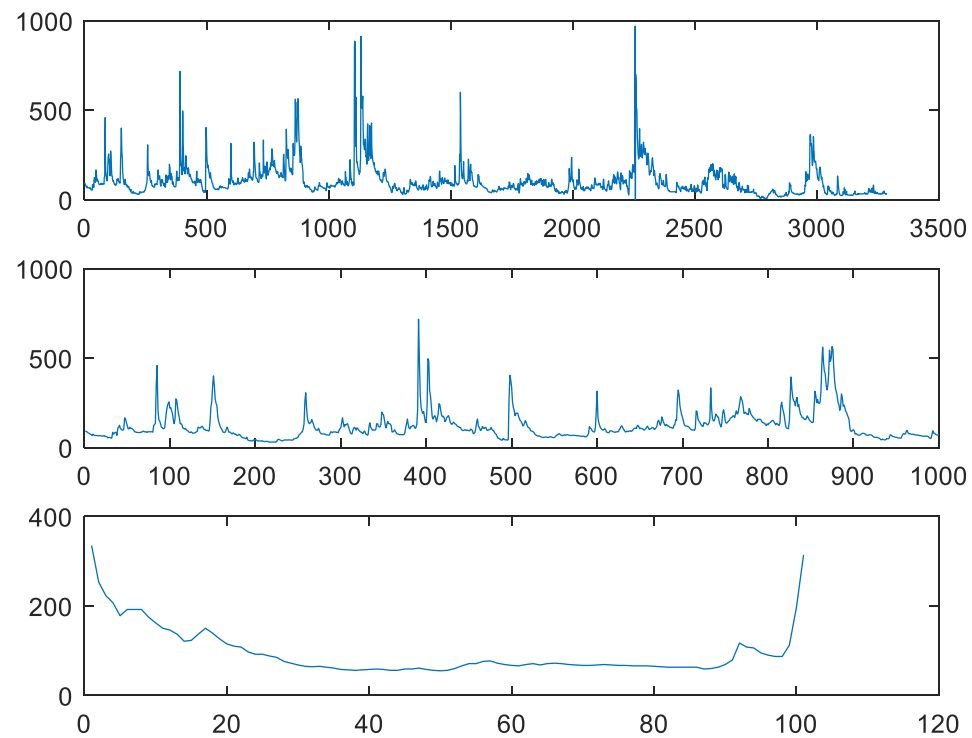
3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 19: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών



Εικόνα 20: 1<sup>ο</sup> Πλήρης χρονοσειρά ροής με την πάροδο του χρόνου

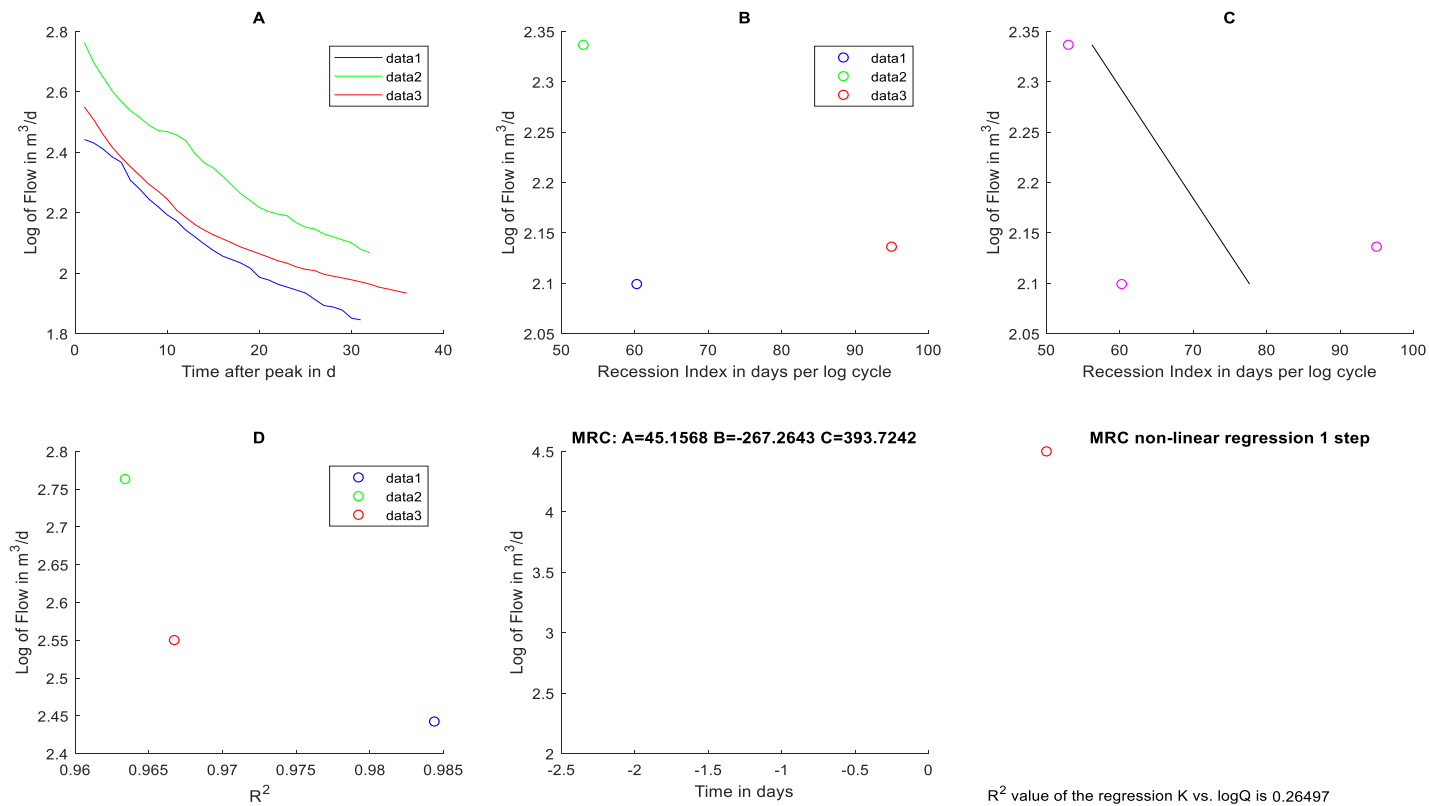
2<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 1000 ημερών

3<sup>ο</sup> Μεγέθυνση χρονοσειράς σε διάστημα 100 ημερών

Οι χρονοσειρές απεικονίζουν την μεταβολή της παροχής με το χρόνο σε διατομή του ποταμού. Αφορά στο τμήμα της λεκάνης ανάντη της διατομής.

## 1.2 Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης

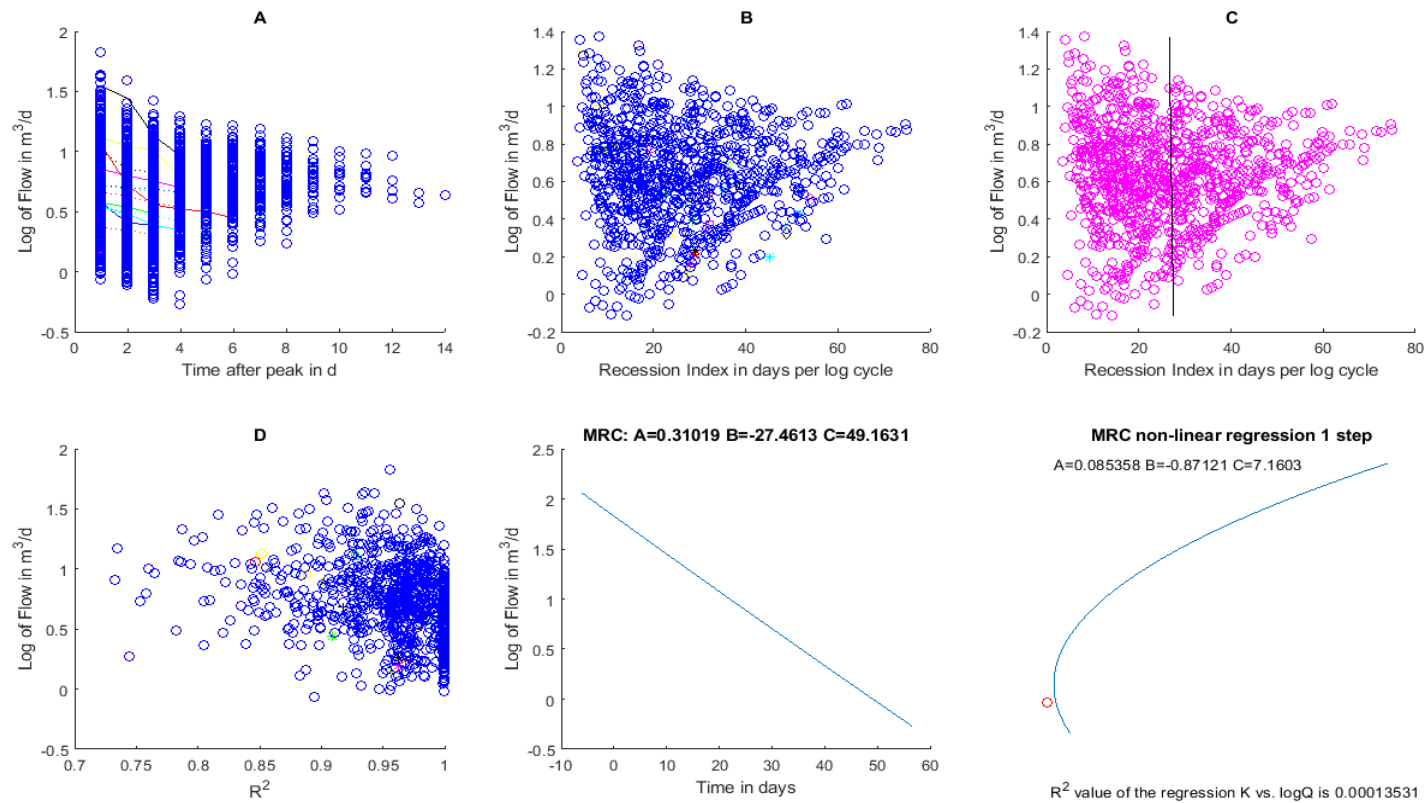
Η παράθεση των παρακάτω διαγραμμάτων δεν πραγματοποιείται με τυχαία σειρά. Έχοντας ως γνώμονα ότι όσο αυξάνεται ο προαπαιτούμενος αριθμός των ημερών που χρειάζεται για την θεώρηση των τμημάτων ύφεσης, τόσο τα τμήματα αυτά λιγοστεύουν. Καθώς παράλληλα χρησιμοποιώντας και την αφαιρετική μέθοδο, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ύφεσης με την σειρά διεξαγωγής τους, ελέγχοντας πρώτα την περίπτωση των προαπαιτούμενων τριάντα ημερών. Στην συνέχεια όσα τμήματα δεν αποτυπώθηκαν, επιλέχθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα από την δεύτερη περίπτωση των δεκαπέντε ημερών. Τέλος όσα τμήματα δεν βρίσκονταν στις δυο προηγούμενες περιπτώσεις επιλέχθηκαν μέσω των διαγραμμάτων απεικόνισης τους από την περίπτωση των απαιτούμενων τεσσάρων ημερών.



Εικόνα 21: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (30 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης

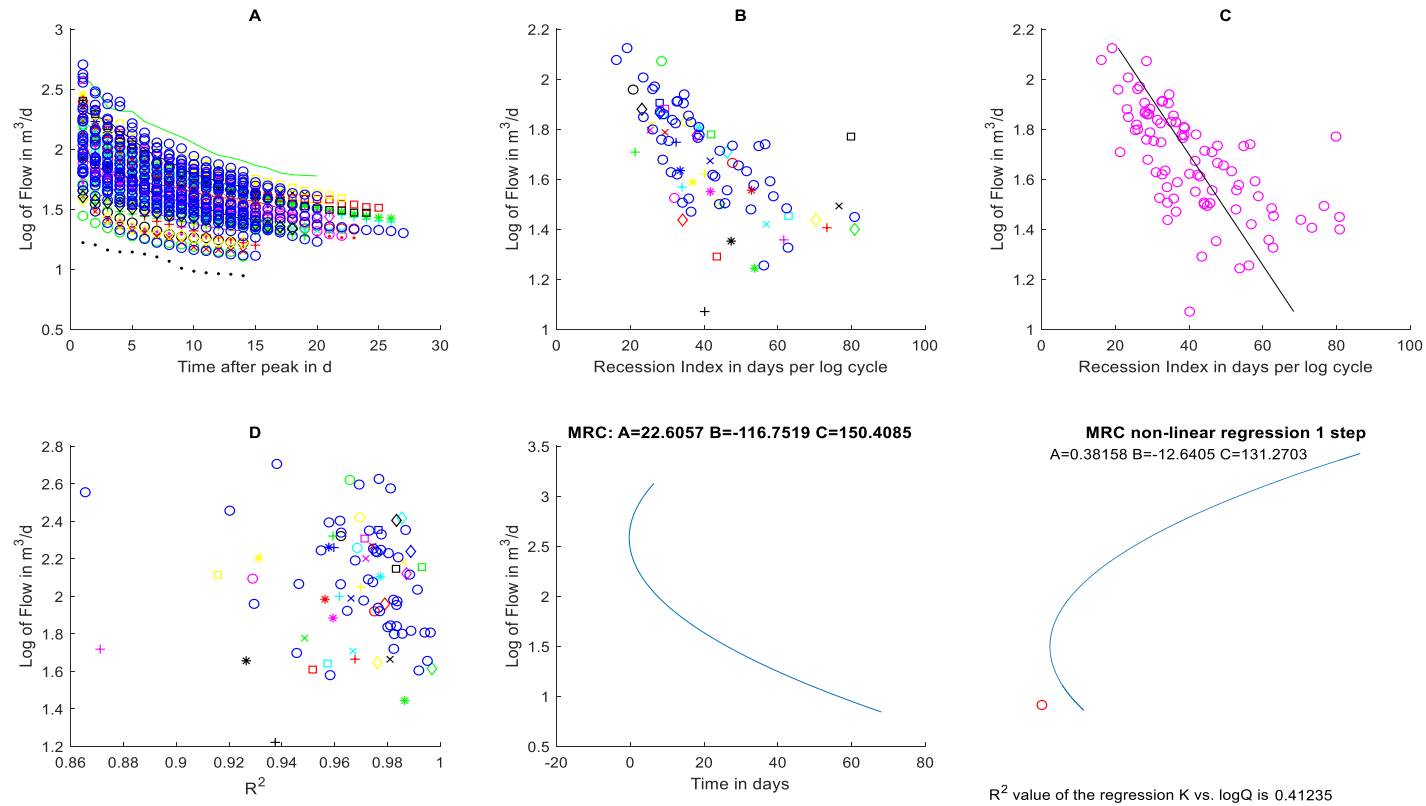


Εικόνα 22: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (4 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης

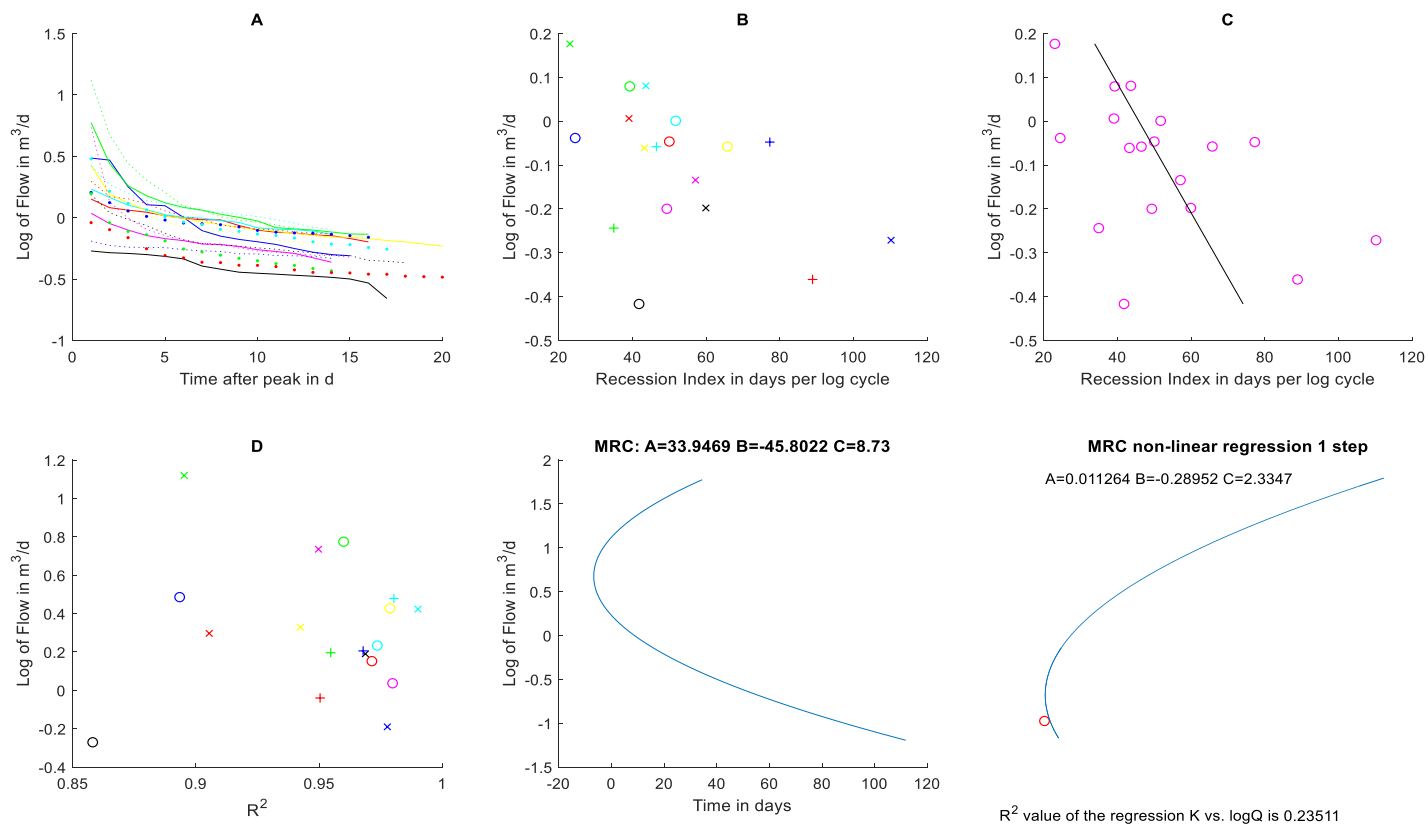




Εικόνα 23: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (15 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

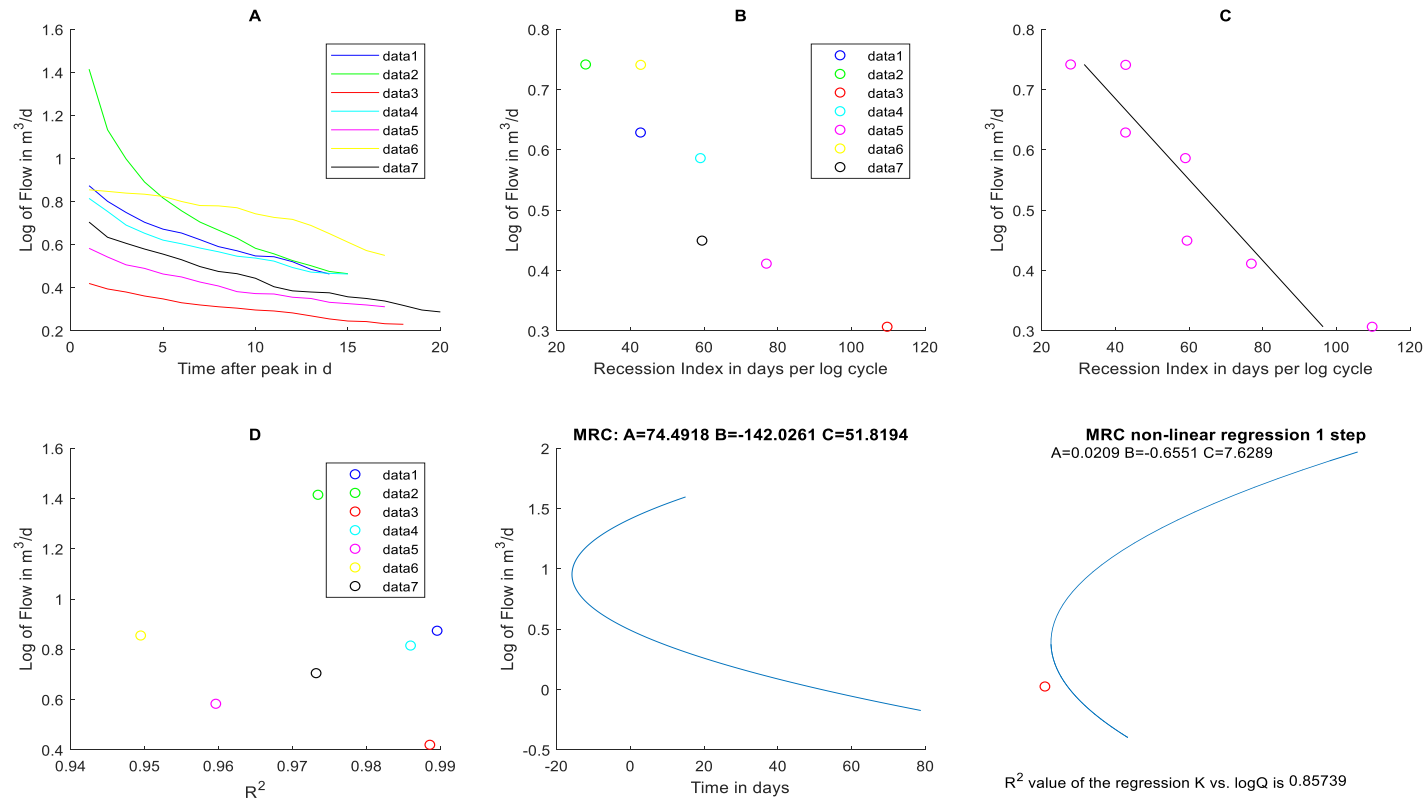
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 24: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (15 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

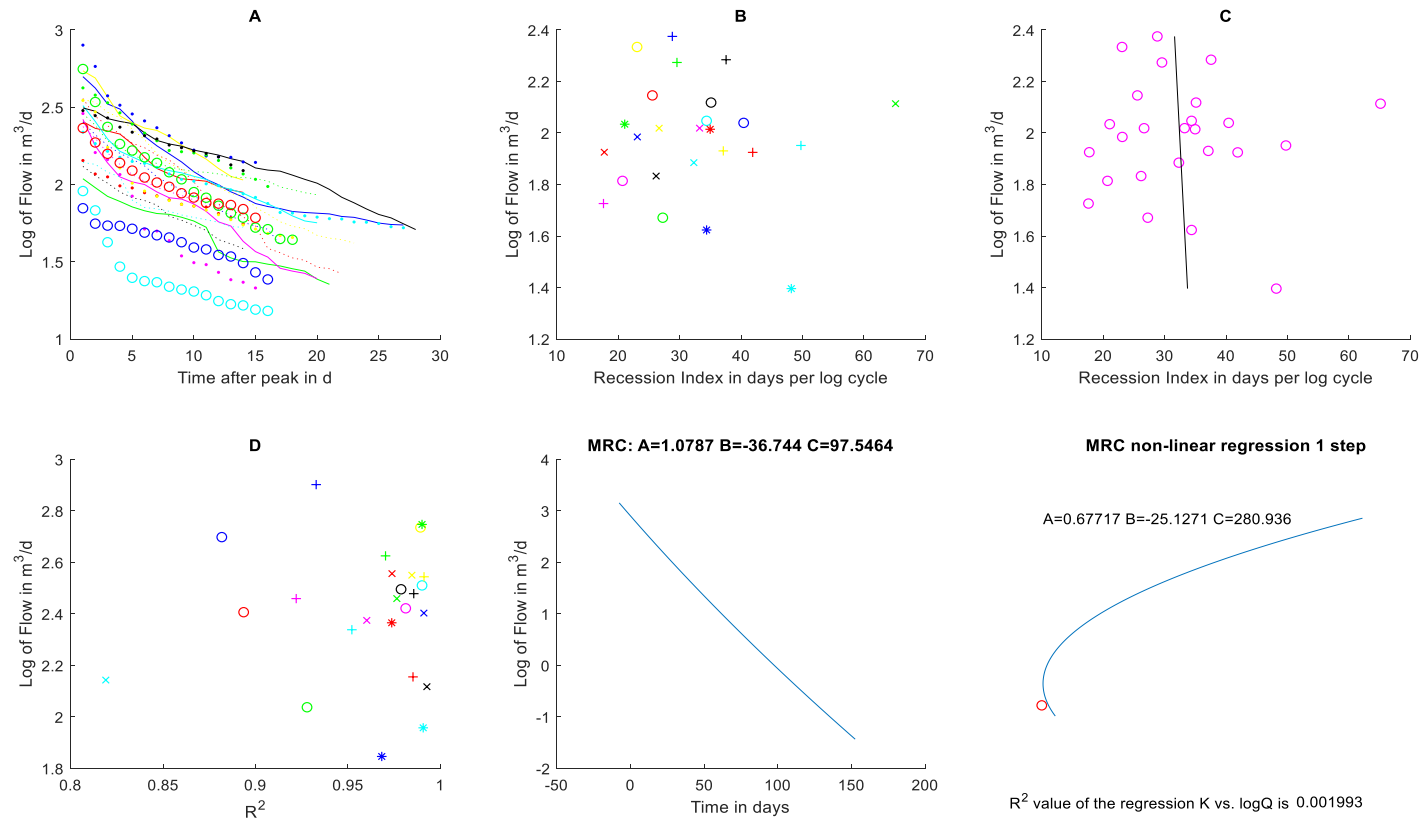
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 25: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (15 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

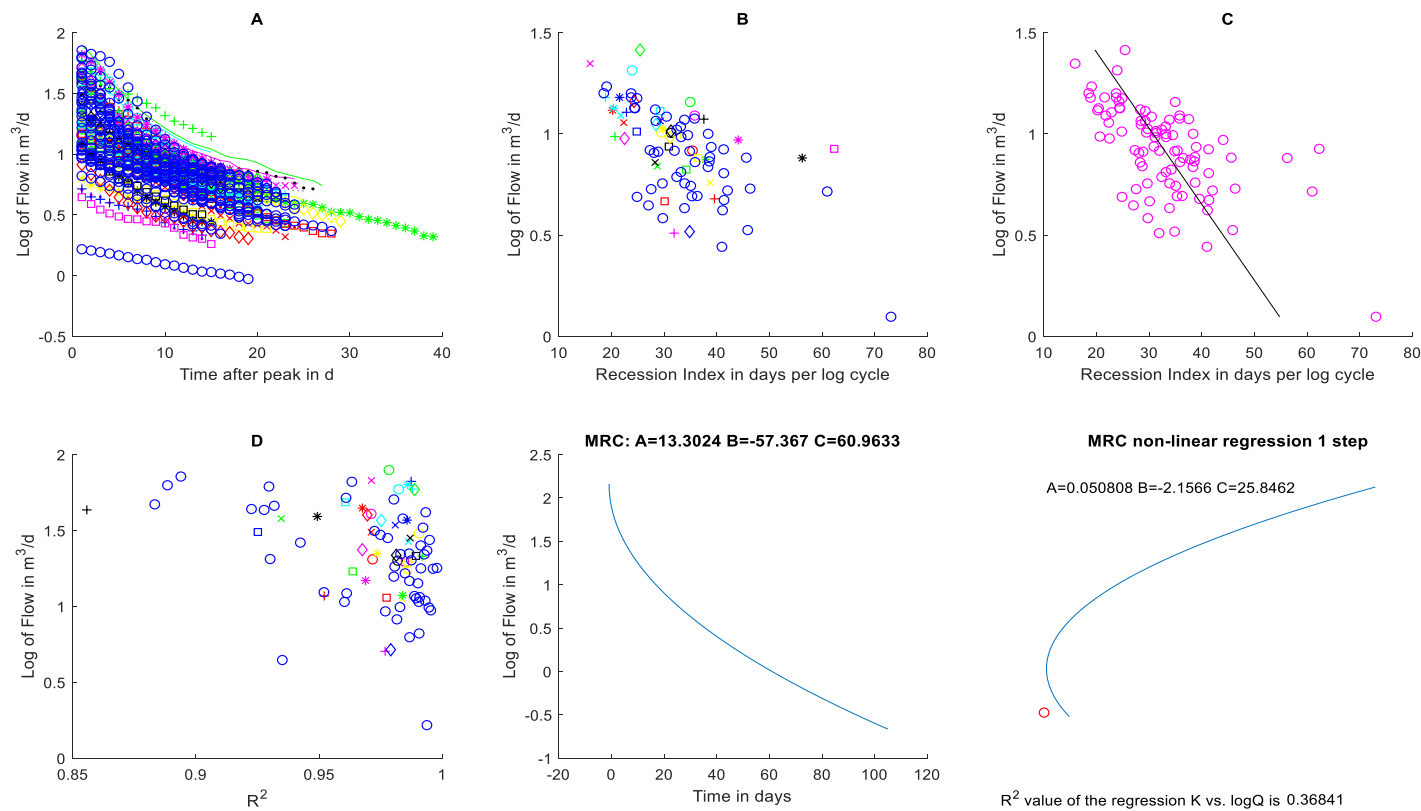
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 26: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (15 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

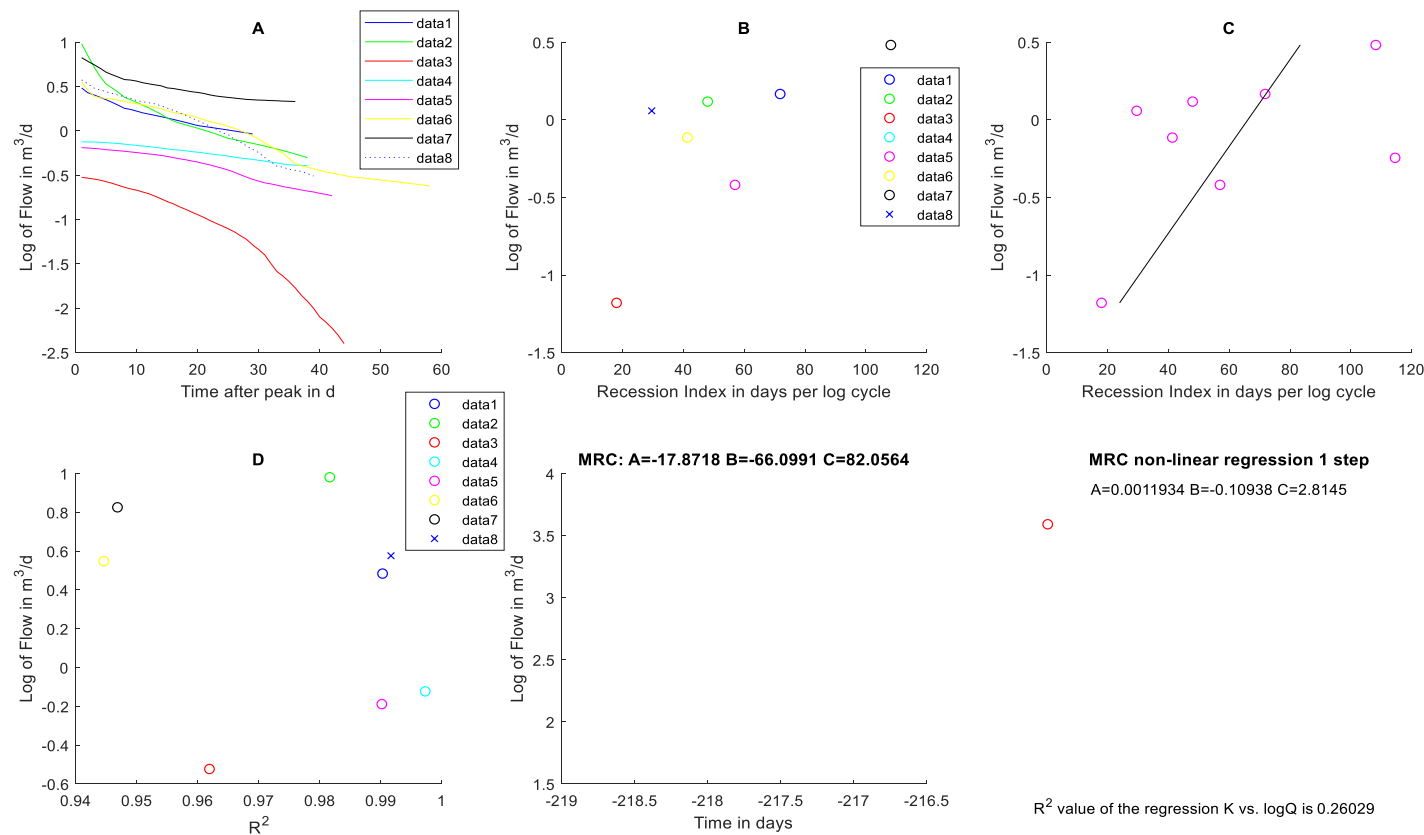
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 27: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (15 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

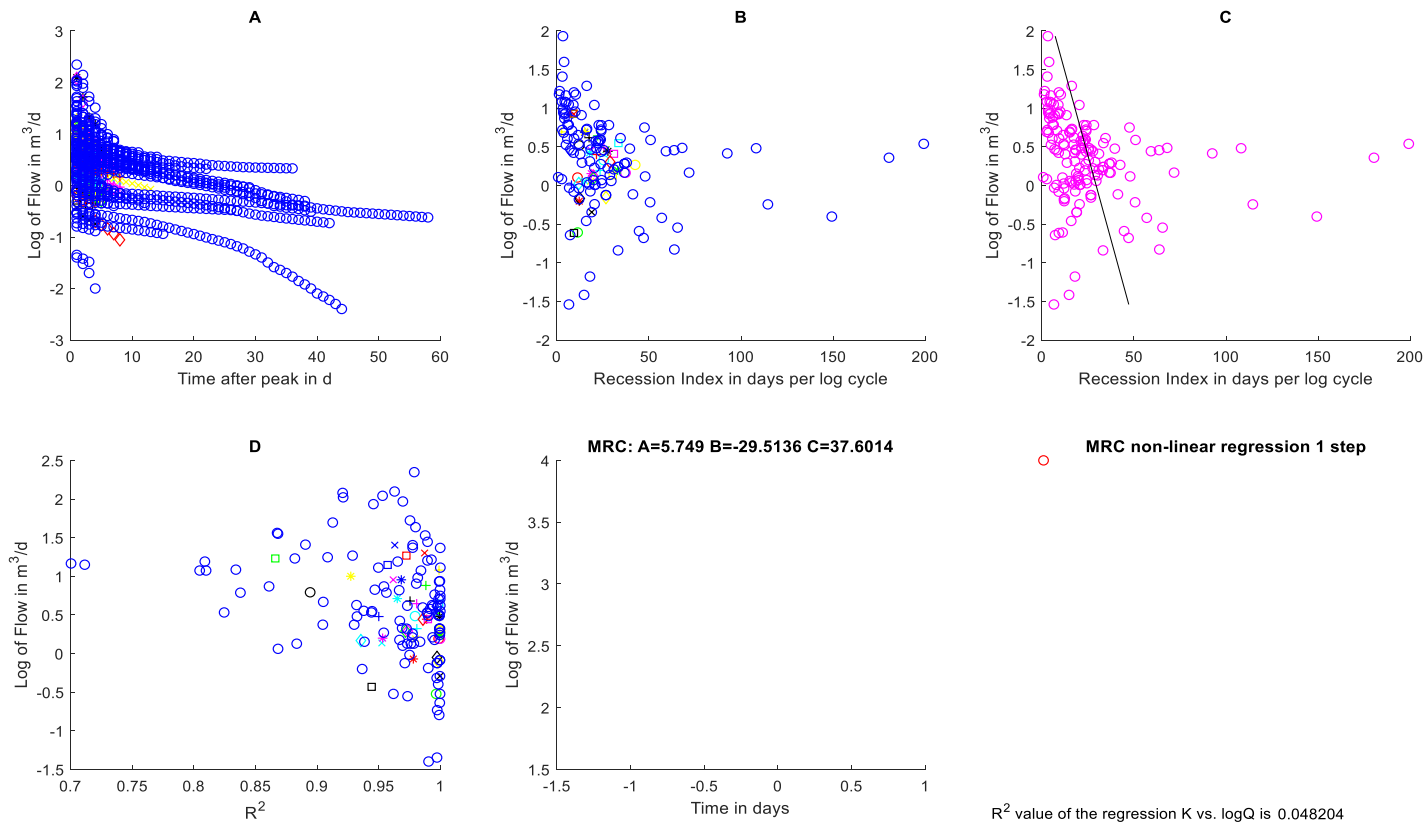
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 28: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (30 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

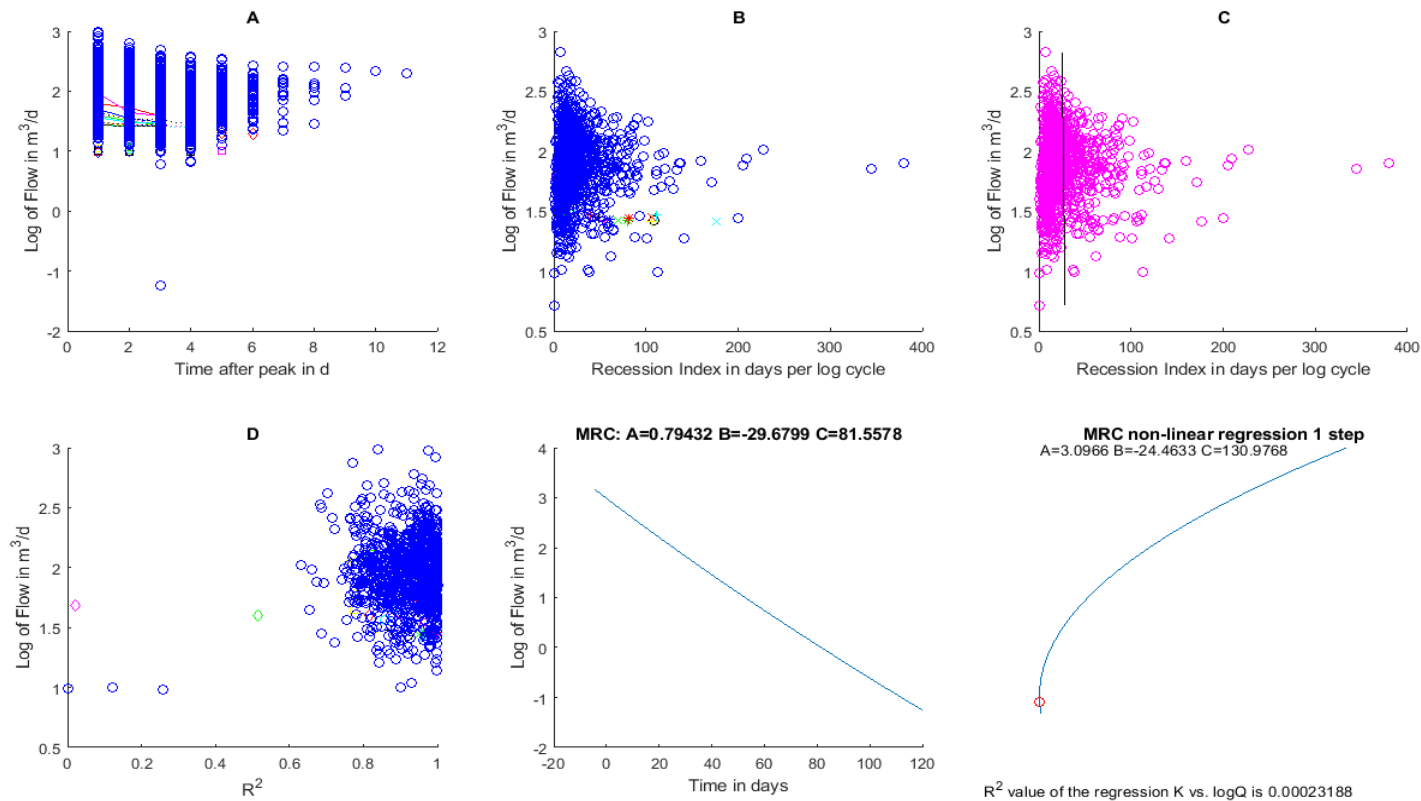
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 29: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (4 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης

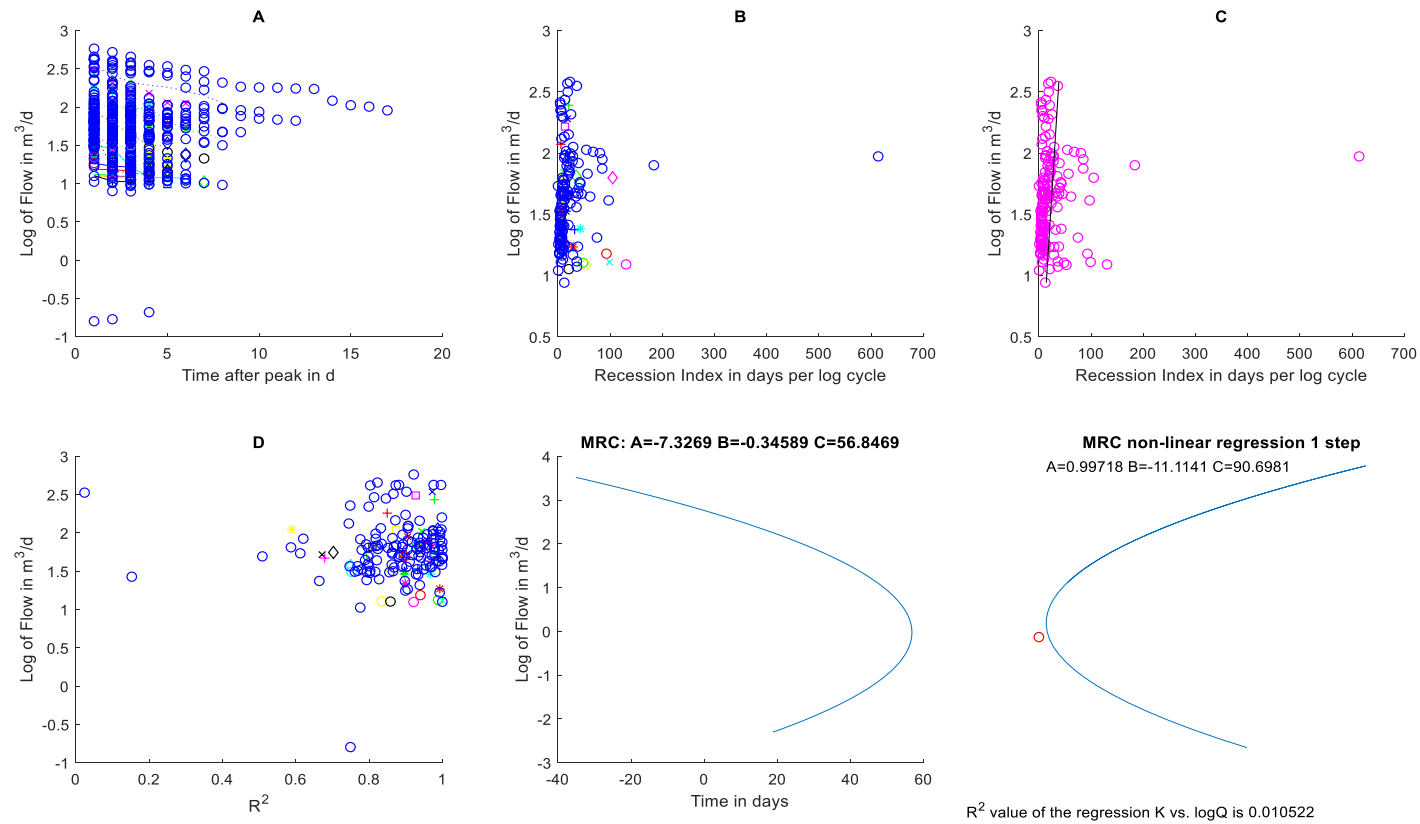


Εικόνα 30: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (4 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης

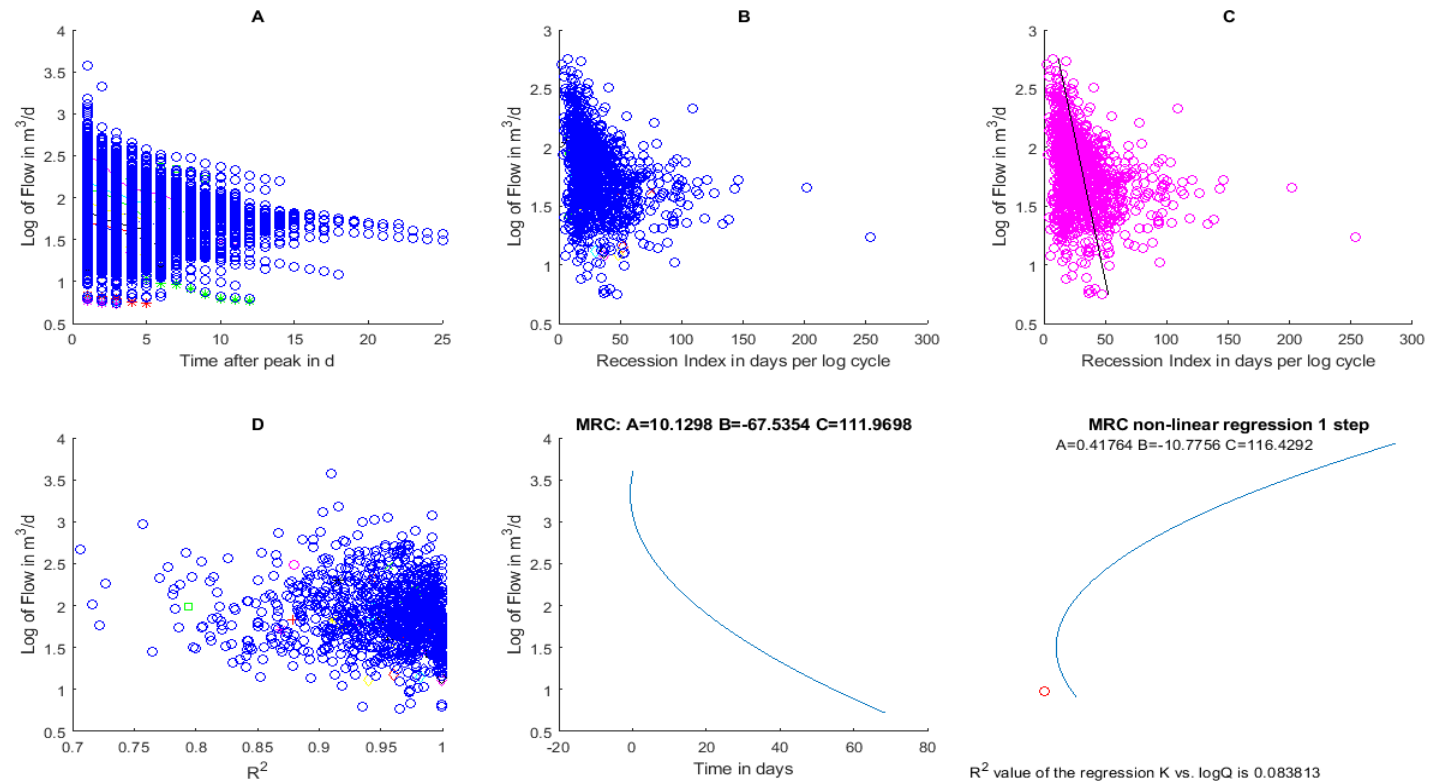




Εικόνα 31: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (4 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

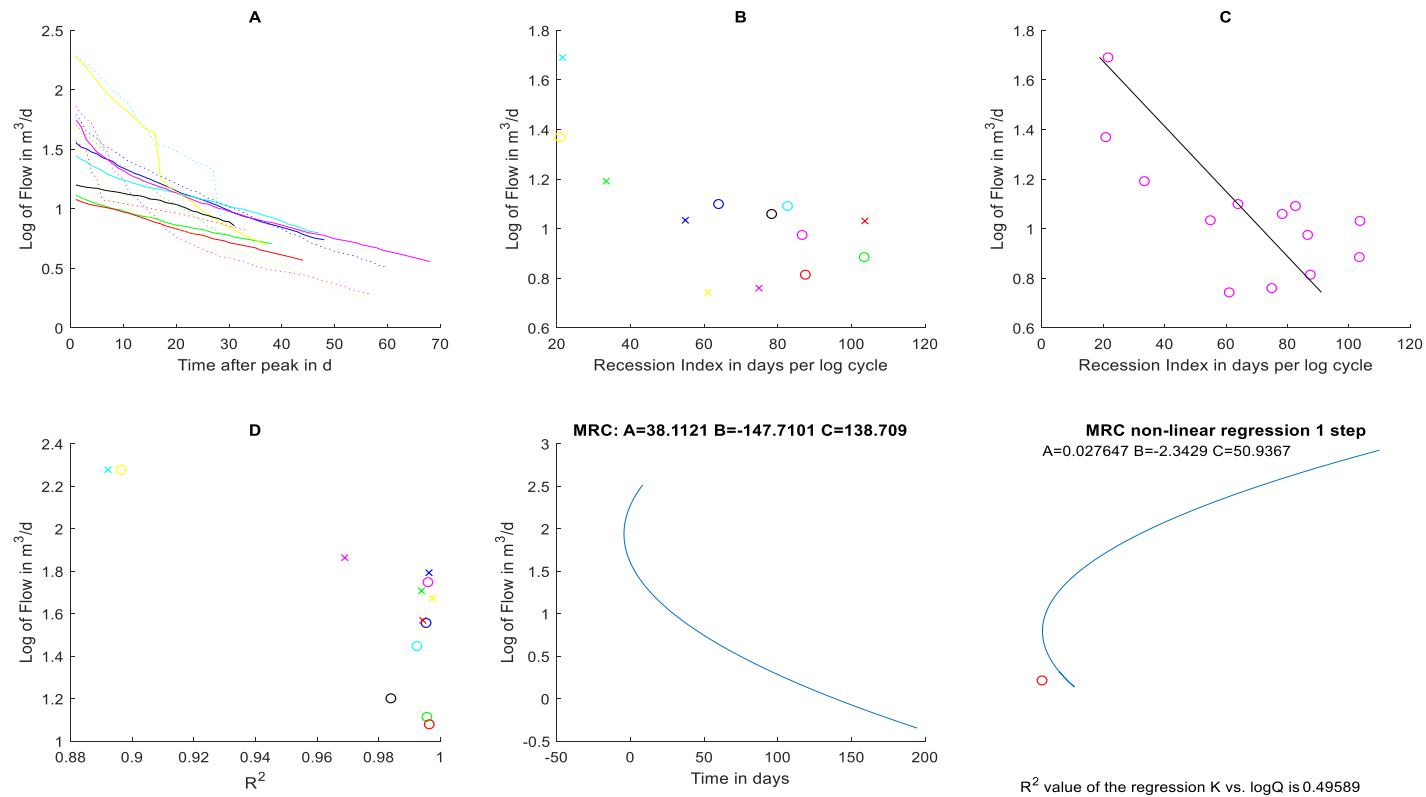
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 32: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (4 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

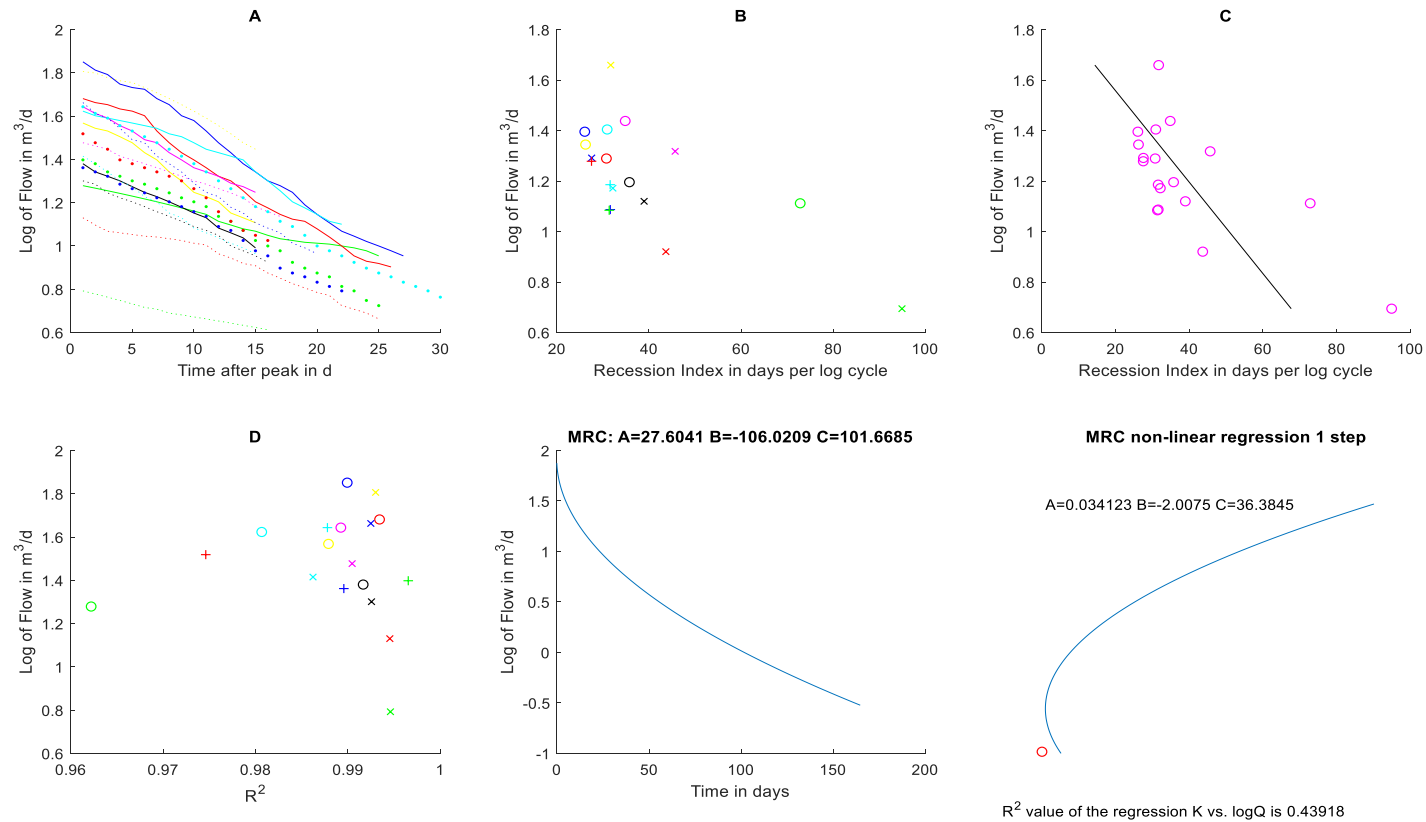
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 33: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (30 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

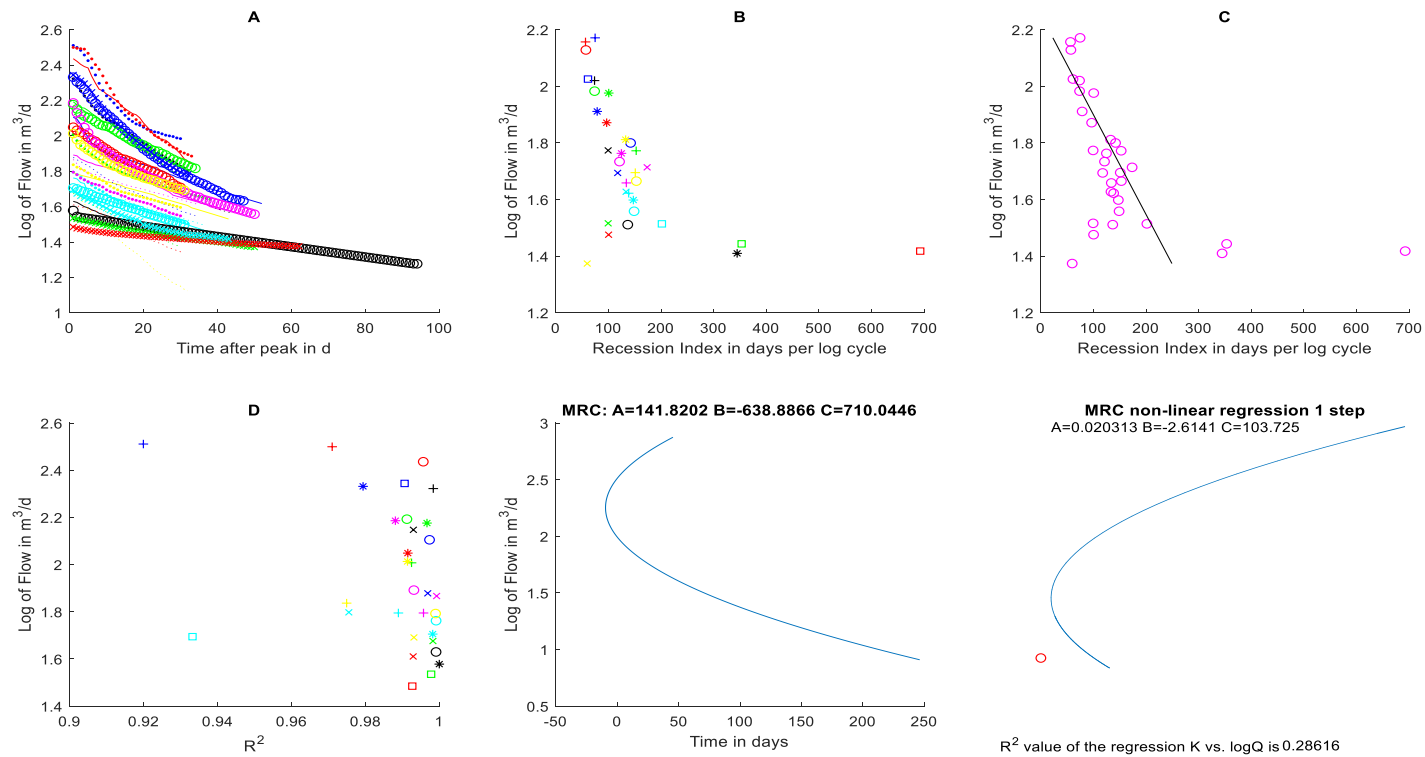
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 34: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (15 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

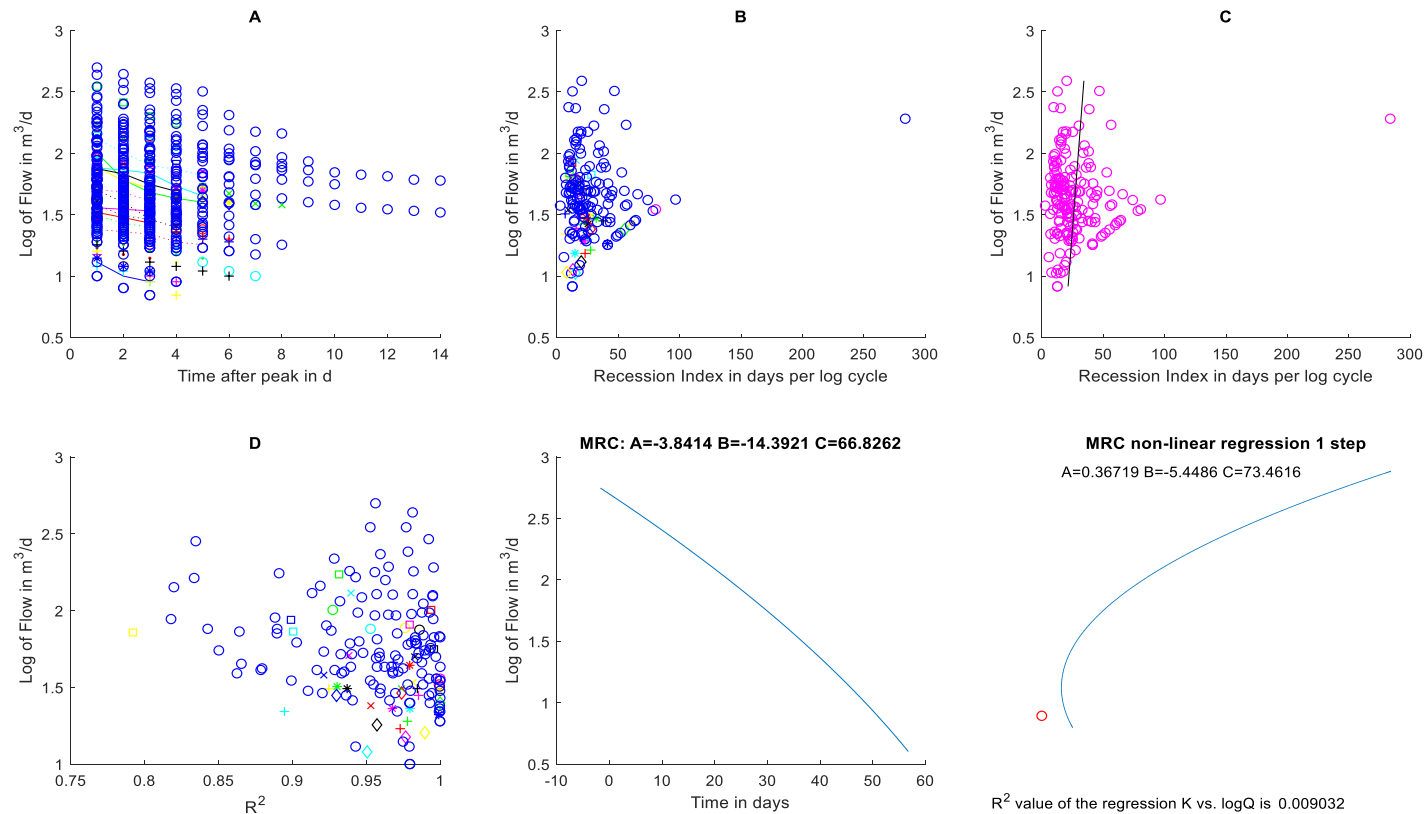
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 35: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (30 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

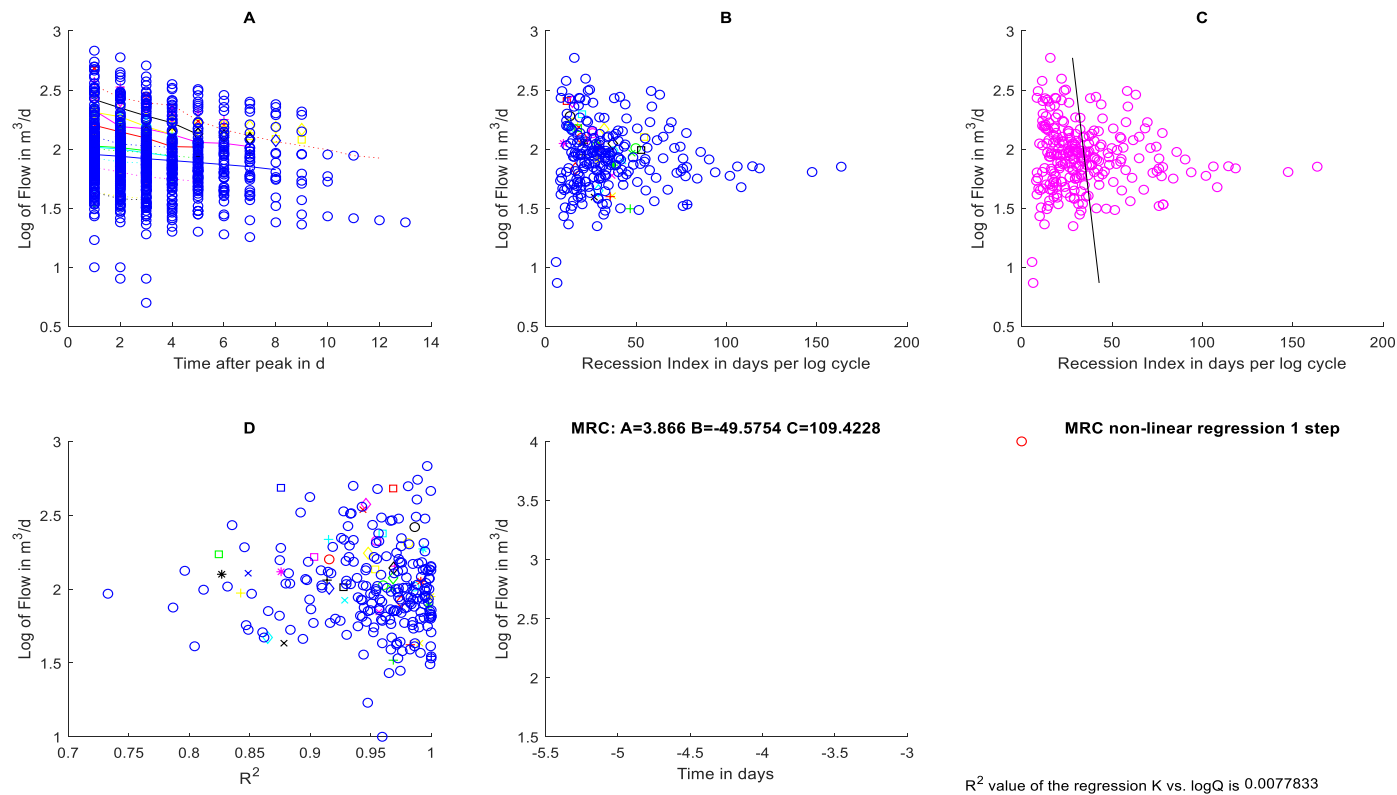
[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 36: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (4 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης



Εικόνα 37: Διαγράμματα τμηματικής ύφεσης σε προαπαιτούμενο χρόνο (4 days)

[A] Τμήματα συνεχούς ύφεσης με τη πάροδο του χρόνου, [B] Τιμές του δείκτη ύφεσης

[C] Γραμμική παλινδρόμηση λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης, [D] Τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης, [MRS] Καμπύλη κύριας ύφεσης

Τα διαγράμματα του κάθε σχήματος αποτελούνται από έξι μέρη. Ειδικότερα, το πάνω αριστερό διάγραμμα (Α) δείχνει τα τμήματα συνεχούς ύφεσης σε συνάρτηση με την πάροδο του χρόνου. Ενδιάμεσα το διάγραμμα (Β), απεικονίζει τις υπολογισμένες τιμές του δείκτη ύφεσης. Ενώ το διάγραμμα (C), στο άνω δεξιό τμήμα, απεικονίζει τη γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της λογαριθμικής παροχής και του δείκτη ύφεσης. Όσον αφορά στο διάγραμμα (D) παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης ( $R^2$ ) που αντιστοιχούν σε κάθε σταθμό.

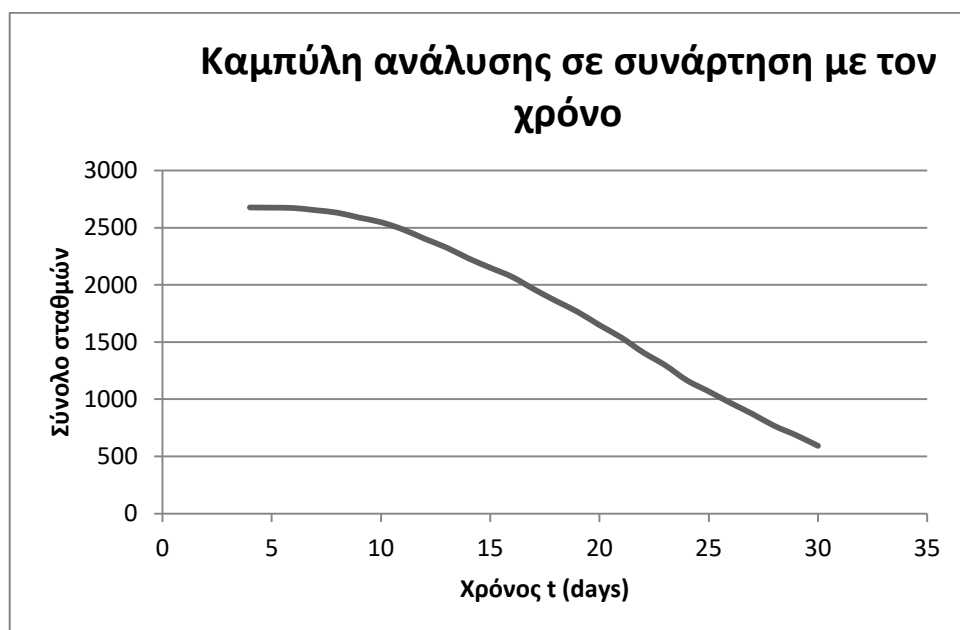
Τέλος, κάτω δεξιά στο διάγραμμα κύριας ύφεσης (MRC), απεικονίζεται η καμπύλη κύριας ύφεσης του ενός συγκεκριμένου σταθμού. Μέσα από το διάγραμμα αυτό αντλούνται σημαντικές πληροφορίες. Λεπτομερειακά, οι συντελεστές αυτοί της κύριας καμπύλης ύφεσης είναι ευδιάκριτοι στο γράφημα, ενώ ο χρόνος για τον οποίο υπολογίστηκαν ταυτίζεται με αυτόν του διαγράμματος (Α), για το μεγαλύτερο τμήμα της συνεχούς ύφεσης.

### 1.3 Καμπύλη Ανάλυσης

Απαιτούμενος Χρόνος για να θεωρηθεί ένα τμήμα ύφεσης t (days)	Σύνολο για τα οποία μπορεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία με το συγκεκριμένο t
4	2677
5	2675
6	2672
7	2653
8	2631
9	2588
10	2548
11	2485
12	2403
13	2326
14	2232
15	2150
16	2070
17	1962
18	1860
19	1764
20	1648
21	1539
22	1409
23	1298
24	1165
25	1068
26	967
27	871
28	767
29	685
30	592

Πίνακας 2: Το σύνολο των σταθμών που γίνεται η ανάλυση για κάθε ημέρα





Εικόνα 38: Καμπύλη ανάλυσης των πηγαδιών σε συνάρτηση με τον απαιτούμενο χρόνο

Όπως φαίνεται παραπάνω, καθώς αυξάνεται το σύνολο των προαπαιτούμενων ημερών θεώρησης τμήματος, παρατηρείται ότι οι σταθμοί που καταγράφουν την παροχή μειώνονται. Επεξηγηματικά, στη περίπτωση των τριάντα απαιτούμενων ημερών, οι σταθμοί που χρησιμοποιούνται και παρέχουν πληροφορίες έχουν μειωθεί στο σύνολο κατά 80% των αρχικών πηγαδιών.

## 2.1 Λόγος συντελεστών μεταβιβασιμότητας προς αποθηκευτικότητα.

Στη περίπτωση των τεσσάρων συνεχόμενων ημερών για τον ορισμό ενός τμήματος ύφεσης, υπολογίστηκαν οι τιμές των συντελεστών μεταβιβασιμότητας προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας  $\left(\frac{T}{S}\right)$ . Με εφαρμογή της προαναφερθείσας μεθοδολογίας στα διαθέσιμα δεδομένα των σταθμών.

Με δεδομένα τα αποτελέσματα που προκύπτουν έγινε μια πρώτη στατιστική ανάλυση για την εύρεση των βασικών χαρακτηριστικών του πληθυσμού τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Μεταβλητές		Αριθμητική τιμή
Mean	Μέσος όρος	0.06246274
Standard Error	Τυπικό σφάλμα	0.003817699
Median	Διάμεσος	0.009493798
Standard Deviation	Τυπική απόκλιση	0.197526723
Sample Variance	Διακύμανση δείγματος	0.039016806
Kurtosis	Κυρτότητα	83.35697587
Skewness	Ασυμμετρία	7.709816673
Range	Εύρος τιμών	3.331996406
Minimum	Ελάχιστη τιμή	1.11303E-07
Maximum	Μέγιστη τιμή	3.331996517
Count		2677
Largest(1)	Μεγαλύτερη τιμή	3.331996517
Smallest(1)	Μικρότερη τιμή	1.11303E-07
Confidence Level(95.0%)	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	0.007485938

Πίνακας 3: Ανάλυση δεδομένων για τις τιμές των παραμέτρων μεταβιβασιμότητας προς της αποθηκευτικότητας

Από τη στατιστική ανάλυση των τιμών της μεταβλητής ( $\frac{T}{S}$ ), εξάγονται διάφορα συμπεράσματα σχετικά με την κατανομή των τιμών της. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη και η μικρότερη τιμή της παραμέτρου είναι  $3,334 \frac{m^2}{day}$  και  $1,11 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{day}$  αντίστοιχα. Ο μέσος όρος είναι  $0.062 \frac{m^2}{day}$ , ενώ η διάμεσος των συνολικών συντελεστών μεταβιβασιμότητας προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας είναι  $0.00949 \frac{m^2}{day}$ .

Επιπλέον, οι τιμές της κύρτωσης και της ασυμμετρίας δείχνουν ότι το δείγμα δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή. Για να ίσχυε αυτό θα έπρεπε η τιμή της κύρτωσης να ήταν κοντά στη τιμή τέσσερα και η τιμή της ασυμμετρίας να πλησίαζε τις τρεις μονάδες.

## 2.2 Συντελεστής Παλινδρόμησης ( $R^2$ )

Ο συντελεστής παλινδρόμησης ( $R^2$ ) αποτελεί ένα δείκτη αξιολόγησης του μοντέλου. Ο συντελεστής αυτός προσδιορίζει πόσο γραμμικά συσχετισμένες είναι η μεταβλητή της λογαριθμικής παροχής ( $\log Q$ ) και ο χρόνος (days).

Οι τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης, προέκυψαν από τα διαγράμματα τμηματικής ύφεσης για κάθε μια από τις περιπτώσεις. Η κάθε τιμή του συντελεστή αντιστοιχεί στο τμήμα εκείνο που εξετάζεται η ύφεση. Επομένως όσα είναι τα τμήματα ύφεσης τόσοι συντελεστές παλινδρόμησης προκύπτουν.

Στη προκειμένη περίπτωση, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των συντελεστών παλινδρόμησης που αφορούν τις καμπύλες ύφεσης των σταθμών εκείνων που παρείχαν πληροφορίες και για τις τρεις περιπτώσεις των προαπαιτούμενων ημερών ορισμού του τμήματος ύφεσης. Με αυτό τον τρόπο, διευκολύνεται η εκτίμηση του μοντέλου καθώς για τους τέσσερις ίδιους σταθμούς και για διαφορετικό προκαθορισμένο διάστημα εξετάζονται οι συντελεστές. Δηλαδή, συγκεντρώθηκαν οι τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης που αφορούν το προαπαιτούμενο χρονικό

διάστημα των τριάντα ημερών, δεκαπέντε ημερών και τεσσάρων ημερών που χρειάζονται για να θεωρηθεί το τμήμα ύφεσης.

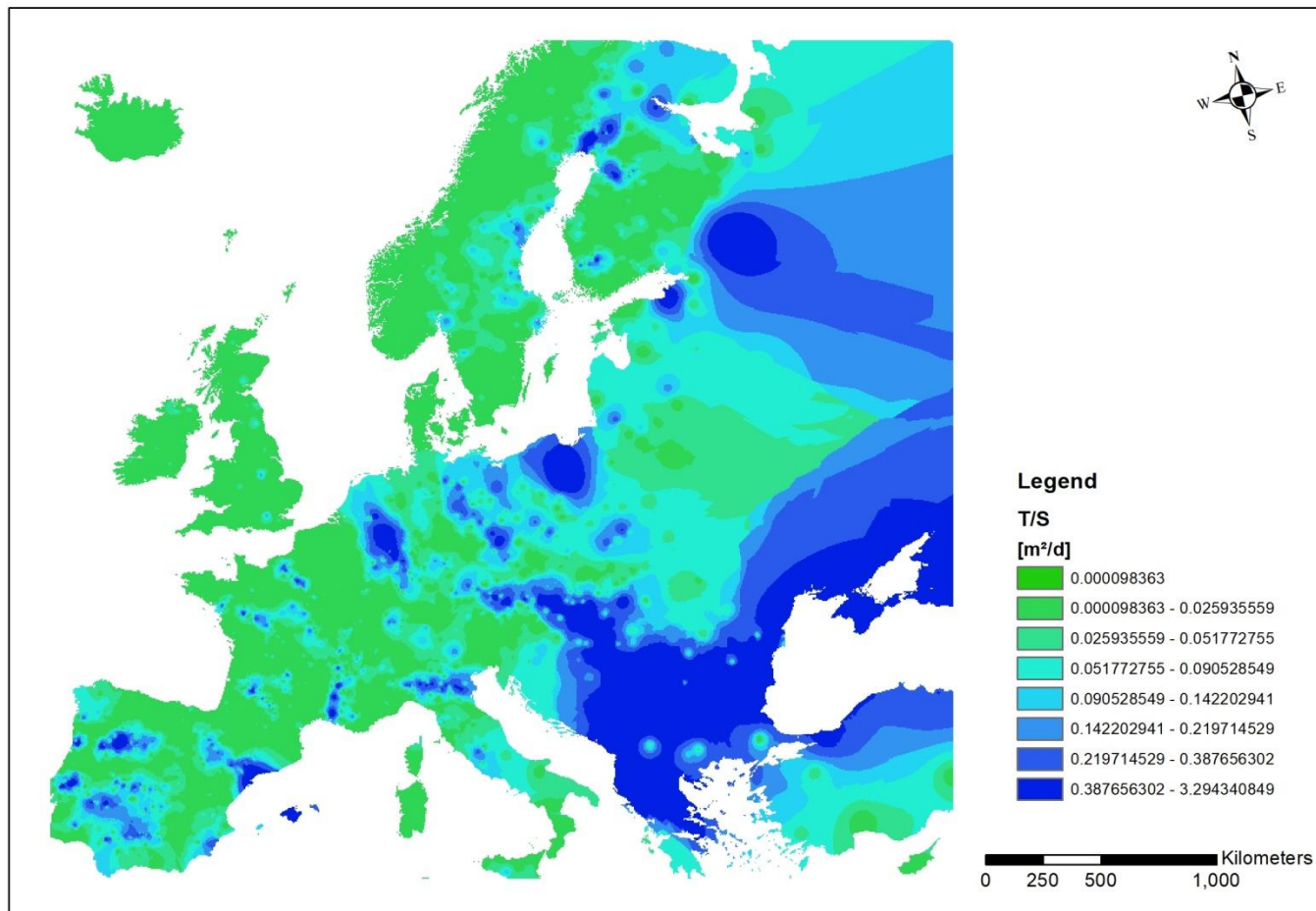
Σταθμοί	Συντελεστής Παλινδρόμησης( $R^2$ )		
	4 προαπαιτούμενες ημέρες	15 προαπαιτούμενες ημέρες	30 προαπαιτούμενες ημέρες
ID_1	0,67-1	0,83-1	0,96-1
ID_2	0,65-1	0,91-1	0,94-1
ID_3	0,61-1	0,61-1	0,89-1
ID_4	0,71-1	0,87-1	0,91-1

Πίνακας 4: Συντελεστές παλινδρόμησης  $R^2$  για την περίπτωση των τριάντα, δεκαπέντε και τεσσάρων προαπαιτούμενων ημερών

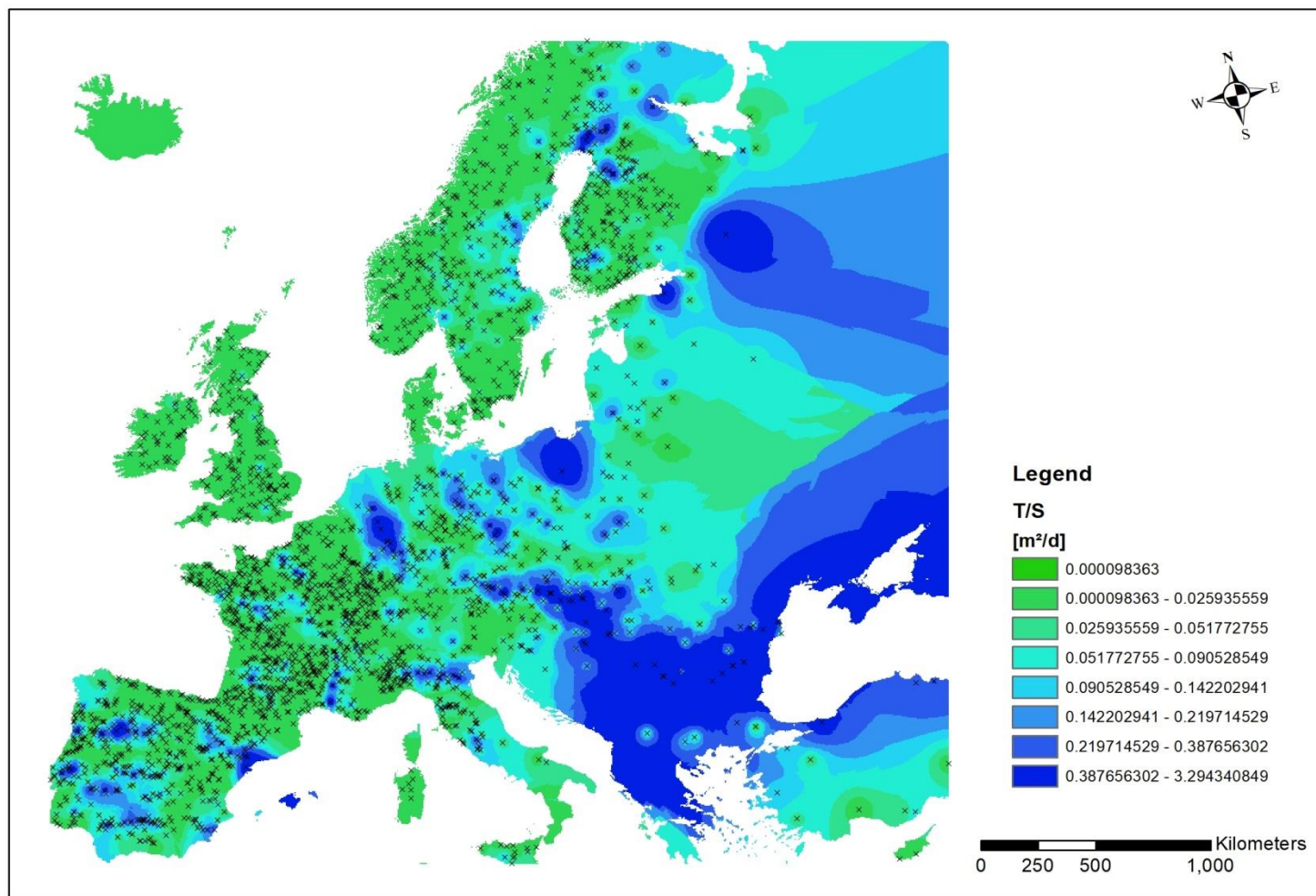
Συνοψίζοντας και παραθέτοντας τους συντελεστές παλινδρόμησης, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο πιο μεγάλοι είναι οι συντελεστές παλινδρόμησης ( $R^2$ ) τόσο η καμπύλη ύφεσης ταυτίζεται με το θεωρητικό μοντέλο και ακολουθεί μια λογαριθμική σχέση με το χρόνο.

### 2.3 Δημιουργία πανευρωπαϊκού χάρτη

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την μέθοδο της παρεμβολής του αντιστρόφου τετραγώνου (IDW) είναι μια σημαντική διαδικασία καθώς τα αποτελέσματα οφείλουν να πληρούν κάποια κριτήρια για να αξιοποιηθούν κατάλληλα. Ειδικότερα, καλύτερα αποτελέσματα εξασφαλίζονται όταν το δείγμα που διατίθεται είναι επαρκώς πυκνό με σεβασμό στην τοπική μεταβολή, η οποία θα παρασταθεί. Στη περίπτωση που το δείγμα των σημείων που χρησιμοποιείται είναι σποραδικό ή πολύ ανομοιογενές, τα αποτελέσματα μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά επαρκώς για την επιθυμητή επιφάνεια (Μαμάσης Ν., Κουτσογιάννης Δ.). Παράλληλα, ιδιαίτερης προσοχή χρήζει ο έλεγχος της τελικής τιμής του στοιχείου μετά την εφαρμογή της μεθόδου, καθώς το εκάστοτε στοιχείο οφείλει να περιορίζεται μέσα στα όρια του δείγματος των χωρών που εντοπίστηκε, ώστε να προκύψει αξιόπιστο αποτέλεσμα και κατά επέκταση τη δημιουργία του χάρτη.



Εικόνα 39: Πανευρωπαϊκός χάρτης



Εικόνα 40: Πανευρωπαϊκός χάρτης με απεικόνιση των σημείων των σταθμών

Συγκρίνοντας τους δυο πανευρωπαϊκούς χάρτες, είναι άξιο σχολιασμού ότι στα σημεία που οι εντοπισμένες τιμές είναι συσσωρευμένες, παρατηρείται ευκρίνεια και μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

## Συζήτηση

Όπως, αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν διάφορες τεχνικές προσδιορισμού του συντελεστή μεταβιβασιμότητας προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας ( $\frac{T}{S}$ ) από την παροχή. Αυτές οι τεχνικές διακρίνονται σε αναλυτικές εκφράσεις, σε ημι-αναλυτικές εκφράσεις, εμπειρικές, γεωστατικές και σε υβριδικές μεθόδους. Η θεωρητική εργασία των Cooper και Rorabaugh που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, βασίστηκε στη μέθοδο ανάλυσης της ύφεσης και αποτελεί εργαλείο που χρησιμοποιείται συχνά ολόκληρο τον τελευταίο αιώνα για την ανάλυση της ροής σε ένα ποτάμι και εξαγωγή από αυτήν παραμέτρων του υποκείμενου συνδεδεμένου υδροφορέα. Έτσι λοιπόν, προσδιορίστηκε η υδραυλική παράμετρος ( $\frac{T}{S}$ ) μέσω της κατασκευής των παραπάνω διαγραμμάτων. Ειδικότερα, κατασκευάστηκαν υδρογραφήματα για την απεικόνιση και τον αρχικό έλεγχο της ποιότητας των χρονοσειρών, ώστε να απορριφθούν ακραίες, εμφανώς λάθος τιμές, καθώς και διαγράμματα προσδιορισμού της τμηματικής ύφεσης για την εκτίμηση της μέσης τιμής της σταθεράς των συντελεστών μεταβιβασιμότητας προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας ( $\frac{T}{S}$ ), καθώς η παράμετρος αυτή μπορεί να καταστεί πολύ χρήσιμη σε περίπτωση προσομοίωσης υπόγειων υδάτων μεγάλης κλίμακας σε πανευρωπαϊκό επίπεδο.

Κατά αρχάς, ο προσδιορισμός και η επιλογή των τμημάτων που επιλέχθηκαν να μελετηθούν έγινε με κριτήρια τον αριθμό των σταθμών και τον απαιτούμενο αριθμό ημερών για την θεώρηση ενός τμήματος ύφεσης. Ειδικότερα, επιλέχθηκαν να εξεταστούν δυο σταθμοί από κάθε χώρα για τρεις περιπτώσεις συνεχόμενων ημερών δηλαδή για διάστημα των τεσσάρων ημερών, των δεκαπέντε και τριάντα ημερών αντίστοιχα. Για τις συνθήκες αυτές κατασκευάστηκαν τα παραπάνω διαγράμματα.

Όσον αφορά τα υδρογραφήματα δηλαδή τις χρονοσειρές της ροής δεν παρατηρείται αλλαγή καθώς πάντα απεικονίζουν την διακύμανση της ροής με το πέρασ των ημερών. Η κατασκευή των υδρογραφημάτων αποσκοπεί στον έλεγχο των δεδομένων για πιθανή ύπαρξη ακραίων τιμών, καθώς η εμφάνιση αυτών θα καταστούσε δύσκολη την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης της ύφεσης. Επεξηγηματικά, σε περιπτώσεις που κάποιοι σταθμοί παρείχαν ακραίες ή καθόλου τιμές, θα απεικονίζονταν ανομοιόμορφα διαγράμματα με οριζόντια τμήματα, γεγονός που δεν θα επέτρεπε τον εντοπισμό των καμπυλών ύφεσης και κατά επέκταση τον ορισμό των τμημάτων.

Στα διαγράμματα προσδιορισμού της τμηματικής ύφεσης παρατίθενται πληροφορίες για τα τμήματα συνεχούς ύφεσης σε συνάρτηση με την πάροδο του χρόνου, τις υπολογισμένες τιμές του δείκτη ύφεσης, τη συσχέτιση της λογαριθμικής παροχής με τον δείκτη ύφεσης αλλά και τον συντελεστή παλινδρόμησης ( $R^2$ ) που αντιστοιχεί σε κάθε σταθμό. Παρατηρείται λοιπόν, στη περίπτωση που προεπιλέγονται τέσσερις ημέρες για τον καθορισμό ενός τμήματος ύφεσης, ότι το

σύνολο των τμημάτων είναι μεγαλύτερο από ότι στη περίπτωση των τριάντα ημερών. Αποτελεί λογική απόρροια καθώς με την αύξηση των ημερών, ο αριθμός των τμημάτων περιορίζεται. Επίσης, γραφικά αυτό γίνεται εμφανές καθώς τα σημεία συνεχούς ύφεσης είναι τόσα πολλά, που δημιουργούν μια πυκνή εικόνα.

Παράλληλα μια άλλη παράμετρος που ποικίλει και διαφέρει σε κάθε διάγραμμα είναι ο συντελεστής παλινδρόμησης  $R^2$ . Ο συντελεστής αυτός παρέχει μια ένδειξη του πόσο καλά προσαρμόζεται το θεωρητικό μοντέλο στα πειραματικά δεδομένα του κάθε σταθμού. Η ειδική εννοιολογική ερμηνεία της τετραγωνικής ρίζας ενός τέτοιου ποσοστού αν και πολλές φορές είναι δυσνόητη, προτιμάται από έναν συντελεστή γραμμικής συσχέτισης. Το  $R^2$  ως μη αρνητικός αιθμός μικρότερος ή ίσος της μονάδας έχει τετραγωνική ρίζα αριθμό μεγαλύτερο του. Όσο η τιμή του συντελεστή παλινδρόμησης  $R^2$  έχει μεγαλύτερη τιμή, τόσο το μοντέλο πλησιάζει το θεωρητικό. Είναι οφθαλμοφανές ότι η σύγκριση των τιμών για κάθε ένα από τα χρονικά προκαθορισμένα διαστήματα των τεσσάρων, δεκαπέντε και τριάντα ημερών, αποδίδει το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο σε μέρες είναι το χρονικό διάστημα ορισμού του τμήματος ύφεσης τόσο ο συντελεστής παλινδρόμησης εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή. Επομένως, αποδεικνύεται ότι το προκαθορισμένο διάστημα των τριάντα ημερών είναι ικανοποιητικό για την θεώρηση ενός τμήματος ύφεσης καθώς το μοντέλο μας πλησιάζει πιο κοντά στο θεωρητικό.

Επιπλέον, σημαντικές πληροφορίες προέκυψαν από την καμπύλη ανάλυσης των πηγαδιών καθώς άλλαξε ο αριθμός των ημερών θεώρησης ενός τμήματος ύφεσης. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε ότι καθώς οι μέρες αυξάνονται προκειμένου να ληφθεί υπόψη ένα τμήμα, οι σταθμοί που αναλύουν την παροχή μειώνονται. Χαρακτηριστικά, στις τριάντα ημέρες, οι σταθμοί στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία είναι 592 ενώ στη περίπτωση των τεσσάρων ημερών ο συνολικός αριθμός των σταθμών είναι 2.677. Παρατηρώντας προσεκτικά τα αρχικά χρονικά διαστήματα δεν είναι εμφανής η μείωση των σταθμών, ενώ καθώς ο αριθμός των ημερών αυξάνεται η μείωση των πηγαδιών είναι πιο ευδιάκριτη. Θεωρητικά όσο αυξάνεται ο αριθμός των απαιτούμενων ημερών τόσο πραγματοποιείται καλύτερη ανάλυση. Ταυτόχρονα όμως μικραίνει ο αριθμός των σταθμών που εφαρμόζεται η μέθοδος της ανάλυσης των δεδομένων. Έτσι λοιπόν, απαραίτητο για την κατασκευή του χάρτη είναι η συγκέντρωση μεγάλου αριθμού τιμών από την μεθοδολογία που προϋποθέτει τον βέλτιστο προσδιορισμό αριθμό ημερών θεώρησης τμήματός με τον κατάλληλο αριθμό σταθμών.

Ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας αποτελεί η μέση τιμή της σταθεράς των συντελεστών μεταβιβασιμότητας προς τον συντελεστή αποθηκευτικότητας  $\left(\frac{T}{S}\right)$ . Οι τιμές αυτές και άλλα στατιστικά στοιχεία του συντελεστή αυτού προκύπτουν από την μαθηματική ανάλυση των δεδομένων μέσω του προγράμματος excel. Τέτοια αξιόλογα στοιχεία είναι η μεγαλύτερη και η μικρότερη τιμή της σταθεράς  $\left(3,334 \frac{m^2}{day}\right)$  και  $1,11 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{day}$  αντίστοιχα) αλλά και η διάμεσος  $0.00949 \frac{m^2}{day}$ . Μια άλλη στατιστική μέθοδος η οποία ασχολείται με το καθορισμό ενός φάσματος πιθανών τιμών της παραμέτρου είναι το διάστημα εμπιστοσύνης. Για περίπου 95% των τιμών της σταθεράς  $\left(\frac{T}{S}\right)$ , το διάστημα εμπιστοσύνης περιέχει την πραγματική τιμή της

παραμέτρου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για διάστημα εμπιστοσύνης 95% η μέγιστη τιμή είναι  $0,0699 \frac{\text{m}^2}{\text{day}}$  και η κατώτερη τιμή  $-0,0550 \frac{\text{m}^2}{\text{day}}$ . Επομένως, το 95% του πληθυσμού αναμένουμε να βρίσκεται εντός των δυο αυτών τιμών.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και με την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε η χάραξη του πανευρωπαϊκού χάρτη με βοήθεια του προγράμματος GIS. Όπως, αναλυτικά αναπτύχθηκε παραπάνω, η μέθοδος της παρεμβολής του αντίστροφου τετραγώνου IDW, υπολογίζει την τιμή της υδραυλικής παραμέτρου χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό συνδυασμό των τιμών από ένα σύνολο σημείων του δείγματος.

Τέλος, παρατηρώντας τους πανευρωπαϊκούς χάρτες και συγκρίνοντάς τους, είναι εμφανές ότι σε μεγάλες κοιλάδες και ποτάμια της Ευρώπης, οι τιμές της υδραυλικής παραμέτρου, της μεταβιβασιμότητας προς την αντίστοιχη αποθηκευτικότητα  $\left(\frac{T}{S}\right)$ , είναι μεγαλύτερες. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 40, στην περιοχή του Βόλγα, του Δούναβη, του Ρήνου οι τιμές των μεταβλητών είναι αυξημένες, γεγονός που οφείλεται στην μεγαλύτερη εναπόθεση και διόδευση δια καναλιού και δια ταμειυτήρας νερού. Σε αντίθεση με τις ορεινές περιοχές και τα βουνά, όπως είναι οι οροσειρές των Άλπεων, που παρατηρείται περιορισμένη μεταβιβασιμότητα των υδάτων.



## Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την διαδικασία συγγραφής της διπλωματικής εργασίας με θέμα «Δημιουργία Πανευρωπαϊκού Χάρτη Υδραυλικών Παραμέτρων με τη Μέθοδο Ανάλυσης Της Ύφεσης» θα ήθελα να διευκρινιστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ανάλυσης της ύφεσης για τον προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων. Αλλά παράλληλα και η καταλληλότητα της χάραξης του χάρτη της εκάστοτε περιοχής μελέτης για την απεικόνιση των παραμέτρων των υδροφορέων.

Η μέθοδος ανάλυσης της ύφεσης είναι μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται ευρέως και πολλοί ερευνητές έχουν τοποθετηθεί υπέρ της χρήσης της και έχουν αναπτύξει διαφορετικές τεχνικές εφαρμογής της. Όπως αναλυτικά αναφέρθηκε παραπάνω, οι επιστημονικές κοινότητες που μελέτησαν και χρησιμοποίησαν τη μέθοδο αυτή δεν εκφράζουν ιδιαίτερα αντίθετες προσεγγίσεις στη χρήση της.

Στη συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε να ακολουθηθεί η τεχνική που ανέπτυξαν οι Cooper.H και Rorabough.M (H. H Cooper & M. I Rorabough, 1963) οι οποίοι εξέφρασαν τη μέθοδο, με πιο ολοκληρωμένο και ταιριαστό τρόπο στο ζητούμενο θέμα της ανάλυσης της ύφεσης για προσδιορισμό μιας υδραυλικής παραμέτρου του υδροφορέα. Επιλέχθηκε λοιπόν η χρήση της μεθόδου αυτής, να υλοποιηθεί μέσω του προγράμματος MATLAB. Δηλαδή, με την χρήση ενός αλγορίθμου που έχει την δυνατότητα να επεξεργάζεται το σύνολο των δεδομένων όλων των σταθμών, να αναλύει χρονοσειρές της απορροής από τους ποταμούς, να λαμβάνει υπόψη τον επιθυμητό από το χρήστη, απαιτούμενο αριθμό των διαδοχικών ημερών για επιλογή ενός τμήματος ύφεσης και τέλος να υπολογίζει τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

Επομένως, μέσα από αυτή την διαδικασία προέκυψαν απαντήσεις για την σημασία των ημερών που πρέπει να καθορίζονται ώστε να θεωρηθεί ένα τμήμα ύφεσης αλλά και τους λόγους που επηρεάζουν τον καθορισμό αυτόν. Συγκεκριμένα, μέσω της μεθόδου δίνεται η δυνατότητα επιλογής των τμημάτων αυτών που δεν παρουσιάζεται κάποια ασυνέχεια λόγω μη καταγραφής ή έλλειψης των δεδομένων. Ταυτόχρονα όμως και την απομάκρυνση του αρχικού τμήματος της καμπύλης ύφεσης που δεν αντιστοιχεί στη βασική ροή, καθώς πιθανόν να επηρεάζεται από επιφανειακή ή και υπόγεια απορροή ή από την εξατμισοδιαπνοή. Όσον αναφορά, τις επιθυμητές μέρες θεώρησης ενός τμήματος προέκυψε, ότι καθώς ο αριθμός των ημερών θεώρησης ενός τμήματος ύφεσης αυξάνεται τόσο οι σταθμοί ανάλυσης των δεδομένων ελαττώνονται.

Ένα άλλο στοιχείο με το οποίο μπορεί να αξιολογηθεί το μοντέλο και κατά επέκταση η μέθοδος, είναι ο συντελεστής παλινδρόμησης  $R^2$  που πρύπτει από το διάγραμμα ύφεσης. Ο συντελεστής αυτός παρέχει μια ένδειξη του πόσο καλά προσαρμόζεται το θεωρητικό μοντέλο στα πειραματικά δεδομένα του κάθε σταθμού. Παρατηρήθηκε λοιπόν, ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός ημερών θεώρησης του τμήματος ύφεσης, τόσο η τιμή του συντελεστή μεγαλώνει και το μοντέλο ακολουθεί μια λογαριθμική σχέση με το χρόνο.

Όλα τα βήματα πραγμάτωσης της διαδικασίας και η χρήση της μεθόδου για τον προσδιορισμό υδραυλικών τιμών, όπως της μεταβλητής  $\frac{T}{S}$  των υπόγειων

υδάτων, οδηγεί στη δημιουργία του πανευρωπαϊκού χάρτη. Το αποτέλεσμα αυτό έχει διπλή σημασία ύπαρξης στην διπλωματική εργασία. Η χαρτογράφηση αυτή συμβάλλει στην καλύτερη και αντιπροσωπευτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων καθώς τιμές της μεταβιβασιμότητας (T) και αποθηκευτικότητας (S) αντιστοιχήθηκαν στους σταθμούς των ευρωπαϊκών χωρών από τους οποίους προέκυψαν. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται αξιολόγηση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων που ανακάλυψαν με την μέθοδο της ανάλυσης της ύφεσης, καθώς σε μεγάλες κοιλάδες και ποτάμια της Ευρώπης οι τιμές της μεταβλητής αναμένονται πιο μεγάλες. Ωστόσο, στο μέλλον η απεικόνιση των μεταβλητών στην περιοχή που περιγράφουν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δοθούν αρχικές τιμές υδραυλικών παραμέτρων σε ένα μοντέλο υπόγειων υδάτων πανευρωπαϊκής κλίμακας. Πιο αναλυτικά, στη περίπτωση που κάποιος ενδιαφερόμενος δεν έχει στην διάθεση του πληροφορίες και δεδομένα όπως είναι η υδραυλική αγωγιμότητα και η μεταβιβασιμότητα αλλά επιθυμεί την χάραξη πανευρωπαϊκού χάρτη, τότε με την χρήση του μοντέλου υπόγειων υδάτων και την εισαγωγή μιας δεδομένης τιμής μπορεί να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη βαθμονόμηση και να προκύψει το ζητούμενο αποτέλεσμα. Έτσι λοιπόν, η δημιουργία του πανευρωπαϊκού μοντέλου, βοηθάει τον αναγνώστη και μελετητή να χρησιμοποιήσει στο μέλλον αυτό το μοντέλο ως εργαλείο δημιουργίας νέου εξελιγμένου μοντέλου με σκοπό την λήψη αποφάσεων για μια ορθότερη διαχείριση των υδάτινων πόρων.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία εκφράζει και προτείνει την χρήση της μεθόδου ανάλυσης της ύφεσης και στον κλάδο της υδρολογίας και σε γεωπεριβαλλοντικά μοντέλα, διότι είναι αποτελεσματική για τον υπολογισμό υδραυλικών παραμέτρων. Κλείνοντας, η χαρτογράφηση αυτών και η χρήση χάρτη αποτελεί σημαντικό βήμα για την καλύτερη και ευκολότερη διάθεση των αποτελεσμάτων μας σε άλλους ερευνητές.

## Βιβλιογραφία

Καρατζάς, 2002, Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.

Καλλέργης Γ., 1996, Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας 2<sup>η</sup> έκδοση.

Howard Perlman, Χρήστος Μαρκόπουλος και Δημήτρης Κουτσογιάννης, Ο υδρολογικός κύκλος, Γεωλογική υπηρεσία Η.Π.Α.

Arnold, J.G., Allen, P.M., 1999. Automated Methods for Estimating Baseflow and Ground Water Recharge from Streamflow Records1. JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc. 35, 411–424. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x>

Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R., Bernhardt, G., 1995. Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques. Groundwater 33, 1010–1018. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1995.tb00046.x>

Brodie, R., Hostetler, S., 2005. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs, in: Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference. Auckland New Zealand.

Chapman, T.G., 1991. Comment on “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses” by R. J. Nathan and T. A. McMahon. Water Resour. Res. 27, 1783–1784. <https://doi.org/10.1029/91WR01007>

Clark, M.P., Rupp, D.E., Woods, R.A., Meerveld, H.J.T., Peters, N.E., Freer, J.E., 2009. Consistency between hydrological models and field observations: linking processes at the hillslope scale to hydrological responses at the watershed scale. Hydrol. Process. 23, 311–319. <https://doi.org/10.1002/hyp.7154>

H. H Cooper & M. I Rorabaugh, 1963. Ground-water movements and bank storage due to flood stages in surface streams. <https://doi.org/10.3133/wsp1536J>

Hantush, M.M., 2005. Modeling stream–aquifer interactions with linear response functions. J. Hydrol. 311, 59–79. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.007>

M.I Rorabaugh, n.d. Use of water levels in estimating aquifer constants in a finite aquifer (M.I Rorabaugh) [WWW Document]. URL <http://hydrologie.org/redbooks/a052/052030.pdf> (accessed 3.20.20).

Nathan, R.J., McMahon, T.A., 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. Water Resour. Res. 26, 1465–1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>

Ogden, L., 1965. Estimating Transmissibility with One Drawdown. Groundwater 3, 51–54. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1965.tb01222.x>

Stewart, M.K., 2015. Promising new base flow separation and recession analysis methods applied to streamflow at Glendhu Catchment, New Zealand. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 2587–2603. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2587-2015>

Sujono, J., Shikasho, S., Hiramatsu, K., 2004. A comparison of techniques for hydrograph recession analysis. *Hydrol. Process.* 18, 403–413. <https://doi.org/10.1002/hyp.1247>

Tallaksen, L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol.* 165, 349–370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)

## Παραρτήματα

### Κώδικας Matlab 1

```
%function y=RecessionCurves(StationsEU);
clc
for daySeg=17:29 % minimum number of days in order for a segment to be
considered
for fn=1:3
if fn==1
clearvars -except fndaySeg
%fn=1;
% close all
load StationsEUp1.txt
StationsEU=StationsEUp1;
elseif fn==2
save('Results1.mat')
clearvars -except fndaySeg
%fn=2;
% close all
load StationsEUp2.txt
StationsEU=StationsEUp2;
else
save('Results2.mat')
clearvars -except fndaySeg
%fn=3;
% close all
load StationsEUp3.txt
StationsEU=StationsEUp3;
end
%clear Qstation timestat ion timeall Qall
Qall=StationsEU(:,7);
timeall(:,1)=StationsEU(:,6);
timeall(:,2)=StationsEU(:,5);
timeall(:,3)=StationsEU(:,4);
StationNo=1;
l=0;

st=0;
sty=0;
stn=0;
disp('
Was the station analysed?')
StationsEU(length(Qall)+1,2)=StationsEU(length(Qall),2)+1;
for k=2:floor((length(Qall)+1))
if StationsEU(k,2)==StationsEU(k-1,2)
l=l+1;
Qstation(l)=Qall(k);
timestat ion(l,:)=timeall(k,:);
iftimestat ion(l,1)==97
timestat ion(l,1)=1997;
elseif timestat ion(l,1)==98
timestat ion(l,1)=1998;
elseif timestat ion(l,1)==99
timestat ion(l,1)=1999;
elseif timestat ion(l,1)==0
timestat ion(l,1)=2000;
elseif timestat ion(l,1)==1
timestat ion(l,1)=2001;
elseif timestat ion(l,1)==2
timestat ion(l,1)=2002;
```

```

elseif timestatation(1,1)==3
timestatation(1,1)=2003;
elseif timestatation(1,1)==4
time station(1,1)=2004;
end
elseif l<=30
clear Qstationtimestatation
l=0;
strdis=['Station ',num2str(Stations EU(k-1,2)),' has less than 30
days of data, Skipped'];
disp(strdis)
st=st+1;
stn=stn+1;
else
if StationsEU(k-1,2)==5000079 || StationsEU(k-1,2)==5000169 ||
StationsEU(k-1,2)==15000103 || StationsEU(k-1,2)==15000232 ||
StationsEU(k-1,2)==25000091 || StationsEU(k-1,2)==25000169 ||
StationsEU(k-1,2)==35000392 || StationsEU(k-1,2)==35000667 ||
StationsEU(k-1,2)==45000376 || StationsEU(k-1,2)==45000619 ||
StationsEU(k-1,2)==55000035 || StationsEU(k-1,2)==55000144 ||
StationsEU(k-1,2)==7500045 || StationsEU(k-1,2)==75000258 ||
StationsEU(k-1,2)==85000081 || StationsEU(k-1,2)==85000142 ||
StationsEU(k-1,2)==95000011 || StationsEU(k-1,2)==95000022
figure(figure)
title(num2str(StationsEU(k-1,2)))
subplot(3,1,1)
plot(Qstation)
subplot(3,1,2)
if length(Qstation)>=1000
plot(Qstation(1:1000));
end
subplot(3,1,3)
if length(Qstation)>=1000
plot(Qstation(500:600));
end
end
%strdis=['Is there a problem with this station?' sprintf('\n') 'If
there is a problem press any number and Enter, otherwise just
Enter'];
%userop=input(strdis);
userop=''; % Skip the manual check of the time series
%strdis=['Station ',num2str(StationsEU(k-1,2)),' has more than 30
days of data; Proceeding to the next step'];
%disp(strdis)
if isempty(userop)

[A(sty+1,1),B(sty+1,1),C(sty+1,1),K(sty+1,1),Klongseg(sty+1,1)]=RecSe
g(Qstation,timestatation,StationsEU(k-1,2),daySeg);
StID(sty+1,1)=StationsEU(k-1,2);
clear Qstationtimestatation
l=0;

st=st+1;
sty=sty+1;
else
clear Qstationtimestatation
l=0;
strdis=['Station ',num2str(StationsEU(k-1,2)),' was removed from the
user, Skipped'];
disp(strdis)
st=st+1;
stn=stn+1;

```

```

end
end
end
disp(' ')
disp('Summary')
disp('-----')
strdis=[num2str(st),' stations have been found; ', num2str(sty), '
were considered for recession curve calculation and ',num2str(stn), '
were skipped'];
disp(strdis)
strdis=['The records of ',num2str(length(C(C~=0))), ' stations have
been analysed, since ',num2str(sty-length(C(C~=0))), ' did not have at
least three segments of recession of at least ',num2str(daySeg), '
days'];
disp(strdis)
disp('The master recession curve (MRC) has a form of:  $t = A*(\log Q)^2 + B*\log Q + C$ ')
disp('The coefficients of the MRC for each station are reported in
the table below')
disp(' ')
    load aval.csv
    clear ToverS
ToverS=zeros(length(StID),1);
TloverS=zeros(length(StID),1);
    load area.csv
StArea=zeros(length(StID),1);
for i=1:length(StID)
for j=1:length(aval(:,1))
if StID(i)==aval(j,1)
ToverS(i,1)=0.933*aval(j,2)^2/K(i);
TloverS(i,1)=0.933*aval(j,2)^2/Klongseg(i);
        Aval(i,1)=aval(j,2);
end
end
for k=1:length(area(:,1));
if StID(i)==area(k,1)
StArea(i)=area(k,2);
end
end
end

Out_T=[StID(isfinite(ToverS)&ToverS~=0),ToverS(isfinite(ToverS)&Tover
S~=0),TloverS(isfinite(ToverS)&ToverS~=0),StArea(isfinite(ToverS)&Tov
erS~=0),Aval(isfinite(ToverS)&ToverS~=0)];
end
    save('Results3.mat')
Out_T_Full=[];
for i=1:3
    fil=['Results', num2str(i) ,'.mat'];
    load(fil)
Out_T_Full=[Out_T_Full;Out_T];
end
    fil=['Out_T_Full_', num2str(daySeg) ,'.mat'];
    save(fil,'Out_T_Full')
end

```

## Κώδικας Matlab 2

```
function [A,B,C,K,Klongseg]=RecSeg(Q,time,stationNo,daySeg)
clear Qseg
n=datenum(time);
% Conversion to ft^3 (not necessary)
% Q=Q/(0.3048^3);
daybefore=zeros(length(time),1);
daybefore(1)=1;
xi=1;
yi=1;
logQmin=min(min(log10(Q)));
logQmax=max(max(log10(Q)));
Klongseg=0; % avoid error of no value for Klongseg
% Show or not the graphs
if stationNo==5000079 || stationNo==5000169 || stationNo==15000103 ||
stationNo==15000232 || stationNo==25000091 || stationNo==25000169 ||
stationNo==35000392 || stationNo==35000667 || stationNo==45000376 ||
stationNo==45000619 || stationNo==55000035 || stationNo==55000144 ||
stationNo==7500045 || stationNo==75000258 || stationNo==85000081 ||
stationNo==85000142 || stationNo==95000011 || stationNo==95000022
showgraph=0;
else
showgraph=0;
end
if showgraph==1
legAB=[]; %Probably unnecessary leftover parameter
end
% Main algorithm starts here
xlongseg=1;
longSeg=1;
for i=2:length(Q') % for the length of the station time series
if n(i)==n(i-1)+1 % if the days are consecutive
daybefore(i)=1;
if Q(i)<Q(i-1) % if there is reduction NOT stability in the flow
Qseg(xi,yi)=Q(i);
xi=xi+1; % recession days counter
elseif xi>=daySeg % if there is NOT a reduction in the flow AND the
number of previous consecutive recession days is sufficient
yi=yi+1; % recession segments counter
xi=1; % re-initialisation of recession days counter
else
Qseg(:,yi)=0; % start over looking for a recession segment
xi=1; % re-initialisation of recession days counter
end
end
end
if exist('Qseg','var')==0 % if Qseg is missing
Qseg=zeros(1,1); % create a zero Qseg parameter
end
[xi,yi]=size(Qseg); % calculate the size of the segments; xi is the
length of the longest segment, yi is the number of segments found
if Qseg(min([xi,daySeg]),yi)==0 % if the last value is zero (put there
by the code because of a former loop)
Qseg=Qseg(:,1:yi-1); % delete the zero value
yi=yi-1; % correct the length value
end
if yi>=3 % if there are at least three points for the MRC
TQseg=zeros(xi,yi); % initialize TQseg
T=1:xi; % time is from 1 to the length of the longest segment
if showgraph==1 % if graph is to be created
```



```

        figure(figure) % create a new figure window
%        maximize % this is a custom function that needs to be in the
MATLAB path or can be omitted
end
    cgr='b-g-r-c-m-y-k-
b:g:r:c:m:y:k:b.g.r.c.m.y.k.bogorocomoyokobxgxrxcmxyxkxb+g+r+c+m+y+k
+b*g*r*c*m*y*k*bsgsrscsmsysksbdgdrcdmdydkd'; % differentiate the
indications on the plot
    K1=zeros(yi,1); % initial values for K1
    Q2=ones(yi,2); % initial values for Q2
    C=-Inf; % initial value for C
    for i=1:yi % for every segment
        clear qlq % clear old values
        for j=1:xi % for all the values of the segment
            TQseg(j,i)=j; % update time value
            if Qseg(j,i)~=0 % if there is a flow value
                q(j)=Qseg(j,i); % update flow value
            end
        end
        if exist('q','var')==1 % if a flow value has been found, i.e. q is an
existing variable
            lq=log10(q); % calculate logarithm of flow
        else
            lq=[]; % define lq as empty
            q=[]; % define q as empty
        end
        if length(q)>xlongseg
            xlongseg=length(q);
            longSeg=i;
        end
        if showgraph==1
            subplot(2,3,1) % divide the plot in two rows of three
columns and plot on the first row and first column part
            hold on % plot all the plots without overwriting
        end
        if 2*i<=length(cgr)
            cgrstr=cgr(2*i-1:2*i); % select different indicator
        else
            cgrstr='bo'; % default value if there are too many segments; blue
circle with no line
        end
        if showgraph==1
            %legAB=[legAB; num2str(stationNo)];
            plot(T(1:length(q)),lq(1:length(q)),cgrstr) % plot
logarithm of flow over time
        end
        % tcrit can be: a) the maximum of 3 or the half-length of the
% segment, b) the time that a 3-day moving average starts to
% decline, c)
        tcrit=max(1,round(0.3*length(q))); % select the critical time value,
i.e. the time from the beginning of the recession segment that is
excluded from the analysis
        tend=round(0.99*length(q)); % selection of the end time,
after which recession segment points are not included to avoid
interference of small rainfall influence
        X=[lq(tcrit:tend)' ones(tend-tcrit+1,1)]; % formatting X in a
way to create a y=a*x+b regression in a next step (ones are important
in order to account for the b constant value term)
        Y=T(tcrit:tend)'; % creation of the necessary Y for the
regression
        if numel(X)~=0 % if the number of elements of X is not zero

```

```

if sum(isfinite(X))==length(X) % if all the elements of X are finite
(no Inf value)
if rank (X)~=1 % ?
[B,~,~,~,STATS]=regress(Y,X); % regression
K1(i,1)=abs(B(1));
Q2(i,1)=mean(lq);

end
else
disp('Rank Deficiency')
B=[];

end
else
disp('Regression is aborted due to lack of data')
B=[];

end

ifshowgraph==1
subplot(2,3,2)
hold on

end
if 42+2*i<=length(cgr)
cgrstr=cgr(42+2*i-1:42+2*i);
else
cgrstr='bo';
end
ifshowgraph==1 && exist('B','var')~=0
ifnumel(B)==0
B(2)=C;

end
plot(K1(i,1),Q2(i,1),cgrstr)
C=max(C,B(2));
subplot(2,3,4)
hold on

ifnumel(lq)==0
lq=0;
end
if exist('STATS','var')
plot(STATS(1),lq(1),cgrstr)

end
end
end
%Q2(K1==0)=[];
%K1(K1==0)=[];
% Klongseg=min(K1(K1~=0));
if sum(K1)~=0
Klongseg=min(min(K1(K1~=0)));
end
K=mean(K1);
ifnumel(Q2)~=0 % if the number of elements of X is not zero
if sum(isfinite(Q2))==length(Q2) % if all the elements of X are
finite (no Inf value)
if rank (Q2)~=1 % ?
[B1,~,~,~,STATS1]=regress(K1,Q2);

else
B1=[0 0 0];

end
else
disp('Rank Deficiency')
B1=[0 0 0];

end
else

```

```

disp('Regression is aborted due to lack of data')
B1=[0 0 0];
end
ifshowgraph==1
    subplot(2,3,3)
    hold on
    title('C')
xlabel('Recession Index in days per log cycle')
ylabel('Log of Flow in m^3/d')
    plot(K1(:,1),Q2(:,1),'mo')
end
    SQ=sort(Q2(:,1));
Yhat=polyval(B1,SQ);
ifshowgraph==1
    plot(Yhat,SQ,'k-')
    subplot(2,3,1)
    hold on
    title('A')
xlabel('Time after peak in d')
ylabel('Log of Flow in m^3/d')
    legend show
    subplot(2,3,2)
    hold on
    title('B')
xlabel('Recession Index in days per log cycle')
ylabel('Log of Flow in m^3/d')
    legend show
    subplot(2,3,4)
    hold on
    title('D')
xlabel('R^2')
ylabel('Log of Flow in m^3/d')
    legend show
end
    clear AB
    A=-B1(1)/2;
    B=-B1(2);
    C=-A*max(max(log10(Qseg)))^2-B*max(max(log10(Qseg)));
if not(isnan(A) || isinf(A) || isnan(B) || isinf(B) || isnan(C) ||
isinf(C) || isnan(C-max(max(TQseg))) || isinf(C-max(max(TQseg))))
    rtmin=roots([A,B,C]);
    rtmax=roots([A,B,C-max(max(TQseg))]);
else
    rtmin=0;
    rtmax=5;
    disp('A, B or C has Inf or NaN value')
end
ifisreal(rtmin)&&isreal(rtmax)
if min(rtmin)>0
    rtmin=min(rtmin);
else
    rtmin=max(rtmin);
end
if min(rtmax)>0
    rtmax=min(rtmax);
else
    rtmax=max(rtmax);
end
else
    rtmin=0;
    rtmax=5;

```

```

disp ('Complex roots detected')
end
%X=linspace(min([abs(rtmin),abs(rtmax),0]),max([rtmin,rtmax,1]));
%Y=polyval([A,B,C],X);
Y=linspace(logQmin,logQmax);
X=A*Y.^2+B*Y+C;
ifshowgraph==1
    subplot(2,3,5)
    hold on
    title(['MRC: A=' num2str(A) ' B=' num2str(B) ' C='
num2str(C)])
xlabel('Time in days')
ylabel('Log of Flow in m^3/d')
%text(max(Y),max(X),['A=' num2str(A) ' B=' num2str(B) ' C='
num2str(C)])
plot(X,Y)
end
RQseg=reshape(Qseg,1,[]);
rind=RQseg~=0;
RQnz=RQseg(rind);
RTQseg=reshape(TQseg,1,[]);
TQnz=RTQseg(rind);
a=polyfit(TQnz',RQnz',2);
Y1step=polyval(a,X);
ifshowgraph==1
    subplot(2,3,6)
    hold on
disstr=['Station ' num2str(stationNo)];
title(disstr)
if exist('STATS1','var')==0
    STATS1(1)=0;
end
    plot(STATS1(1),1,'ro')
    text(STATS1(1)+0.1,1.1,num2str(STATS1(1)))
    axis off
    text(STATS1(1)+0.1,1.3,'R^2 value of the regression K vs.
logQ is')
    title('MRC non-linear regression 1 step')
xlabel('Time in days')
ylabel('Log of Flow in m^3/d')
    text(min(Y1step),max(X),['A=' num2str(a(1)) ' B='
num2str(a(2)) ' C=' num2str(a(3))])
    plot(Y1step,X)
end
disp('analysis completed successfully
YES')
%disp(' ')
else
%    disp('    less than three segments found; skipping to the next
station          NO')
%disp(' ')
    A=0; % avoid error of no value for A
    B=0; % avoid error of no value for B
    C=0; % avoid error of no value for C
    K=0; % avoid error of no value for K
end

```