



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Γενικευμένη περιοχοποίηση παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων στην Ελλάδα και ανάλυση υδατικού ισοζυγίου στο πλαίσιο Budyko

Διπλωματική Εργασία

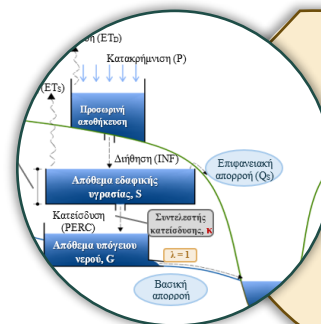
Μαριάννα Λαδά

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2025

Ανάγκη για αξιόπιστη υδρολογική μοντελοποίηση

Προσομοίωση
και αντιμετώπιση
ακραίων
φαινομένων



Κατανόηση
σύνθετων
διεργασιών
υδρολογικού κύκλου

Κρίσιμη για τη
διαχείριση των
υδατικών πόρων

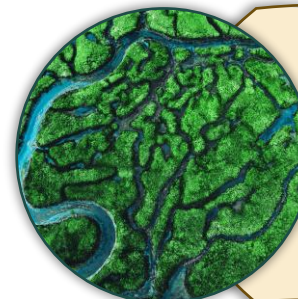


Υδρολογική
μοντελοποίηση



Περιβαλλοντική
προστασία –
Διατήρηση
οικολογικής
ισορροπίας

Σχεδιασμός
υποδομών και
προσαρμογή
στην κλιματική
αλλαγή



Παρατήρηση
συμπεριφοράς
λεκανών απορροής

Γενική τοποθέτηση προβλήματος και στόχος μελέτης



Προβλήματα εφαρμογής υδρολογικών μοντέλων

Έλλειψη ή ανεπάρκεια υδρομετρικών δεδομένων σε πολλές λεκάνες λόγω δυσκολιών και σημαντικού κόστους.

Χωρική ετερογένεια των φυσικών χαρακτηριστικών (έδαφος, ανάγλυφο, υδροπερατότητα, φυτοκάλυψη).

Πολυπλοκότητα στην επιλογή κατάλληλων παραμέτρων και δομής μοντέλου, ώστε να αναπαρίσταται ρεαλιστικά η συμπεριφορά της λεκάνης απορροής.

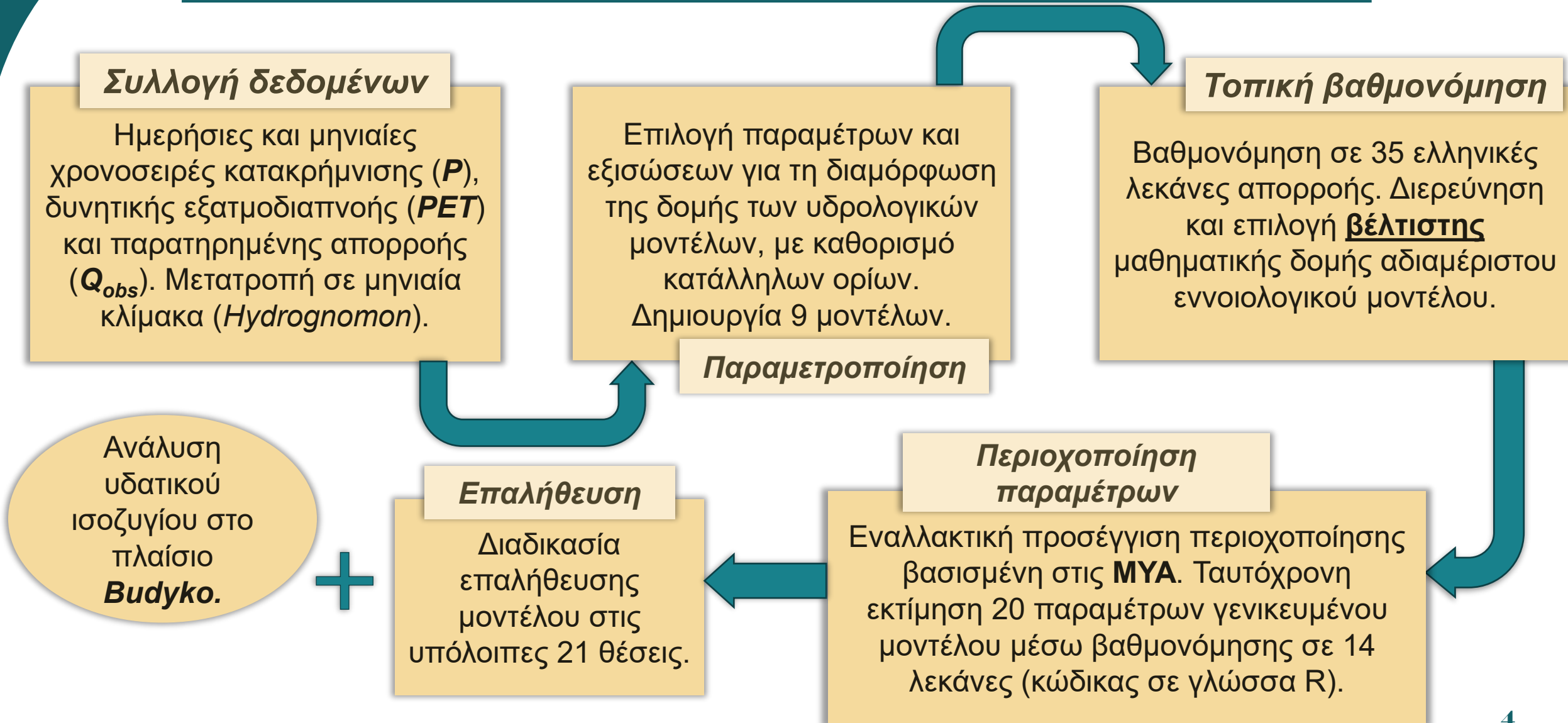


Στόχος διπλωματικής εργασίας

Περιοχοποίηση παραμέτρων ενός βέλτιστου υδρολογικού μοντέλου, με βάση την έννοια της Μονάδας Υδρολογικής Απόκρισης (**ΜΥΑ**).

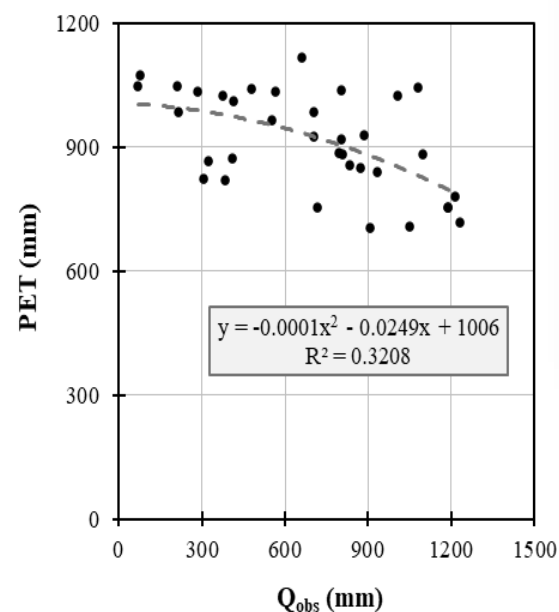
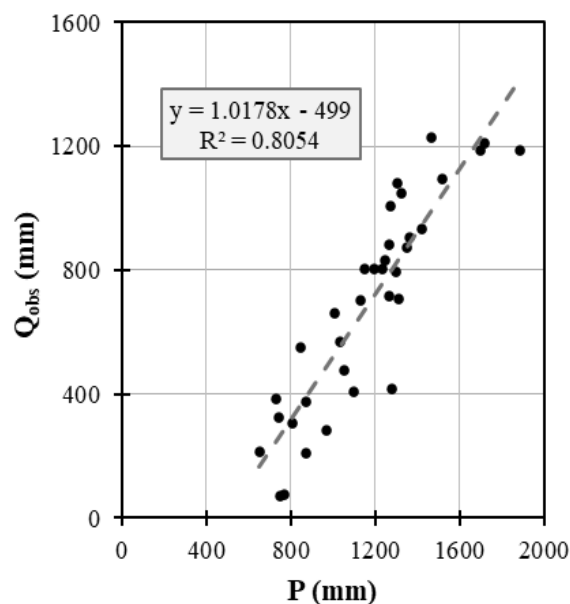
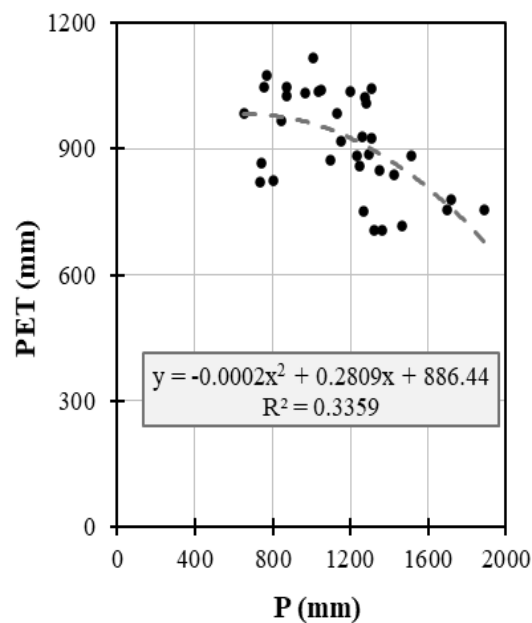
Αντί να βαθμονομούνται ξεχωριστά όλες οι λεκάνες, οι παράμετροι συσχετίζονται με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση ακόμη και σε περιοχές με ελλιπείς μετρήσεις.

Διάγραμμα ροής



Περιοχή μελέτης & δεδομένα

- Διαθέσιμα υδρομετρικά δεδομένα σε 35 λεκάνες απορροής κατανεμημένες στα Υδατικά Διαμερίσματα: Δυτικής Πελοποννήσου (GR01), Βόρειας Πελοποννήσου (GR02), Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (GR04), Ηπείρου (GR05), Θεσσαλίας (GR08) και Θράκης (GR12).
- Πρώτη ανάλυση υδρομετρικών δεδομένων:



Συσχέτιση μεταξύ των μέσων ετήσιων υδρολογικών μεταβλητών: βροχόπτωσης P , δυνητικής εξατμοδιαπνοής PET , παρατηρημένης παροχής Q_{obs} .

Διαθεσιμότητα δεδομένων ανά λεκάνη απορροής

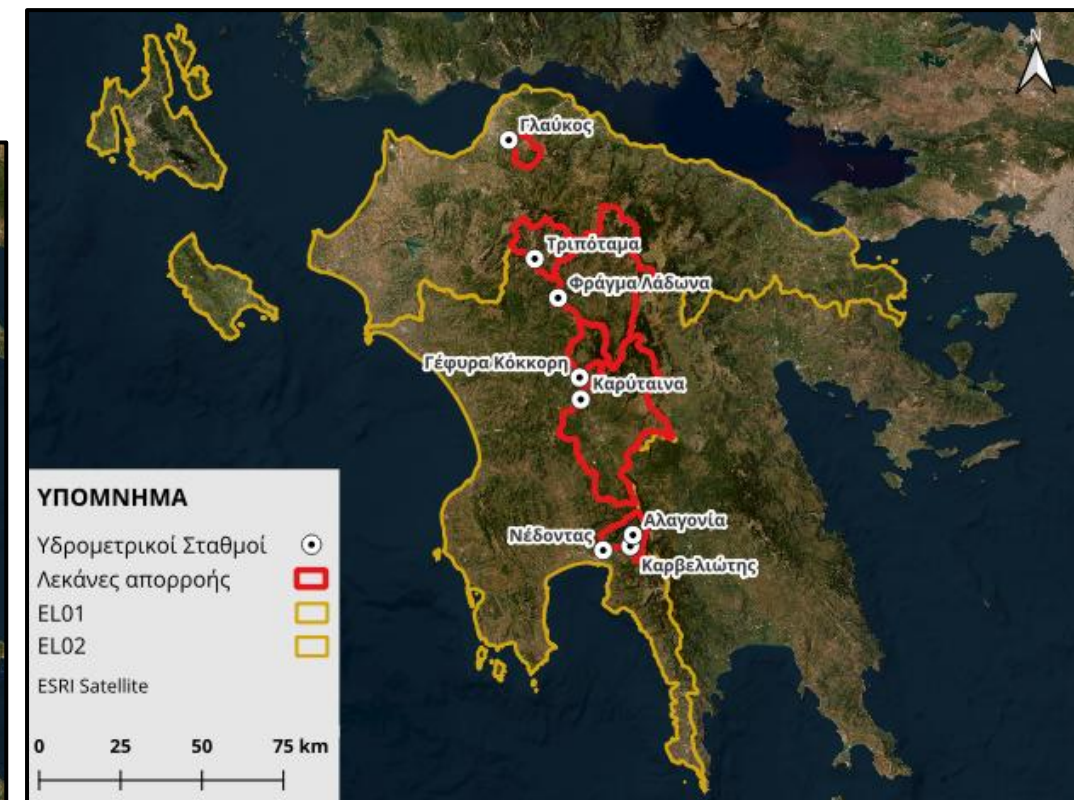
- **Χρονικό εύρος δεδομένων:**
2 έως 50 έτη στο διάστημα
1980 – 2021 (εξαίρεση: Μόρνος
έως 2025)
- **Χρονική κλίμακα:**
Ημερήσια και μηνιαία
- Μετατροπή σε **μηνιαίο χρονικό
βήμα** μέσω του λογισμικού
Hydrognomon
(Συνάθροιση – Aggregation).
- **Εξωτερικές εισροές:**
Γέφ. Κόκκορη, φρ. Λάδωνα, φρ.
Λούρου και Κιοτέκι: αφαίρεση
σταθερής απορροής ίσης με 5, 13,
40 και 20 mm/μήνα, αντίστοιχα.

Θέση βαθμονόμησης	ΥΔ	Περίοδος βαθμονόμησης
Αλαγονία	01	04/2012 - 01/2014
Γέφ. Κόκκορη	01	01/1995 - 11/2019
Καρβελιώτης	01	01/2012 - 11/2013
Καρύταινα	01	11/1980 - 08/2016
Φρ. Λάδωνα	01	02/2002 - 12/2021
Νέδοντας	01	02/2012 - 01/2014
Τριπόταμα	01	03/2006 - 02/2010
Γλαύκος	02	02/1980 - 08/1989
Αυλάκι	04	10/1980 - 08/2020
Φρ. Ευήνου	04	10/1970 - 09/2020
Φρ. Πλαστήρα	04	02/1980 - 01/2021
Φρ. Κρεμαστών	04	02/1980 - 11/2008
Μεσοχώρα	04	02/1980 - 08/1989
Φρ. Μόρνου	04	01/1980 - 05/2025
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	04	02/1980 - 08/1990
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	04	10/2000 - 08/2010
Γεφ. Κόνιτσας	05	10/1980 - 09/1987
Κλειδωνιά	05	10/1980 - 09/1996

Θέση βαθμονόμησης	ΥΔ	Περίοδος βαθμονόμησης
Φρ. Πηγών Αωού	05	12/1990 - 11/2020
Φρ. Λούρου	05	10/1980 - 09/2017
Κιοτέκι	05	10/1980 - 08/1989
Φρ. Πουρναρίου	05	08/1981 - 11/2000
Βοβούσα	05	11/1980 - 08/2006
Αμπελιά	08	02/2002 - 10/2014
Μουζάκι	08	10/1988 - 08/1995
Πύλη	08	02/1986 - 10/2020
Σμόκοβο	08	07/2002 - 08/2007
Σκοπιά	08	12/1980 - 11/2017
Άνω Δροσίνη	12	05/1996 - 08/2001
Αρκουδόρεμα	12	11/1990 - 06/2011
Δεσπάτης	12	11/1990 - 10/2020
Φονιάς	12	11/1987 - 12/1993
Μπούσδα	12	10/1993 - 09/2021
Τρίκορφο	12	08/1996 - 11/2001
Ξηροπόταμος	12	04/1986 - 06/1993

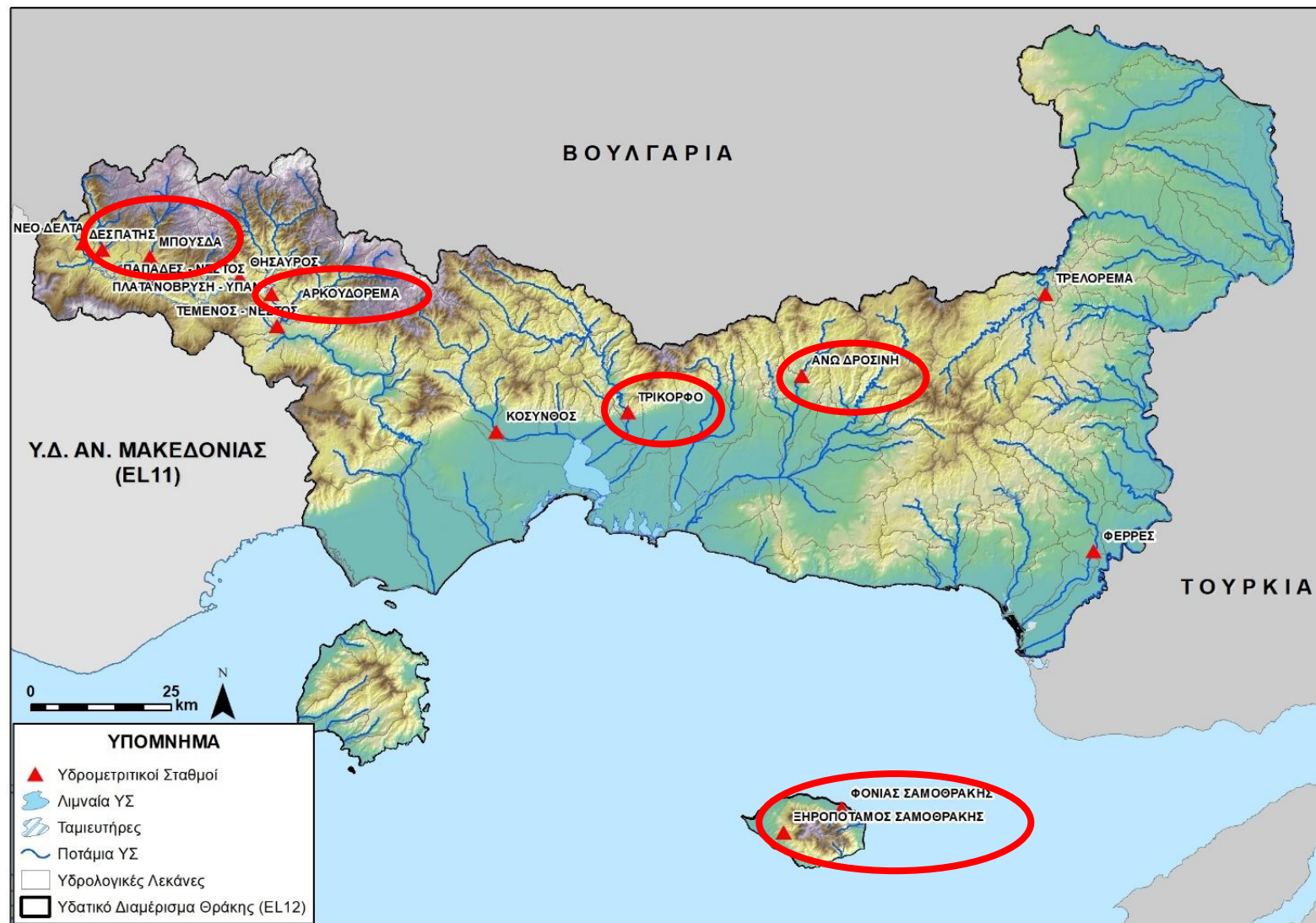
Θέσεις υδρομετρικών σταθμών και λεκανών απορροής

Υδατικά Διαμερίσματα Δυτ. Στερεάς Ελλάδας, Ηπείρου & Θεσσαλίας



Υδατικά Διαμερίσματα Δυτικής & Βόρειας Πελοποννήσου

Θέσεις υδρομετρικών σταθμών στο ΥΔ Θράκης



«Γενικευμένη περιοχοποίηση παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων στην Ελλάδα και ανάλυση υδατικού ισοζυγίου στο πλαίσιο Budyko»

Διπλωματική Εργασία – Λαδά Μαριάννα

Διαδικασία παραμετροποίησης μοντέλων

Άμεση απορροή

Εκδοχή 1^η:

$$Q_{Dt} = v \cdot P_t$$

→ μοντέλα P03 έως P05

$$Q_{Dt} = \max[0, v \cdot (P_t - P_0)]$$

→ μοντέλα P06 έως P09

Εκδοχή 2^η:

$$Q_{Dt} = v \cdot P_t \cdot \exp(S/K - 1)$$

→ μοντέλα P03 έως P05

$$Q_{Dt} = \max[0, v \cdot (P_t - P_0) \cdot \exp(S/K - 1)]$$

→ μοντέλα P06 έως P09

Εξάρτηση ρυθμού άμεσης απορροής από το ποσοστό κορεσμού της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας.

$S/K \rightarrow 1$ (κορεσμός) $\Rightarrow \max Q_{Dt}$

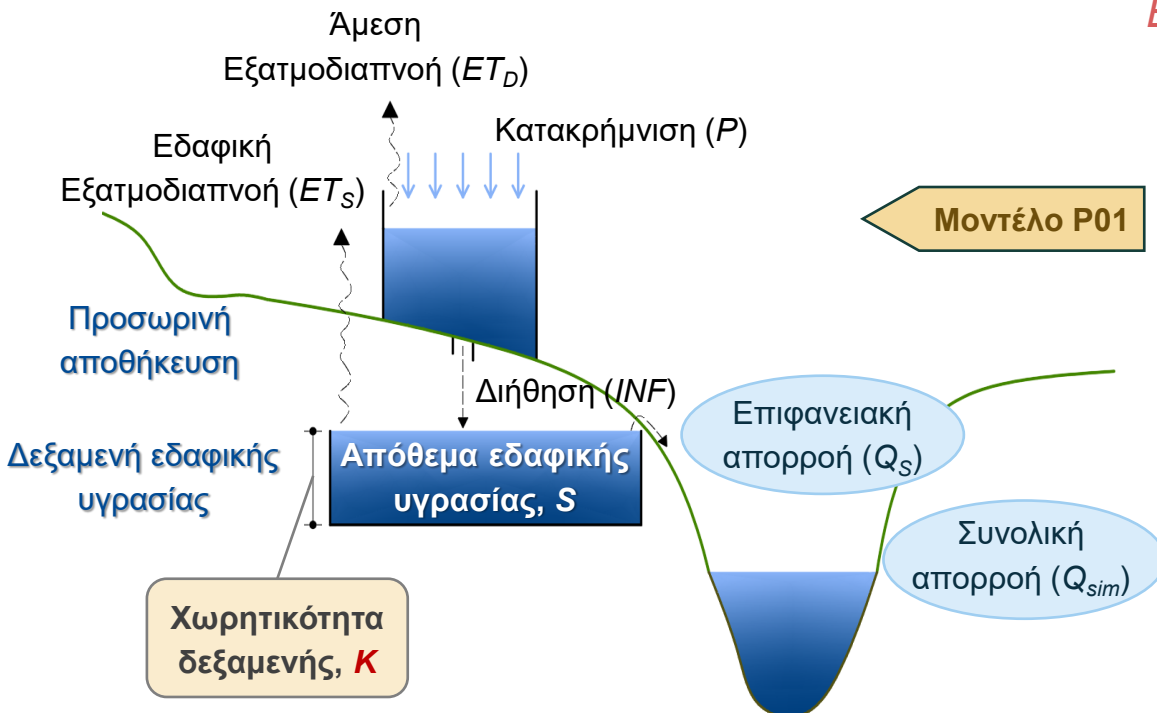
Παράμετροι υδρολογικών μοντέλων:

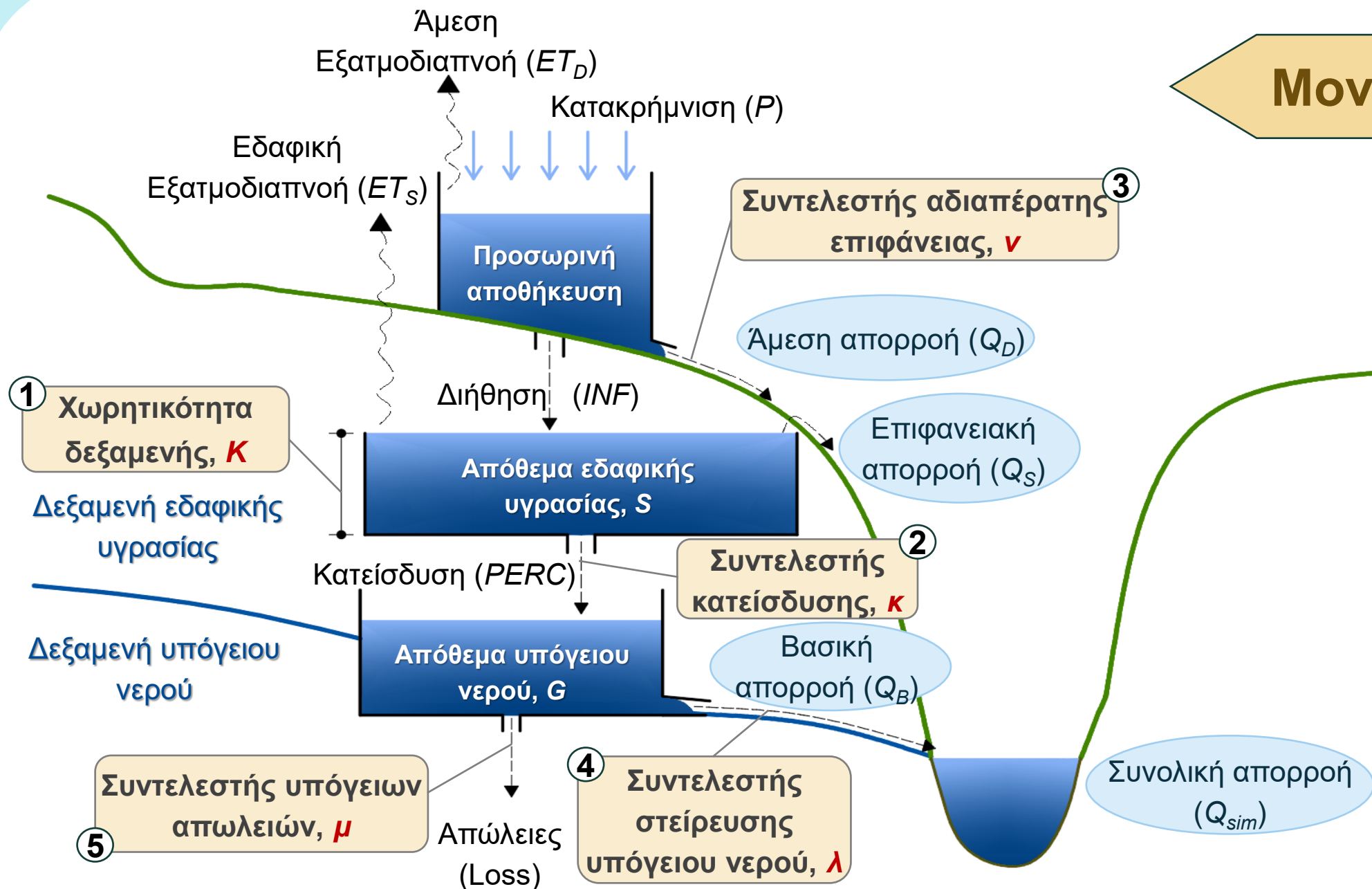
- Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, K (mm)
- Συντελεστής κατείσδυσης, κ
- Συντελεστής αδιαπέρατης επιφάνειας, v
- Συντελεστής στείρευσης υπόγειου νερού, λ
- Συντελεστής υπόγειων διαφυγών, μ
- Κατώφλι βροχόπτωσης για εμφάνιση άμεσης απορροής, P_0 (mm)
- Συντελεστής στείρευσης (υποδερμική ροή), ϕ
- Κατώφλι εμφάνισης υποδερμικής ροής, S_H (mm)
- Μέγιστη επιφανειακή κατακράτηση (φυτοκάλυψη), R (mm)

Εξίσωση
άμεσης
απορροής Q_D

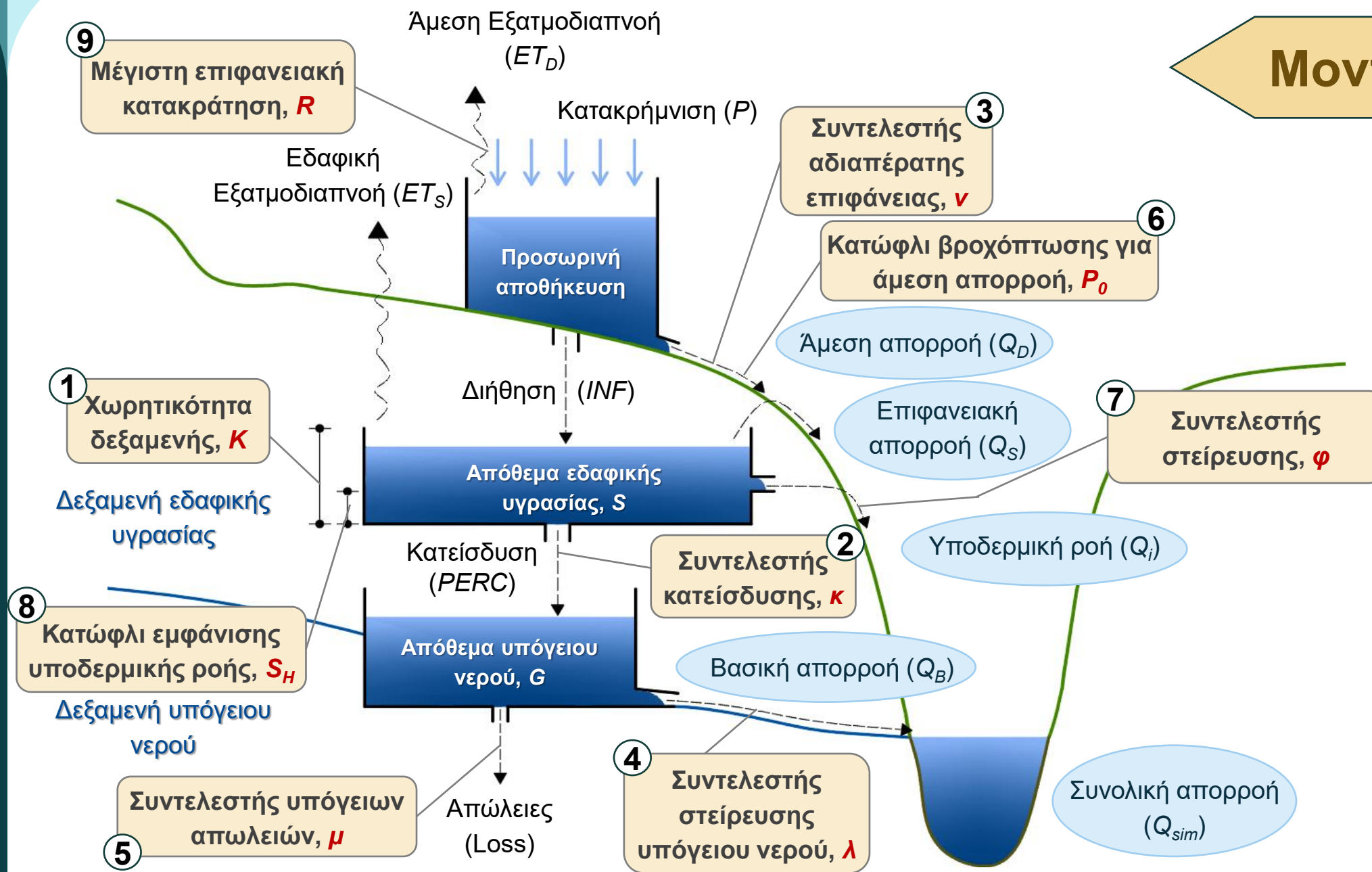
Πλήθος
παραμέτρων

Επιλογή
βέλτιστου
μοντέλου





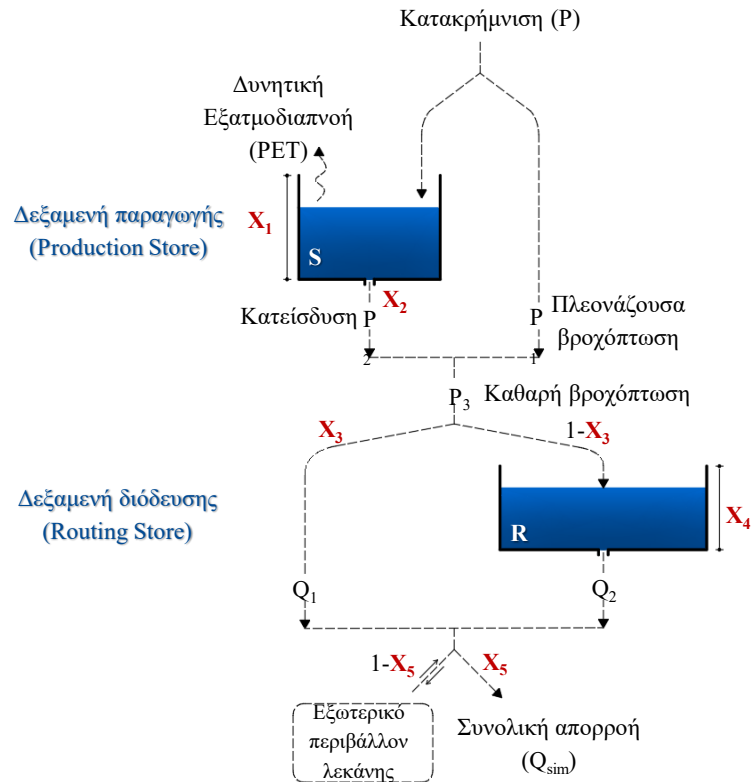
Μοντέλο P09



Σύγκριση με υδρολογικά μοντέλα βιβλιογραφίας

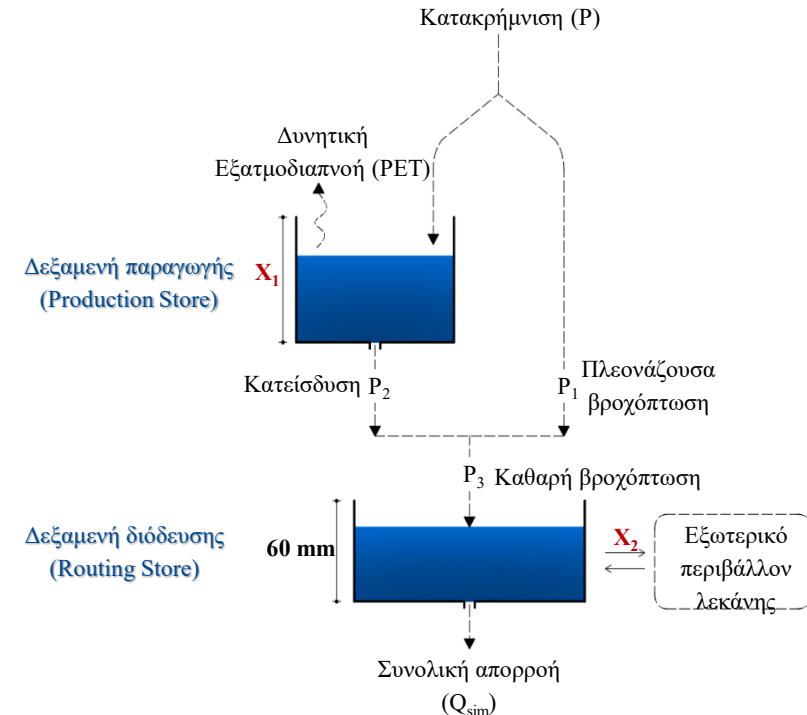
PMS: μοντέλο **πέντε** παραμέτρων [Mouelhi *et al.*, 2006]

- Χωρητικότητα δεξαμενής παραγωγής X_1 (mm)
- Θετικές παράμετροι X_2 και X_5
- Ποσοστό X_3 για παραγωγή απορροής Q_1 ($0 \leq X_3 \leq 1$)
- Χωρητικότητα δεξαμενής διόδευσης X_4 (mm)



GR2M: μοντέλο **δύο** παραμέτρων [Mouelhi *et al.*, 2006]

- Χωρητικότητα δεξαμενής παραγωγής X_1 (mm)
- Συντελεστής ανταλλαγής υπόγειων υδάτων X_2



Oldekop: μοντέλο **καμίας** ελεύθερης παραμέτρου [Oldekop, 1911]

$$Q_t = P_t - PET_t \cdot \tanh\left(\frac{P_t}{PET_t}\right)$$

Κριτήρια επίδοσης και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

1. Αποτελεσματικότητα Nash – Sutcliffe (NSE)
(υψηλές ροές) [Nash & Sutcliffe, 1970]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{obs_t} - Q_{sim_t})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{obs_t} - \mu_{obs})^2}$$

2. Απόδοση Kling – Gupta (KGE)
[Gupta *et al.*, 2009]:

$$KGE = 1 - \sqrt{(\rho - 1)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2}$$

όπου Q_{obs_t} οι παρατηρημένες τιμές απορροής,
 Q_{sim_t} οι προσομοιωμένες τιμές απορροής,
 μ_{obs} & μ_{sim} η μέση τιμή της Q_{obs_t} και Q_{sim_t} ,
 σ_{obs} & σ_{sim} η τυπική απόκλιση της Q_{obs_t} και Q_{sim_t} ,
 ρ ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ Q_{obs_t} και Q_{sim_t}

3. Λογαριθμικός μετασχηματισμός NSE
(χαμηλές ροές):

$$\log NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (\ln(Q_{obs_t}) - \ln(Q_{sim_t}))^2}{\sum_{t=1}^N (\ln(Q_{obs_t}) - \overline{\ln(Q_{obs})})^2}$$

4. Κριτήριο απόλυτων τιμών CR_{abs}
(ενδιάμεσες ροές) [Perrin *et al.*, 2000]:

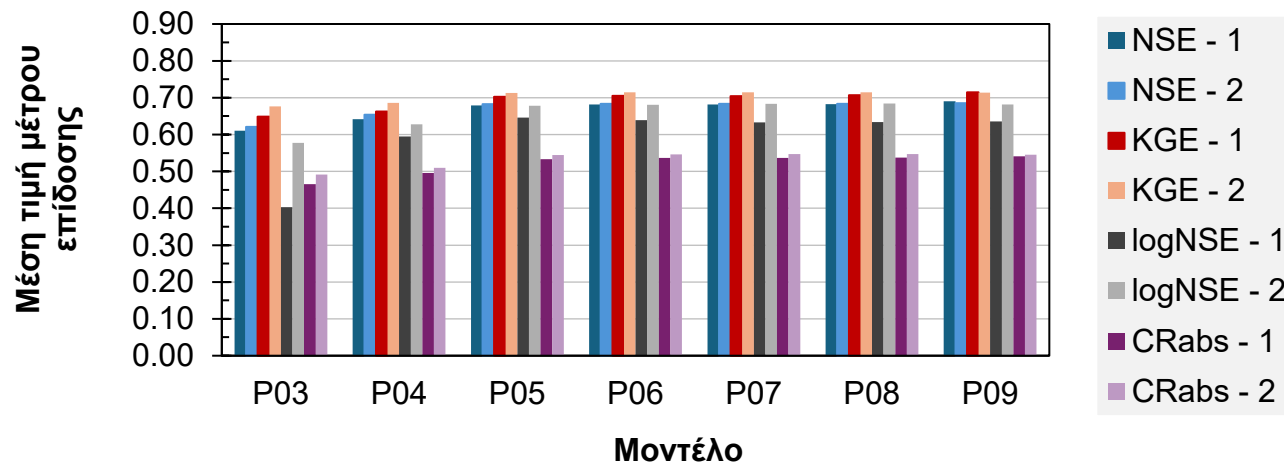
$$CR_{abs} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N |Q_{obs_t} - Q_{sim_t}|}{\sum_{t=1}^N |Q_{obs_t} - \mu_{obs}|}$$

Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης:

- Μοντέλα P01-P09, PMS και γενικευμένο: χρήση εξελικτικής παγκόσμιας βελτιστοποίησης μέσω DEoptim [Mullen *et al.*, 2011].
- Μοντέλο GR2M: χρήση αλγορίθμου ολικής και έπειτα τοπικής βελτιστοποίησης [Michel, 1991] – ενσωματωμένος στο airGR R – package [Coron *et al.*, 2017; Coron *et al.*, 2023].

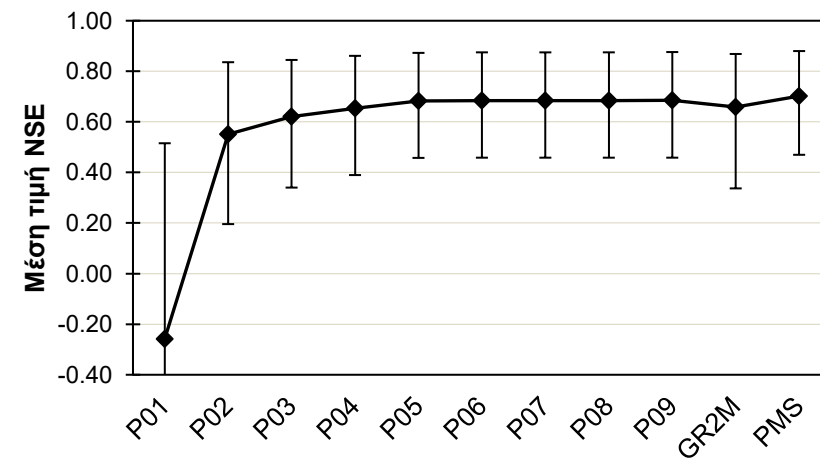
Αξιολόγηση μοντέλων: βαθμονόμηση ανά λεκάνη

- Ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε όλα τα κριτήρια όταν χρησιμοποιείται η εξίσωση της άμεσης απορροής συναρτήσει της χωρητικότητας **K**. Προτιμάται η 2^η εκδοχή.
- Μοντέλο P03**: αύξηση επίδοσης **logNSE** από 0.40 σε 0.58 – αρκετά καλύτερη προσαρμογή στις χαμηλές ροές.



- Μεταξύ των μοντέλων P05 έως P09 δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη βελτίωση των μέτρων επίδοσης παρά την προσθήκη επιπλέον παραμέτρων.
- Επιλέγεται ως καταλληλότερο το **μοντέλο P05**, καθώς πλησιάζει την απόδοση του μοντέλου PMS [Mouelhi *et al.*, 2006], το οποίο έχει ίσο πλήθος παραμέτρων.

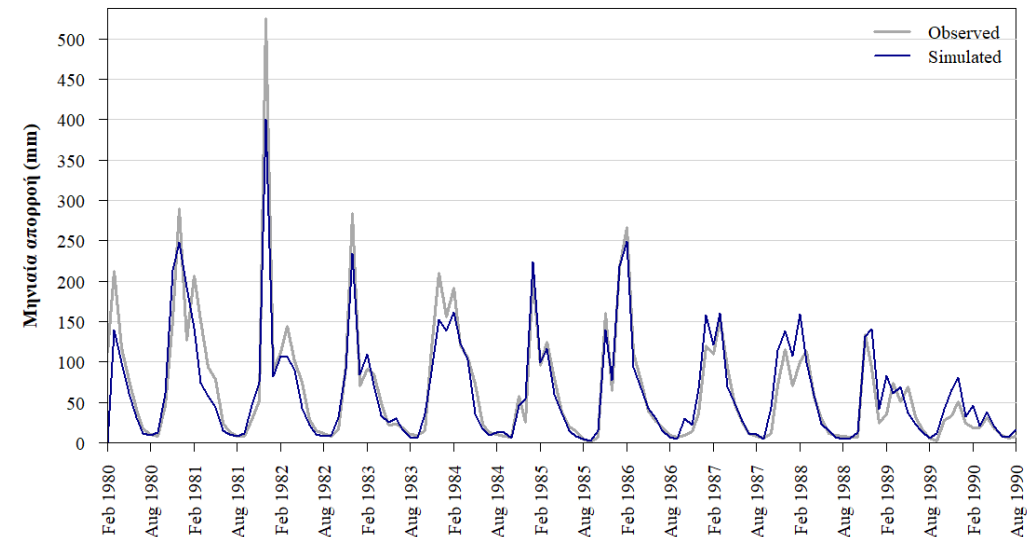
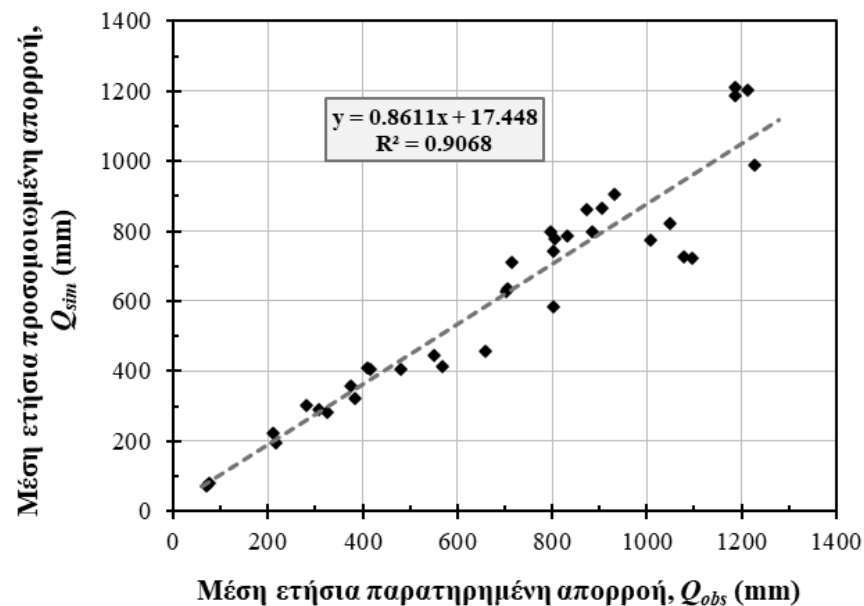
PMS	0.702	0.758	0.653	0.55
GR2M	0.659	0.743	0.563	0.522
P09	0.685	0.713	0.682	0.546
P08	0.684	0.715	0.684	0.547
P07	0.684	0.715	0.683	0.547
P06	0.683	0.715	0.681	0.546
P05	0.682	0.713	0.678	0.544
P04	0.654	0.686	0.628	0.51
P03	0.621	0.676	0.577	0.492
P02	0.552	0.629	0.161	0.448
P01	-0.258	0.326	-2.644	0.059
Ol'dekop	-2.603	-0.064	-7.091	-0.317
	NSE	KGE	logNSE	CRabs



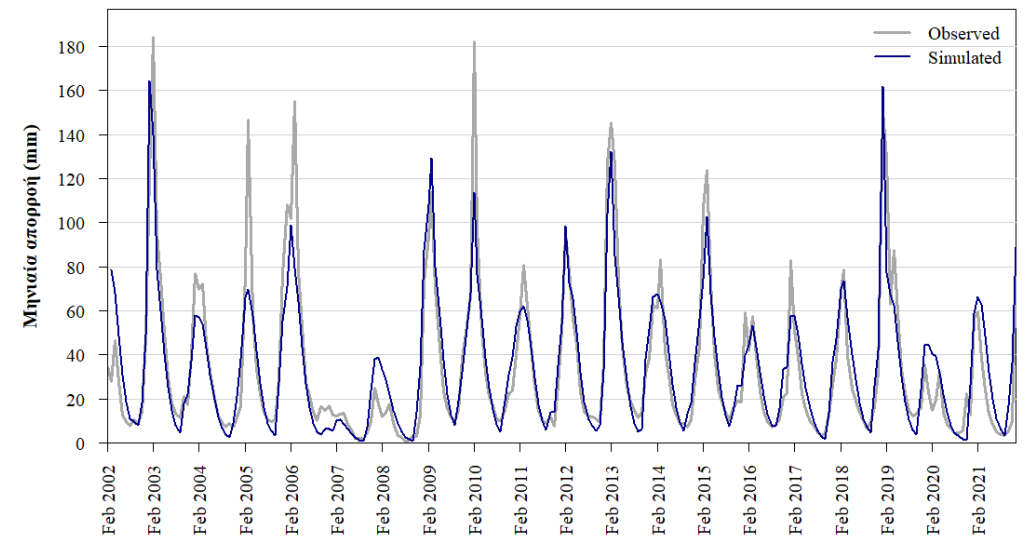
Σχήμα: Μέση τιμή NSE και 0.1-0.9 εκατοστημόρια.

Ανάλυση επιλεγμένου μοντέλου P05

- Το μοντέλο P05 παρουσιάζει ικανοποιητική **προσαρμογή** στις **διακυμάνσεις** της μηνιαίας απορροής.
- Υψηλή συσχέτιση ($R^2 = 0.91$) μεταξύ μέσων ετήσιων προσομοιωμένων και παρατηρημένων απορροών.



Σχήματα: Σύγκριση παρατηρημένης & προσομοιωμένης απορροής στον υδρομετρικό σταθμό **Πόρο Ρηγανίου** - πριν την κατασκευή του φράγματος του **Ευήνου** (πάνω) και στο **φράγμα Λάδωνα** (κάτω).



Περιοχοποίηση βάσει χωρικής εγγύτητας (Μόρνος ↔ Εύηνος)

- **Περιοχοποίηση παραμέτρων:** μεθοδολογική προσέγγιση μεταφοράς των παραμέτρων λεκανών απορροής με διαθέσιμα δεδομένα σε αυτές με ελλιπή υδρομετρικά δεδομένα.

Κλασικές μέθοδοι: (α) παλινδρόμηση, (β) χωρική εγγύτητα και (γ) φυσική ομοιότητα

➡ Σύγκριση λεκανών απορροής ως προς τα φυσιογραφικά και υδροκλιματικά χαρακτηριστικά τους.

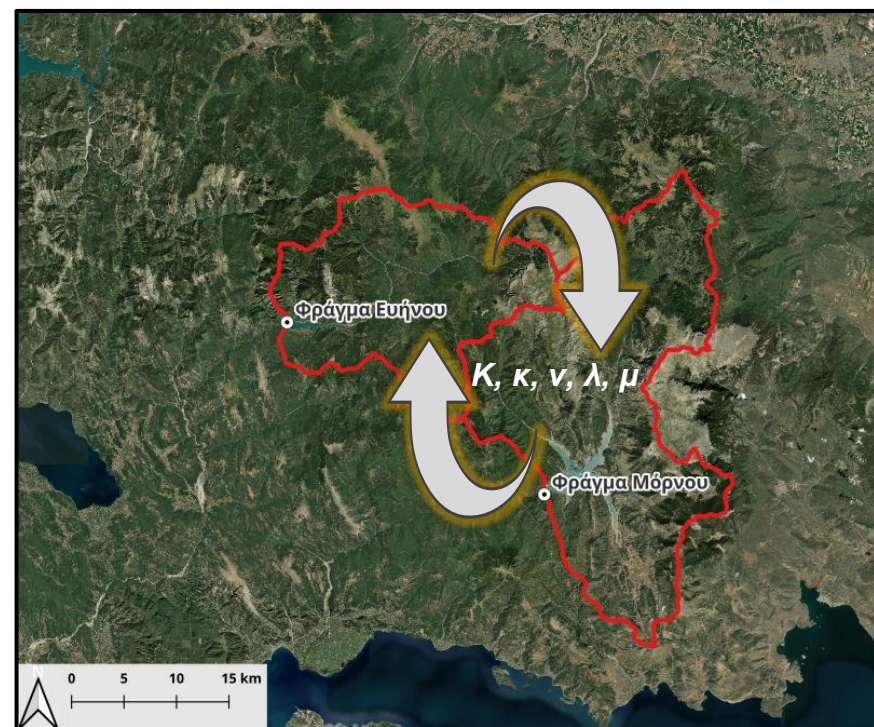
Χωρική εγγύτητα λεκανών απορροής

- Δοκιμή ανταλλαγής **βέλτιστων παραμέτρων** του μοντέλου P05:
Φράγμα Μόρνου ↔ Φράγμα Ευήνου
- **Υπόθεση:** γειτονικές λεκάνες παρουσιάζουν παρόμοια υδρολογική συμπεριφορά.
- **Αποτέλεσμα:**

Μόρνος → **Εύηνος**: $NSE = 0.40$ έναντι $NSE = 0.79$ μέσω τοπικής βαθμονόμησης.

Εύηνος → **Μόρνος**: $NSE = -0.81$ έναντι $NSE = 0.74$.

➡ Απόδοση **χαμηλή**, υποδηλώνει αρκετά περιορισμένη ικανότητα περιοχοποίησης των παραμέτρων.

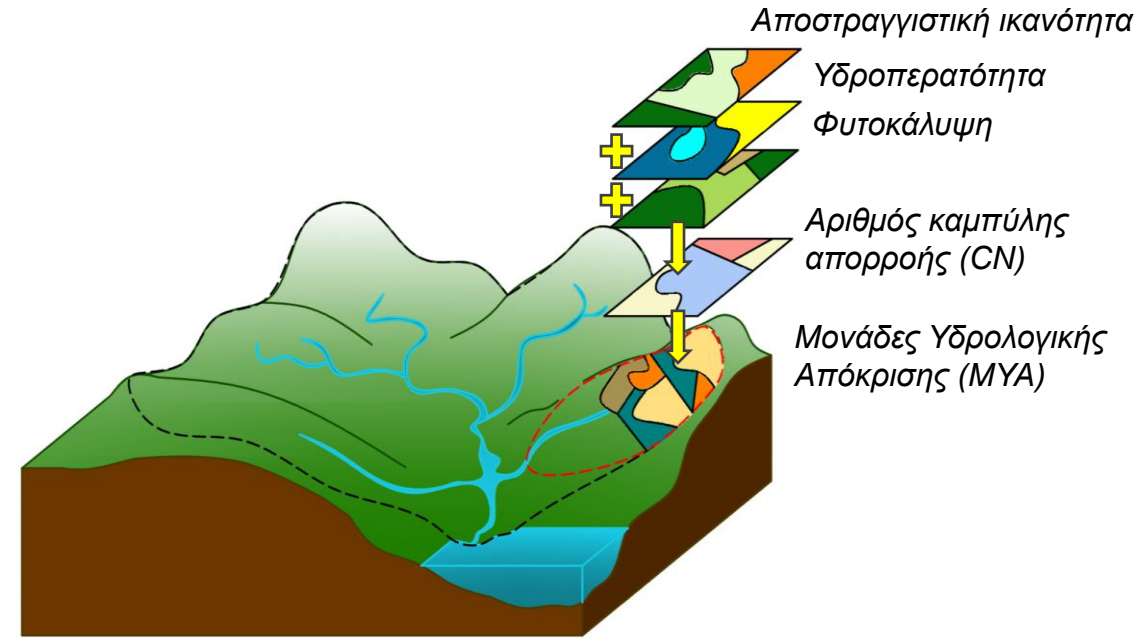


Πλαίσιο περιοχοποίησης παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων

■ Μονάδα Υδρολογικής Απόκρισης (ΜΥΑ/HRUs):

- ➔ Διαχωρισμός εδαφικών τύπων μιας λεκάνης απορροής με **ομοιογενή** υδρολογικά, φυσιογραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.
- ➔ Καθορισμός 4 ΜΥΑ με αντιστοίχιση σε εύρη τιμών του αριθμού καμπύλης απορροής (CN).

ΜΥΑ	Τιμές CN	Παραγωγή απορροής
ΜΥΑ 1	28 – 50	Πολύ χαμηλή έως αμελητέα
ΜΥΑ 2	50 – 60	Σχετικά χαμηλή
ΜΥΑ 3	60 – 75	Μέτρια έως υψηλή
ΜΥΑ 4	75 – 100	Υψηλή έως πολύ υψηλή



■ Εναλλακτική προσέγγιση περιοχοποίησης σε επίπεδο ΜΥΑ:

Έστω ότι επιλέγεται υδρολογικό μοντέλο m παραμέτρων και οι λεκάνες απορροής περιγράφονται από n κλάσεις ΜΥΑ, τότε ο συνολικός αριθμός παραμέτρων του γενικευμένου μοντέλου είναι:

$$N = m \times n$$

Περιοχοποίηση παραμέτρων μοντέλου P05

▮ Βασιζόμενοι στις 4 μονάδες υδρολογικής απόκρισης και το μοντέλο P05 → $4 \times 5 = 20$ **παραμέτροι**

▮ Κοινές χρονοσειρές εισόδου (**P**, **PET**)

▮ Διαφοροποίηση τιμών παραμέτρων ανά ΜΥΑ, ώστε το συνολικό ύψος απορροής να είναι ίσο με:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^4 Q_i A_i}{\sum_{i=1}^4 A_i} = w_1 \cdot Q_1 + w_2 \cdot Q_2 + w_3 \cdot Q_3 + w_4 \cdot Q_4$$

όπου w_i είναι το ποσοστό συμμετοχής της λεκάνης απορροής στη ΜΥΑ, i .

Στοχική συνάρτηση:

- **Μέτρο επίδοσης** που αξιολογεί την προσαρμογή του μοντέλου σε διαφορετικές πτυχές της απορροής:

$$F = (NSE + KGE + \log NSE)/3$$

- **Όρος ποινής για Q_i** , που διασφαλίζει φυσική συνέπεια: μεγαλύτερες τιμές **CN** αντιστοιχούν σε υψηλότερη συνιστώσα απορροής:

$$Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4$$

όπου Q_i το παραγόμενο ύψος απορροής στη ΜΥΑ, i .

- **Όρος ποινής για K_i** , ώστε όσο ξηρότερη η ΜΥΑ (μικρότερος **CN**), τόσο μεγαλύτερη η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας:

$$K_1 > K_2 > K_3 > K_4$$

όπου K_i η χωρητικότητα της ΜΥΑ, i .

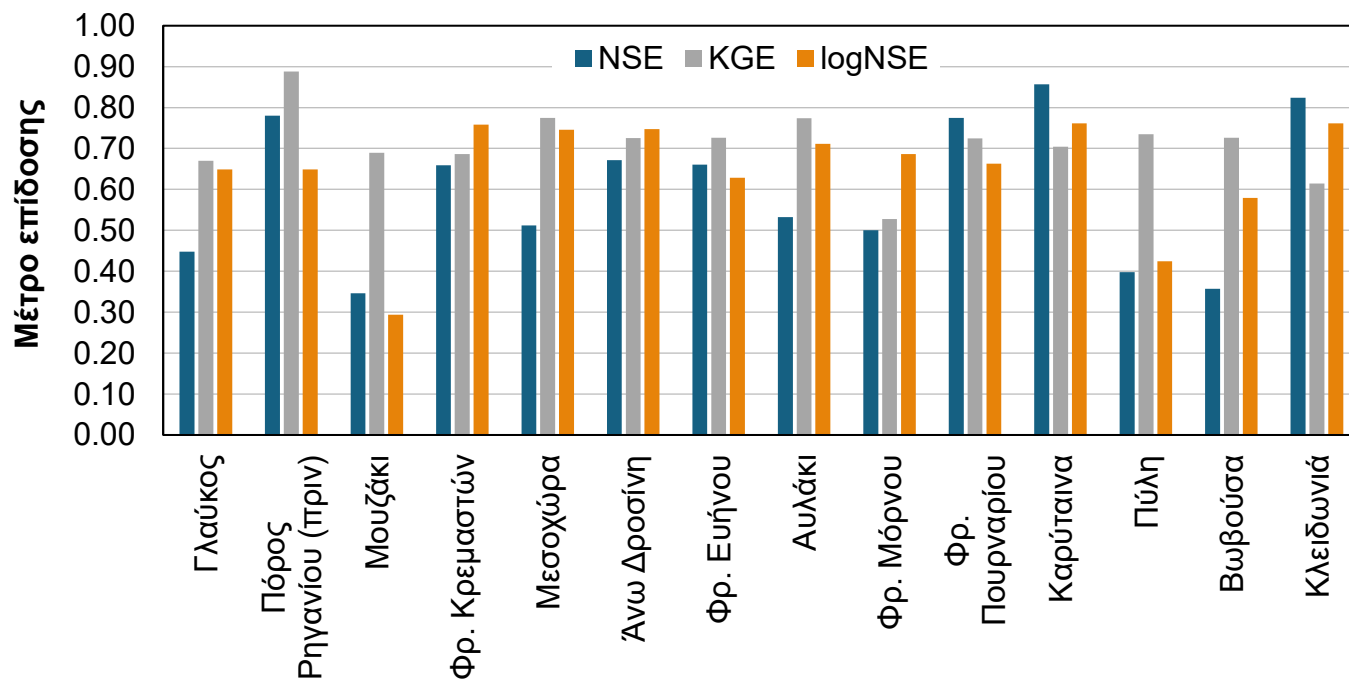
Βελτιστοποιημένες παράμετροι και μέτρα επίδοσης

- Βαθμονόμηση σε 14 λεκάνες απορροής με αξιόπιστα δεδομένα.

- Μέση τιμή μέτρων επίδοσης:

$NSE = 0.59$, $\log NSE = 0.65$,
 $KGE = 0.71$, $CR_{abs} = 0.49$.

Στοχική συνάρτηση: **F = 0.65**



Πίνακες: Βελτιστοποιημένες παράμετροι μοντέλου για κάθε ΜΥΑ και μέτρα επίδοσης ανά θέση βαθμονόμησης.

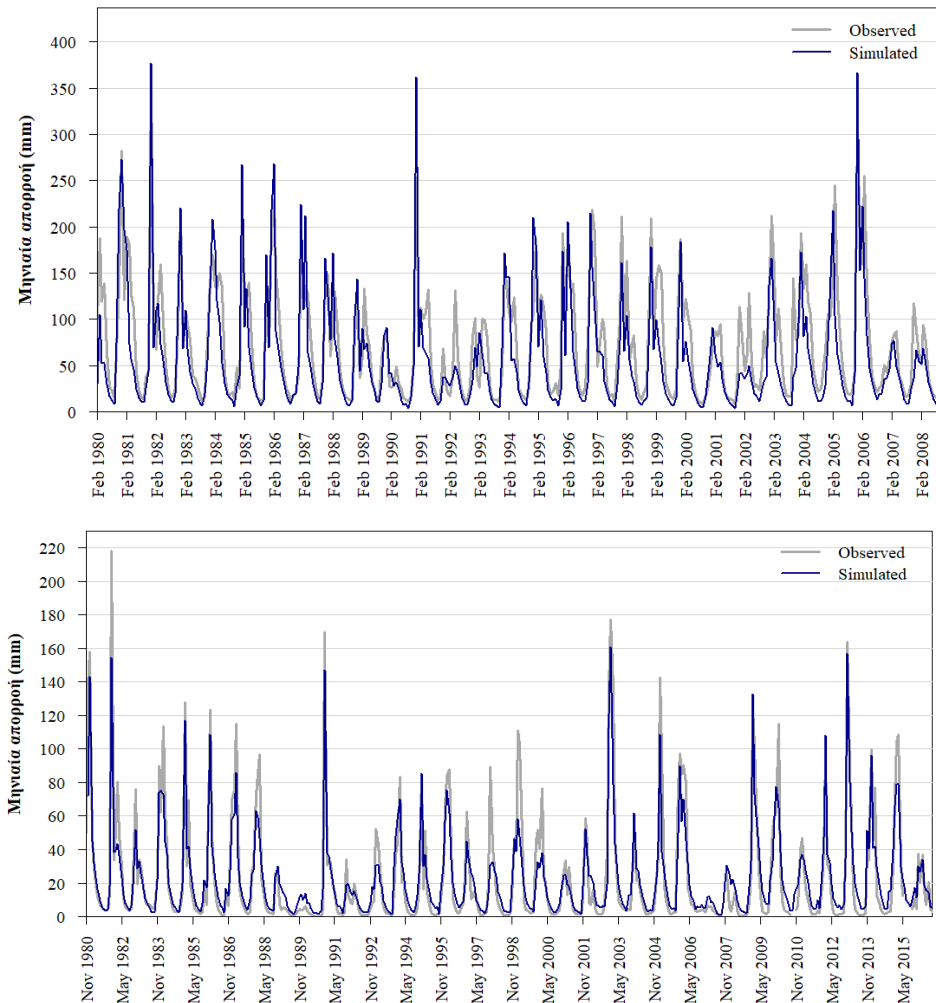
Παράμετρος	ΜΥΑ 1	ΜΥΑ 2	ΜΥΑ 3	ΜΥΑ 4
K (mm)	233.2	138.3	127.3	118.8
ν	0.073	0.099	0.178	0.249
κ	0.357	0.326	0.325	0.331
λ	0.010	0.347	0.350	0.375
μ	0.152	0.116	0.060	0.010



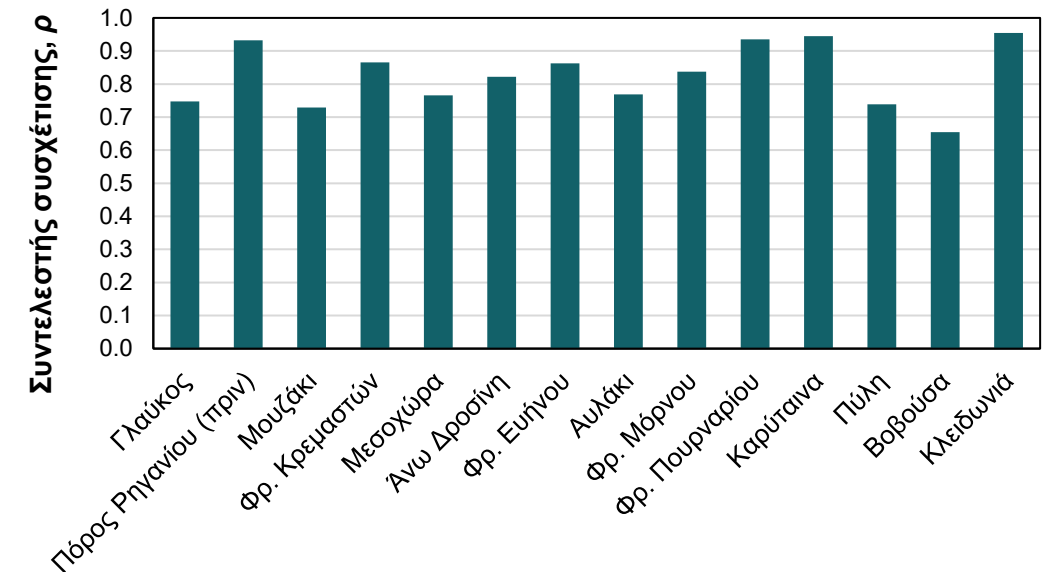
Χωρική εγγύτητα < ΜΥΑ < Τοπική βαθμονόμηση

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.45	0.67	0.65	0.42
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.78	0.89	0.65	0.63
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.35	0.69	0.29	0.40
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.66	0.69	0.76	0.50
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.51	0.77	0.75	0.45
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.67	0.73	0.75	0.53
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.66	0.73	0.63	0.53
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.53	0.77	0.71	0.44
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.50	0.53	0.69	0.38
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.77	0.72	0.66	0.56
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.86	0.70	0.76	0.67
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.40	0.74	0.42	0.43
Βωβούσα	11/1980 - 08/2006	0.36	0.73	0.58	0.40
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.82	0.61	0.76	0.57

Ικανότητα προσαρμογής μοντέλου στις θέσεις βαθμονόμησης



- Ικανοποιητική αναπαραγωγή διακυμάνσεων.
- **Υψηλή συσχέτιση** μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης μηνιαίας απορροής.



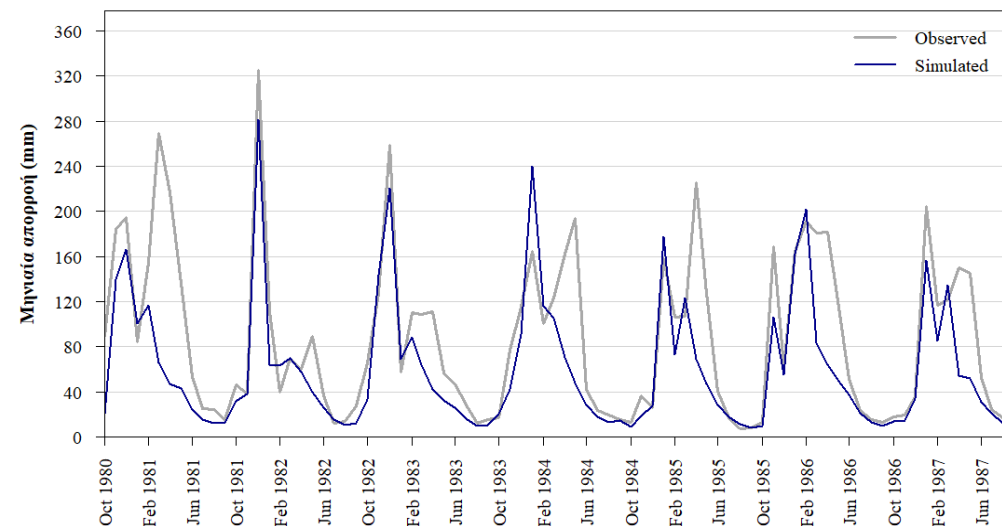
Σχήματα: Σύγκριση παρατηρημένης & προσομοιωμένης απορροής στο **φράγμα Κρεμαστών** (πάνω) και στον υδρομετρικό σταθμό **Καρύταινας** (κάτω).

Εφαρμογή περιοχοποιημένων παραμέτρων στις θέσεις επαλήθευσης

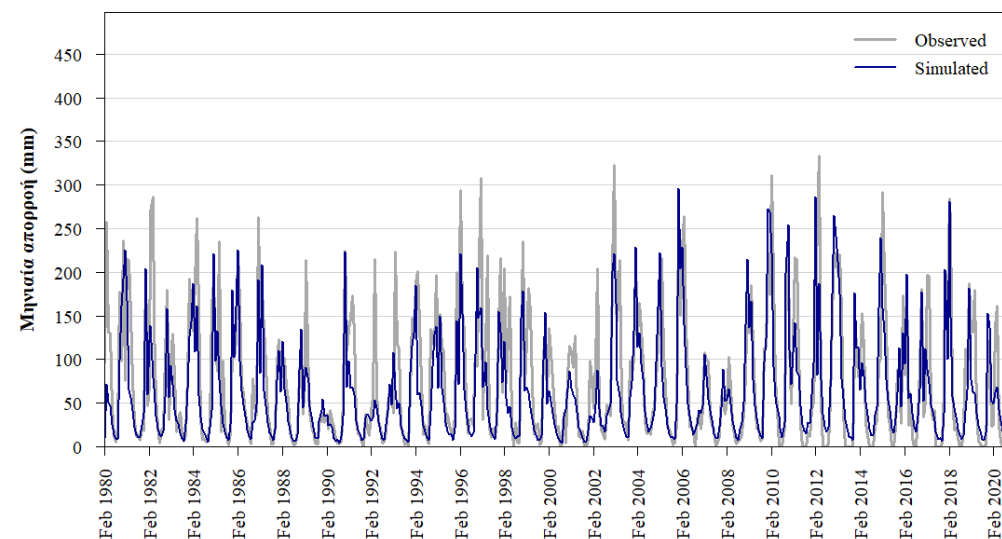
- Επαλήθευση στις υπόλοιπες **21 θέσεις**.
- **Μέση τιμή** κριτηρίου KGE = 0.34.
- Υψηλός συντελεστής συσχέτισης ρ .

Θέση επαλήθευσης	Περίοδος επαλήθευσης	NSE	KGE	Correl, ρ
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.53	0.52	0.893
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.32	0.51	0.783
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.41	0.71	0.804
Γεφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	-0.17	0.41	0.798
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.47	0.45	0.813
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.51	0.50	0.946
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.51	0.64	0.740
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.74	0.71	0.878
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.47	0.57	0.784
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	-2.97	-0.95	0.745
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	-3.33	-1.08	0.591
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.20	0.28	0.849
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.17	0.22	0.749
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.46	0.49	0.855
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	-0.04	0.32	0.630
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.44	0.52	0.645
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.42	0.38	0.598
Φρ. Πηγών Αωού	12/1990 - 11/2020	0.45	0.45	0.870
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	-0.17	0.45	0.429
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.63	0.57	0.664
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.52	0.47	0.798

Πίνακας: Μέτρα επίδοσης NSE και KGE και συντελεστής συσχέτισης μεταξύ Q_{obs} & Q_{sim} κατά την περίοδο επαλήθευσης του μοντέλου.



Σχήματα: Σύγκριση παρατηρημένης & προσομοιωμένης απορροής στον υδρομετρικό σταθμό **Γεφ. Κόνιτσας** (πάνω) και στο φράγμα **Πλαστήρα** (κάτω).



Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Πλαίσιο Budyko (1)

Υπόθεση Budyko: τα μακροπρόθεσμα (δεδομένα ≥ 10 ετών) ισοζύγια νερού και ενέργειας στην επιφάνεια της Γης εξαρτώνται από τον δείκτη ξηρότητας $\varphi = \frac{PET}{P}$

Κλασική
αναπαράσταση

$$ET/P = f(PET/P)$$

Υδατικό όριο:	$E \leq P$
Ενεργειακό όριο:	$E \leq PET$

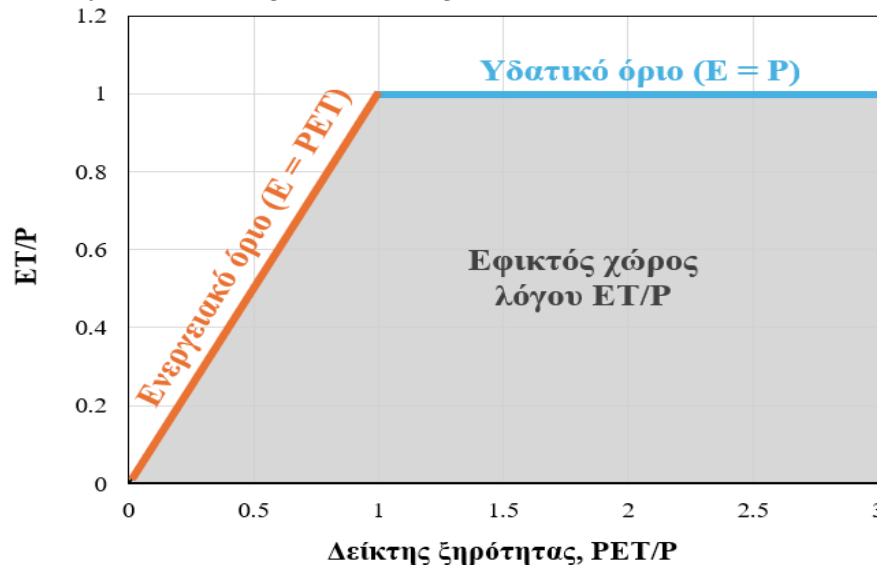
Αναπαράσταση
κατά Andréassian &
Perrin (2012)

$$Q/P = f(PET/P)$$

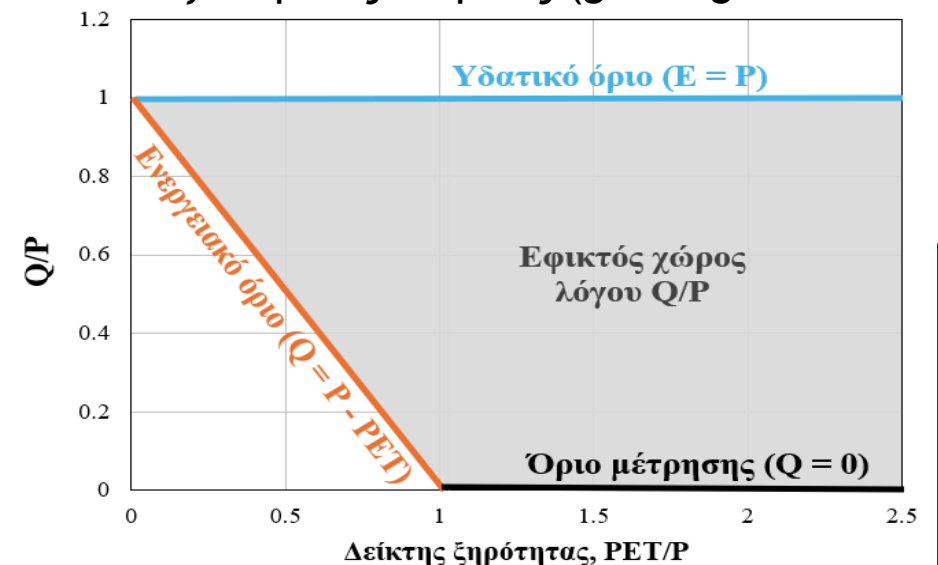
Υδατικό όριο:	$Q \leq P$
Ενεργειακό όριο:	$Q \geq P - PET$
Όριο μέτρησης:	$Q \geq 0$

$$P = ET + Q + \Delta S$$

– Αδυναμία στην αναπαράσταση λεκανών με εξωτερικές εισροές, όπου $Q > P \rightarrow ET/P < 0$



+ Αναπαράσταση λεκανών απορροής με εξωτερικές εισροές (*gaining catchments*)



Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Πλαίσιο Budyko (2)

Schreiber [1904]: $\frac{ET}{P} = 1 - e^{-\frac{k}{P}}$

Oldekop [1911]: $\frac{ET}{P} = \varphi \cdot \tanh\left(\frac{1}{\varphi}\right)$

Budyko [1974]: $\frac{ET}{P} = \left(\varphi \cdot \tanh\left(\frac{1}{\varphi}\right) \cdot (1 - e^{-\varphi}) \right)^{0.5}$

Παραμετρικές σχέσεις

Turc – Mezentsev (TM): $\frac{ET}{P} = \left(1 + \left(\frac{PET}{P} \right)^{-n} \right)^{-\frac{1}{n}}, n > 0$

Tixeront – Fu (TF): $\frac{ET}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - \left(1 + \left(\frac{PET}{P} \right)^m \right)^{\frac{1}{m}}, m > 1$

όπου $\varphi = PET/P$: δείκτης ξηρότητας.

Η TM προσεγγίζει τις κλασικές καμπύλες Budyko για τις αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου n :

Oldekop: $n = 2.6$,
Schreiber: $n = 1.5$,
Budyko: $n = 1.9$.

i Οι παραμετρικές εξισώσεις TM και TF παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα για $m \approx n + 0.72$.

↑ n → ↓ υδατικός περιορισμός

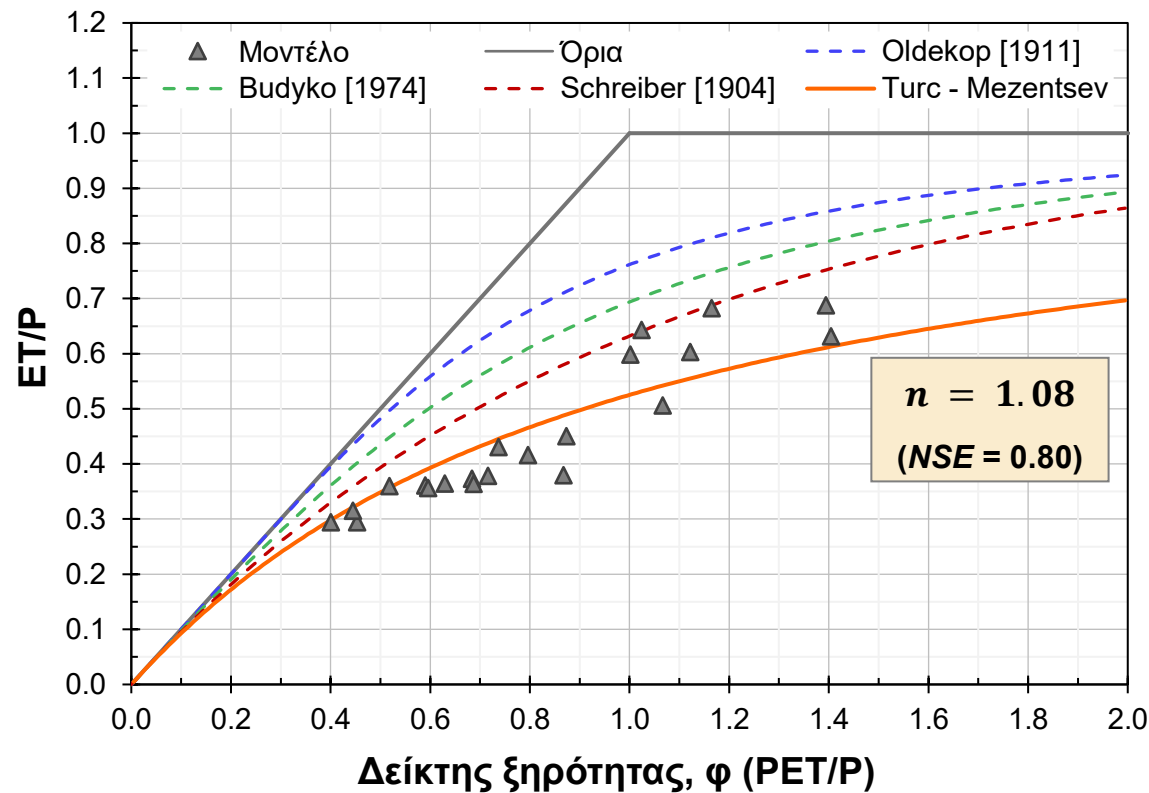
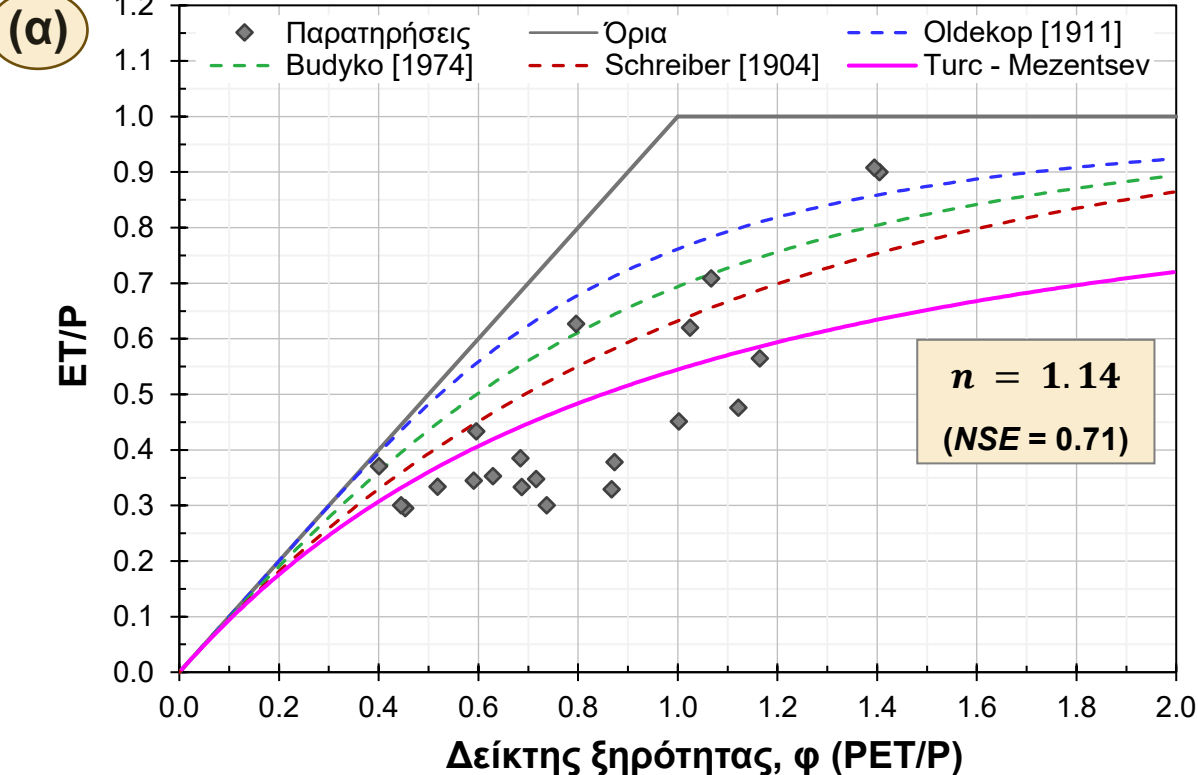
Ανάλυση υδατικού ισοζυγίου στο πλαίσιο *Budyko*

- Στόχοι:** 1) Σύγκριση της υδρολογικής συμπεριφοράς των ελληνικών λεκανών απορροής με τις εμπειρικές καμπύλες Budyko, Oldekop και Schreiber.
- 2) Σύγκριση μεταξύ των (α) παρατηρημένων και (β) προσομοιωμένων δεδομένων.

Λεκάνες απορροής με δεδομένα P, PET και Q_{obs} **τουλάχιστον 10 ετών.**

📌 Προσαρμογή της παραμετρικής καμπύλης Turc – Mezentsev (TM) με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του δείκτη *NSE*.

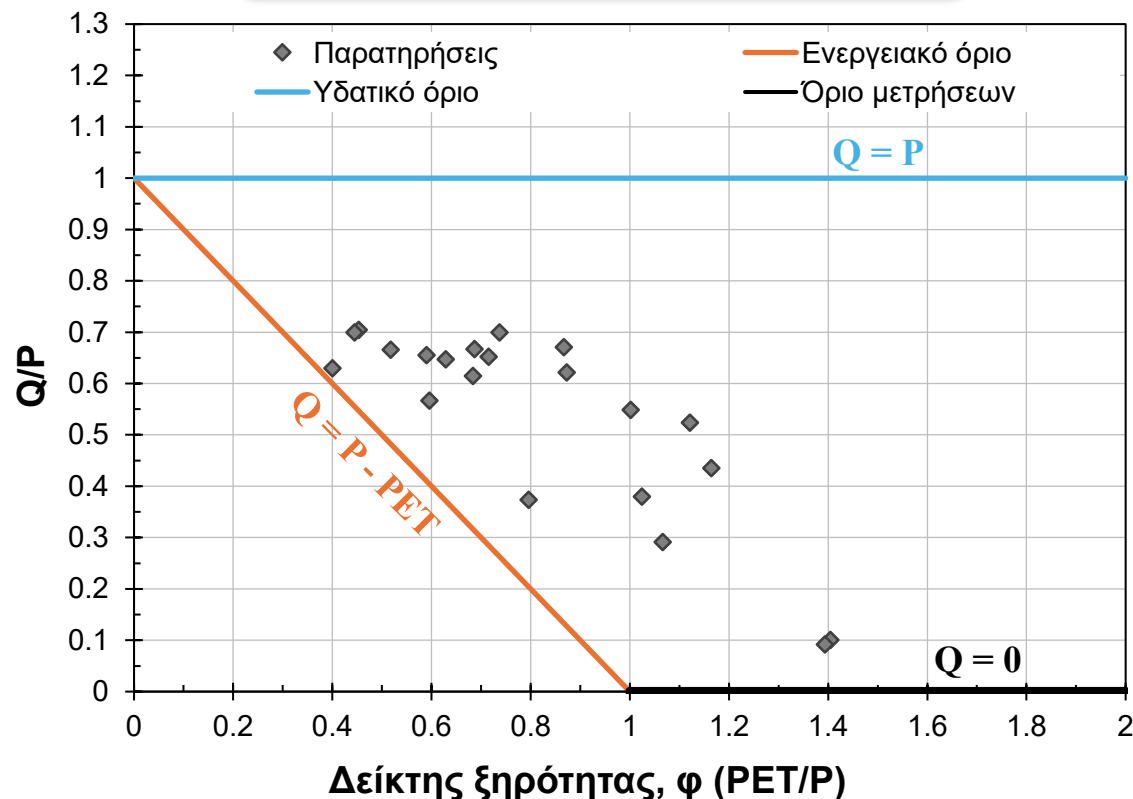
⚠️ Οι λεκάνες απορροής της μελέτης εμφανίζουν **μεγαλύτερο** υδατικό περιορισμό.



Εναλλακτική αναπαράσταση υπόθεσης *Budyko*

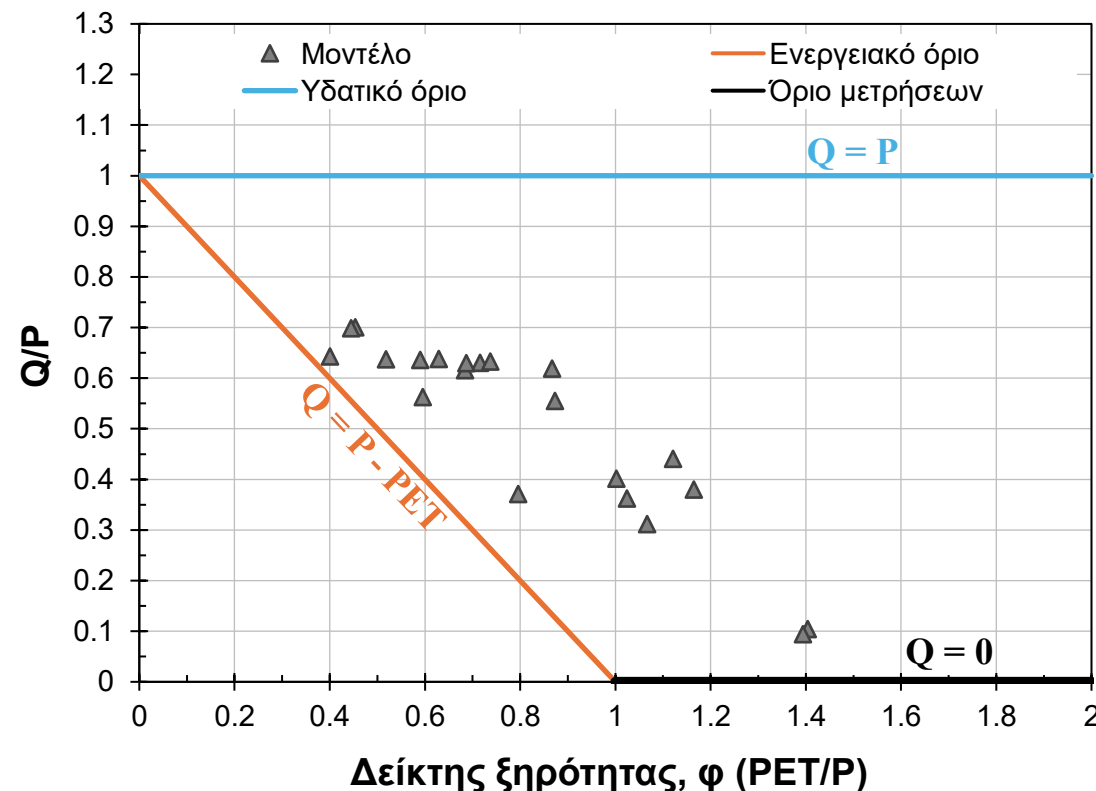
1^η Ανάλυση:

Παρατηρημένα δεδομένα



2^η Ανάλυση:

Προσομοιωμένα δεδομένα (P05)



- Σε ξηρότερες λεκάνες ($\phi \uparrow$) $\rightarrow$ η μέση ετήσια απορροή μειώνεται.
- Σύγκριση μεταξύ των δύο αναλύσεων: το μοντέλο P05 προσομοιώνει καλά την υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών.

«Γενικευμένη περιοχοποίηση παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων στην Ελλάδα και ανάλυση υδατικού ισοζυγίου στο πλαίσιο *Budyko*»

Διπλωματική Εργασία – Λαδά Μαριάννα

Συμπεράσματα

- Η επίδοση των υδρολογικών μοντέλων **σταθεροποιείται μετά τις ~5 παραμέτρους**, υποδεικνύοντας ότι η αύξηση της πολυπλοκότητας δεν βελτιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα.
- Η ενιαία βαθμονόμηση 20 παραμέτρων προσφέρει **συνεκτική και φυσικά ρεαλιστική αναπαράσταση** της υδρολογικής συμπεριφοράς, παρά τη μείωση της επίδοσης λόγω της γενίκευσης.

KGE	Θέσεις βαθμονόμησης	Θέσεις επαλήθευσης
Γενικευμένο μοντέλο	0.71	0.34
P05	0.78	0.67

- **Μόρνος - Εύηνος:** Χωρική εγγύτητα < MYA < Τοπική βαθμονόμηση
- Στο πλαίσιο Budyko, οι λεκάνες απορροής εμφανίζουν **μεγαλύτερο υδατικό περιορισμό** σε σχέση με τις εμπειρικές καμπύλες Budyko.
- Οι τιμές της παραμέτρου n της καμπύλης Turc – Mezentsev είναι χαμηλότερες από τις κλασικές καμπύλες Budyko, υποδεικνύοντας:
 - ✓ Επικράτηση ξηρών περιόδων και
 - ✓ Υψηλή υδροκλιματική μεταβλητότητα.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα



- Εφαρμογή **στοχαστικών μεθόδων βαθμονόμησης** για βελτίωση της εκτίμησης παραμέτρων, ιδιαίτερα με περιορισμένα ιστορικά δεδομένα.
- Χρήση συνθετικών χρονοσειρών για αναπαράσταση ακραίων γεγονότων **και βαθμονόμηση σε όλες τις λεκάνες**, με **επαλήθευση σε ιστορικά δεδομένα**.
- Δοκιμή περιοχοποίησης παραμέτρων σε **μοντέλο πιο απλής δομής** και σύγκριση με το μοντέλο P05.
- Εφαρμογή της αρχής των υδρολογικά ομοειδών λεκανών στο πλαίσιο Budyko.
- Διερεύνηση της **μηνιαίας εποχιακής διασποράς των υδρολογικών μεταβλητών** για καλύτερη κατανόηση της επίδρασης του ξηρού κλίματος στην Ελλάδα και της άνισης κατανομής της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια του έτους.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



**Σας ευχαριστώ πολύ για
την προσοχή σας!**



«Γενικευμένη περιοχοποίηση παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων στην Ελλάδα και ανάλυση υδατικού ισοζυγίου στο πλαίσιο Budgko»

Διπλωματική Εργασία – Λαδά Μαριάννα

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2025