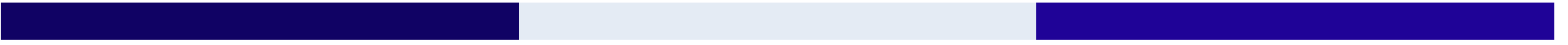


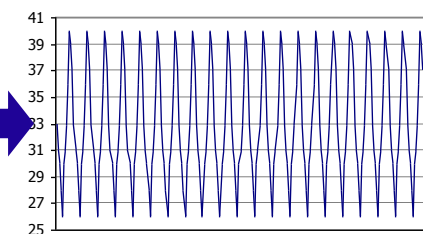
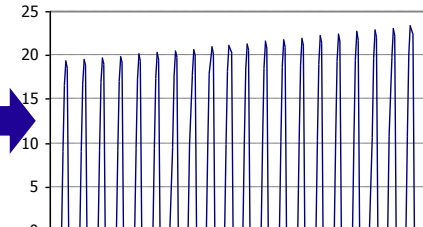
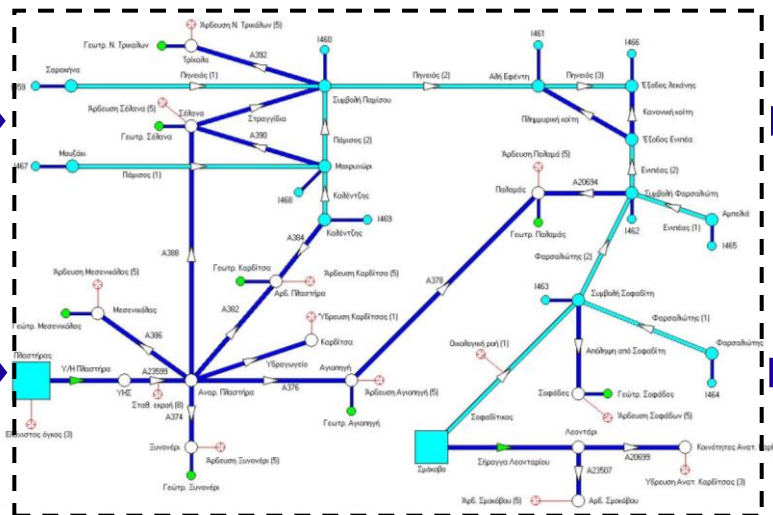
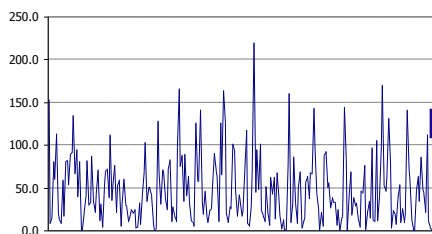
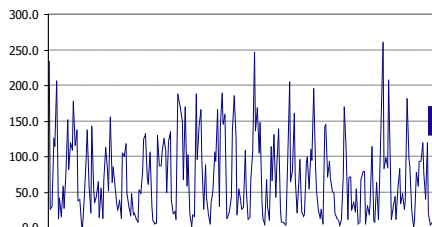
Σημειώσεις στο πλαίσιο του μαθήματος
«Διαχείριση Υδατικών Πόρων»



Υδατικοί πόροι και έργα αξιοποίησης

Ανδρέας Ευστρατιάδης & Δημήτρης Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Η έννοια της προσφοράς και ζήτησης νερού στη διαχείριση υδατικών πόρων



Προσφορά νερού
(υδατικοί πόροι, μη προβλέψιμη εξέλιξη της μεσο-μακροπρόθεσμης διαθεσιμότητας νερού)

Σύστημα έργων χωροχρονικής ρύθμισης των υδατικών πόρων
(μερική εξομάλυνση των φυσικών διακυμάνσεων) που διέπονται από πληθώρα περιορισμών

Ζήτηση νερού
(επαρκώς προβλέψιμη μόνο σε βραχύ χρονικό ορίζοντα), υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας

Παραδοσιακή θεώρηση: Διαχείριση προσφοράς νερού (νέα έργα, μεγάλης κλίμακας)
Σύγχρονη θεώρηση: Διαχείριση ζήτησης νερού (εξοικονόμηση, έργα μικρής κλίμακας)

Έργα ανάπτυξης και αξιοποίησης υδατικών πόρων

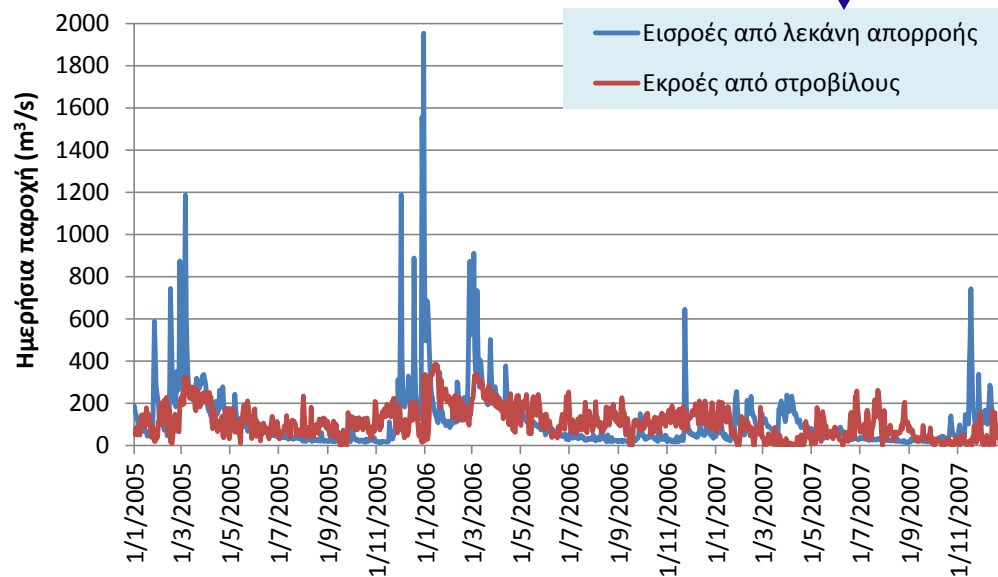
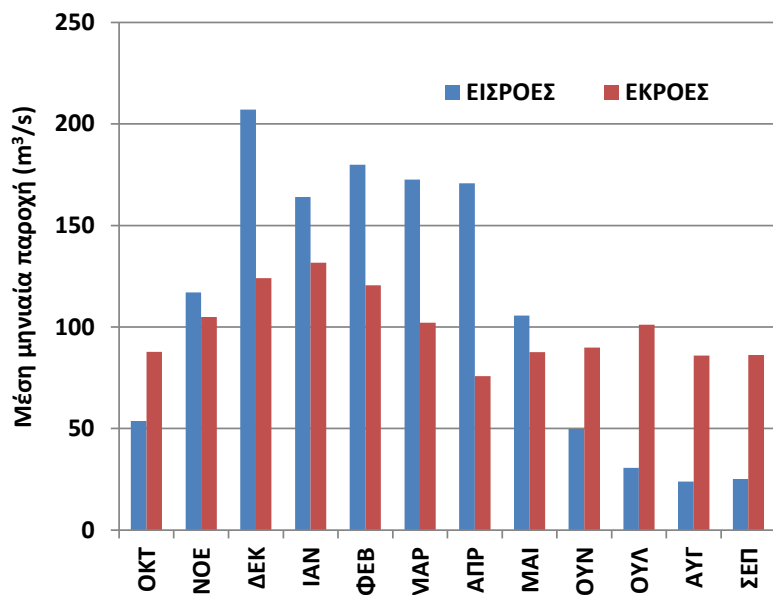
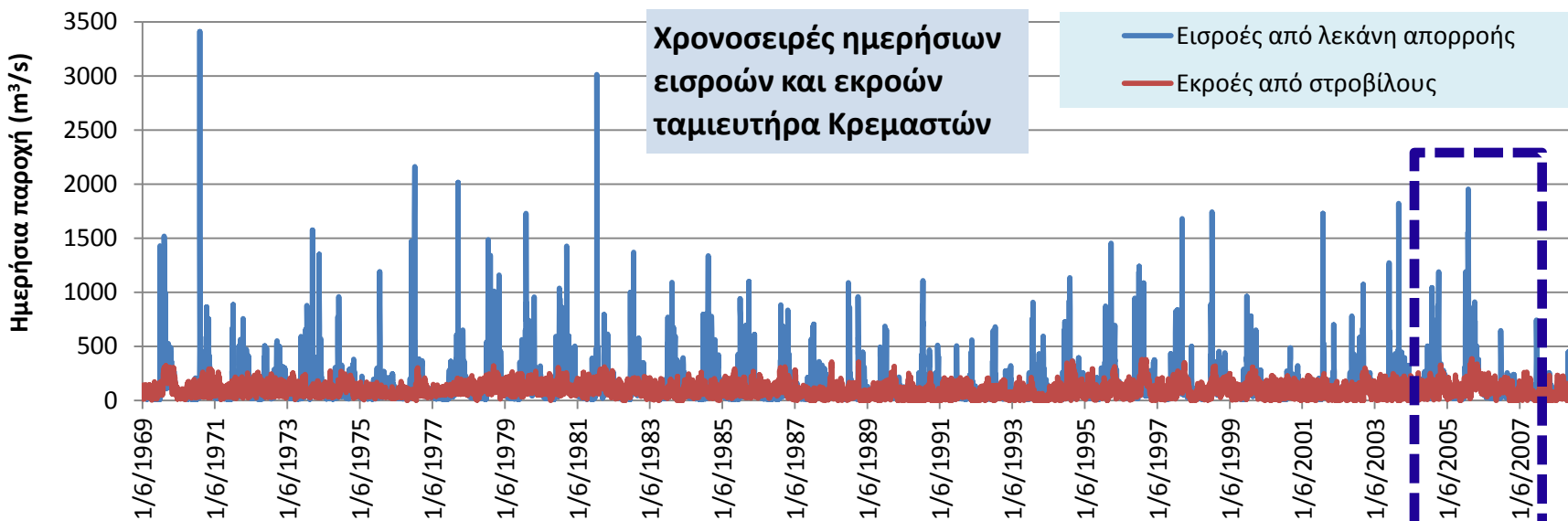
- Έργα αξιοποίησης των **άμεσα διαθέσιμων** υδατικών πόρων (έργα μικρής κλίμακας, χωρίς σημαντικές επεμβάσεις στη φυσική δίαιτα του υδατικού δυναμικού)
 - υδροληψίες από επιφανειακούς υδατικούς πόρους (πηγές, ποτάμια, λίμνες)
 - υδροληψίες υπόγειων υδάτων (πηγάδια, γεωτρήσεις)
- Έργα ανάπτυξης των **ολικών διαθέσιμων** υδατικών πόρων (δηλαδή του συνολικά εκμεταλλεύσιμου υδατικού δυναμικού, μετά από σημαντικές επεμβάσεις στη φυσική δίαιτα, με την κατασκευή μεγάλων υδραυλικών έργων):
 - ταμιευτήρες, για αποθήκευση και αναρρύθμιση της ροής.
 - έργα εκτροπής υδατικού δυναμικού από μια περιοχή σε άλλη.
 - έργα εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων.
- Έργα μεταφοράς, διανομής, συλλογής και επεξεργασίας του νερού
 - έργα μεταφοράς νερού από τις πηγές έως τις παρυφές της περιοχής της κατανάλωσης (υδραγωγεία, αντλιοστάσια)
 - έργα βελτίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού (διυλιστήρια)
 - δίκτυα διανομής νερού στους καταναλωτές (δίκτυα ύδρευσης, αρδευτικά δίκτυα)
 - έργα συλλογής πλεονάζοντος νερού, μετά τη χρήση (δίκτυα αποχέτευσης, αποστραγγιστικά δίκτυα)
 - έργα καθαρισμού και διάθεσης στους φυσικούς αποδέκτες

Αξιοποίηση υδατικού δυναμικού λεκάνης απορροής

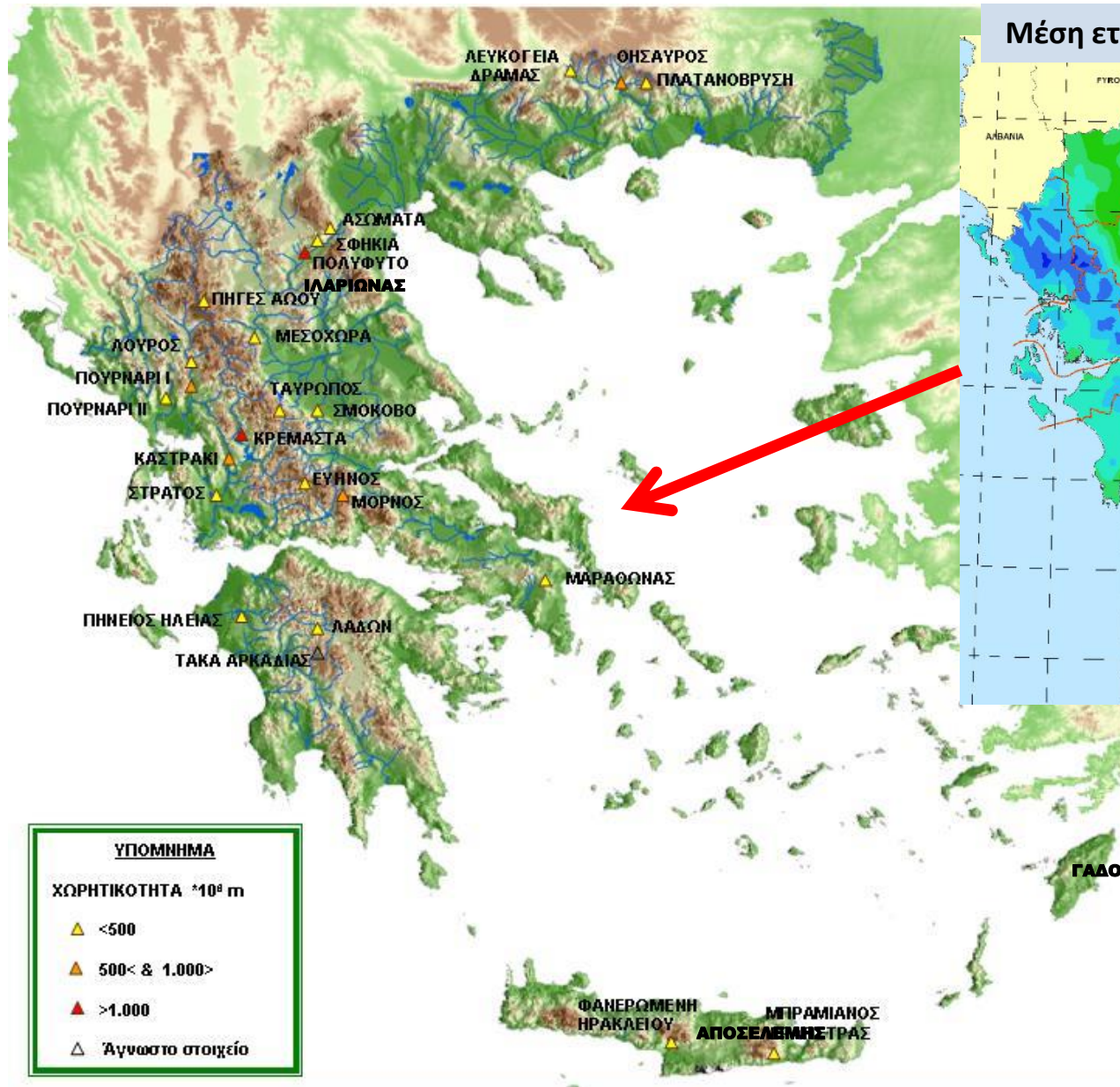
- ❑ Απλά έργα υδροληψίας αξιοποιούν μικρό μόνο ποσοστό της ετήσιας απορροής, καθώς δεν έχουν δυνατότητα αποθήκευσης των πλημμυρικών ροών (αξιοποιούν μόνο μέρος της βασικής απορροής του ποταμού).
- ❑ Για την ουσιαστική αξιοποίηση των επιφανειακών υδατικών πόρων, απαιτείται η κατασκευή φραγμάτων, που επιτρέπουν την **αποθήκευση** νερού, επιτυγχάνοντας έτσι **χρονική αναρρόθμιση** της ροής.
- ❑ Ακόμα και σε μεγάλους ταμιευτήρες, δεν είναι δυνατή η αξιοποίηση του συνόλου της απορροής, λόγω των φυσικών απωλειών νερού (εξάτμιση, υπερχείλιση, διαφυγές) και άλλων περιορισμών.
- ❑ Η αξιοποίηση των υδατικών πόρων μιας λεκάνης αποτιμάται σε όρους **ασφαλούς απόδοσης**, που ορίζεται ως η ποσότητα νερού που μπορεί να ληφθεί από ένα έργο αξιοποίησης με δεδομένα τεχνικά χαρακτηριστικά (π.χ. χωρητικότητα), για δεδομένο επίπεδο **αξιοπιστίας**.



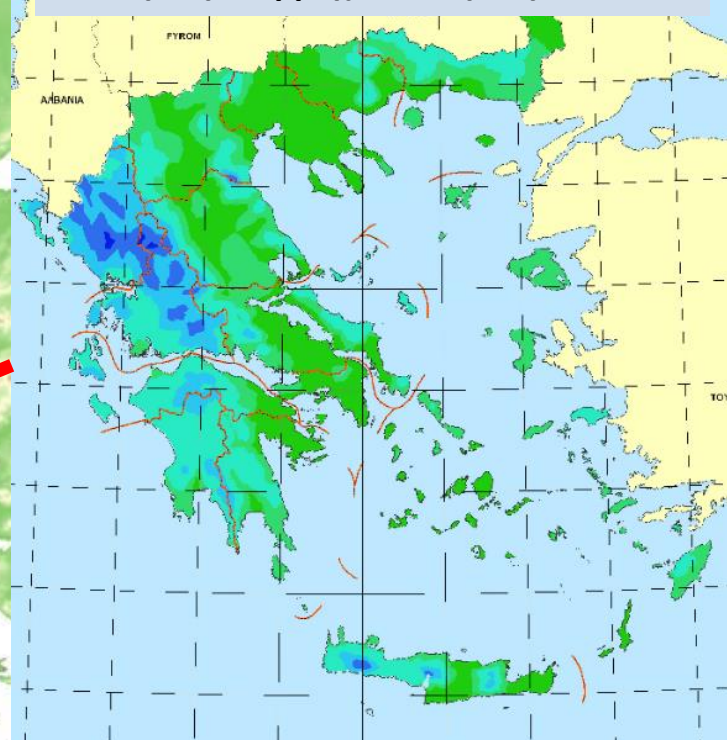
Η έννοια της αναρρύθμισης



Μεγάλα φράγματα της Ελλάδας



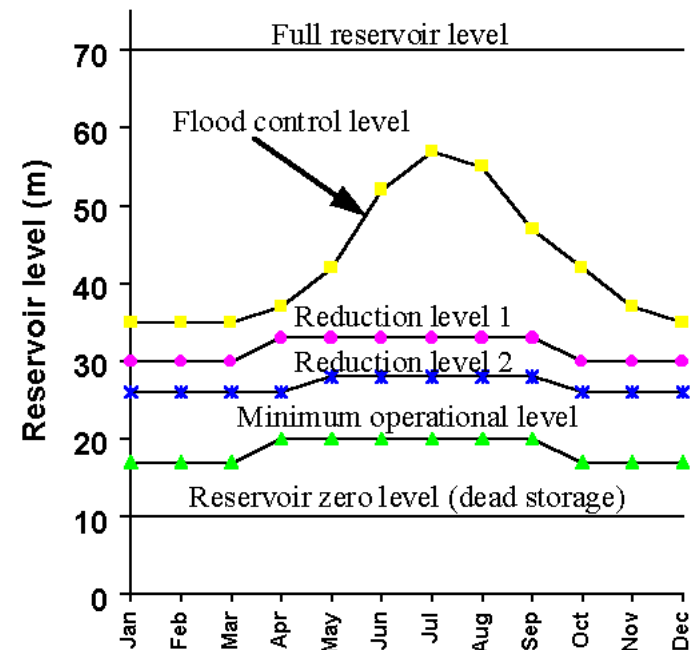
Μέση ετήσια βροχόπτωση στην Ελλάδα



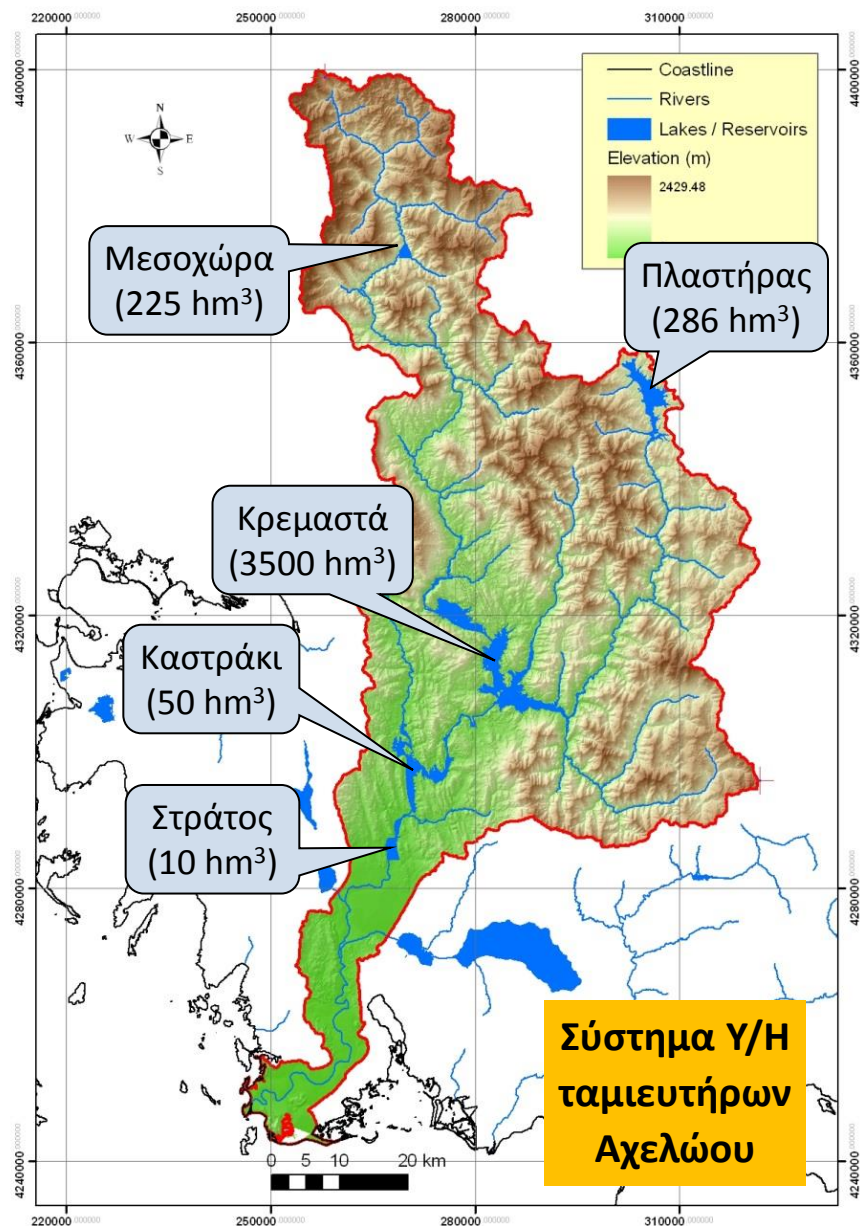
Πηγή: Βάση δεδομένων ταμειυτήρων της Ελλάδας (http://users.itia.ntua.gr/nikos/ arx_int/CDfrag/index.htm)ω

Διαχείριση ταμιευτήρων

- Επίπεδα διαχείρισης:
 - Στρατηγικό (μακροχόνιο, γενική διαχειριστική πολιτική)
 - Βραχυπρόθεσμο (χρονικός ορίζοντας μηνών ή υδρολογικού έτους)
 - Επιχειρησιακό (σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο)
- Σε ταμιευτήρες πολλαπλού σκοπού, οι διάφορες χρήσεις νερού εξυπηρετούνται με προκαθορισμένη **ιεραρχία** (η υδρευτική χρήση σε πρώτη προτεραιότητα).
- Η διαχείριση των ταμιευτήρων γίνεται με βάση **κανόνες λειτουργίας** (συχνά δίνονται σε μορφή νομογραφήματος), που ορίζουν τις επιθυμητές εκροές συναρτήσει της τρέχουσας στάθμης (ή αποθέματος), λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη των εισροών και της ζήτησης.
- Τυπικοί **περιορισμοί** στη λειτουργία ταμιευτήρων:
 - Κατώτατα όρια στάθμης για πραγματοποίηση απολήψεων (για περιβαλλοντικούς λόγους, για προστασία της ποιότητας του νερού, την διατήρηση αποθέματος ασφαλείας, κτλ.)
 - Ανώτατα όρια στάθμης για τον περιορισμό του κινδύνου υπερχείλισης
 - Διατήρηση ελάχιστης ροής περιβαλλοντικής διατήρησης κατόντη του φράγματος
 - Τεχνητές πλημμύρες



Συνδυασμένη λειτουργία ταμιευτήρων



Σύστημα Μόρνου-Ευήνου

- Ταμιευτήρας Μόρνου (υπερετήσια ρύθμιση)
 - Έκταση λεκάνης 588 km²
 - Μέση ετήσια απορροή 235 hm³
 - Ωφέλιμη χωρητικότητα 630 hm³
- Ταμιευτήρας Ευήνου (εποχιακή ρύθμιση)
 - Έκταση λεκάνης 352 km²
 - Μέση ετήσια απορροή 275 hm³
 - Ωφέλιμη χωρητικότητα 112 hm³

Σύγκριση έργων αξιοποίησης επιφανειακών νερών

	Μικρά έργα υδροληψίας	Μικροί ταμιευτήρες, λιμνοδεξαμενές	Μεγάλοι και πολύ μεγάλοι ταμιευτήρες
Λόγος χωρητικότητας προς μέση ετήσια απορροή	Μηδενική χωρητικότητα	Μικρός (ημερήσια ή εποχιακή ρύθμιση)	Ετήσια ρύθμιση ~1/3 - 1 Υπερετήσια ρύθμιση >1
Διαχείριση ξηρασιών	Όχι	Για λίγους μήνες	Τουλάχιστον για ένα έτος
Διαχείριση πλημμυρών	Όχι	Όχι	Ναι
Απαιτούμενες υποδομές	Στοιχειώδεις	Περιορισμένες	Σημαντικές
Χρήσεις νερού	Μεμονωμένες	Μεμονωμένες	Πολλαπλού σκοπού
Χωρική κλίμακα χρήσεων	Τοπική	Τοπική	Κλίμακα υδροσυστήματος
Έλεγχος λειτουργίας	Συχνά κανένας	Απλός	Σύνθετος
Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	Μικρές	Μικρές	Σημαντικές, εν μέρει ελεγχόμενες
Χαρακτηριστικό υδρολογικό μέγεθος για διαστασιολόγηση	Ημερήσια χρονοσειρά απορροής, καμπύλη διάρκειας-παροχής, βασική ροή		Μηνιαία χρονοσειρά απορροής (μεγάλο δείγμα)
Παραγωγή Υ/Η ενέργειας	ΜΥΗΕ	ΜΥΗΕ, έργα αιχμής, αντλησιοταμίευση	Έργα αιχμής ή βάσης

Αξιοποίηση υπόγειων υδατικών πόρων

- ❑ Στα έργα αξιοποίησης υπόγειων νερών το μέγεθος που ενδιαφέρει είναι τα **ρυθμιστικά αποθέματα**, δηλαδή η ποσότητα νερού που κατεισδύει από τη βροχόπτωση (και στη συνέχεια εκφορτίζεται εντός τη λεκάνης ή διαφεύγει προς γειτονικές λεκάνες και, τελικά, τη θάλασσα) και αποτελεί το ανανεώσιμο υπόγειο υδατικό δυναμικό.
- ❑ Στην πράξη, τα **εκμεταλλεύσιμα αποθέματα** αποτελούν ποσοστό 40-80% των ρυθμιστικών, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες.
- ❑ Η πολύπλοκη γεωλογική και τεκτονική δομή της Ελλάδας διαμορφώνει σύνθετες υδρογεωλογικές συνθήκες, με αποτέλεσμα τα επιμέρους δημιουργούμενα υπόγεια υδροφόρα συστήματα να παρουσιάζουν σημαντική **ετερογένεια** ως προς την οργάνωση και τον τρόπο λειτουργίας τους.
- ❑ Υπάρχουν σημαντικές **αβεβαιότητες** τόσο στην ακριβή οριοθέτηση των διαφόρων υδροφόρων συστημάτων, την προσέγγιση αντιπροσωπευτικών τιμών των υδραυλικών παραμέτρων και την εκτίμηση των ρυθμιστικών αποθεμάτων, όσο και στη μελέτη της διάταξής τους και την πρόβλεψη εξέλιξης των αποθεμάτων.
- ❑ Σημαντικά προβλήματα για την υδρογεωλογική έρευνα παραμένουν η μελέτη των συνθηκών κατείσδυσης, αποθήκευσης και υπόγειας ροής των **καρστικών υδροφορέων**, καθώς και η μελέτη της πιο αποδοτικής εκμετάλλευσής τους.
- ❑ Μοναδική ορθολογική προσέγγιση αποτελεί η **συνδυασμένη διαχείριση** των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υπόγειων νερών

□ Τυπικά πλεονεκτήματα:

- **Εύκολα προσεγγίσιμοι πόροι**, που αποτελούν την πλέον προσιτή λύση για την εξυπηρέτηση μικρής και μεσαίας κλίμακας υδατικών συστημάτων.
- Οι υδροφορείς συμπεριφέρονται, πρακτικά, ως **ταμιευτήρες υπερετήσιας ρύθμισης**, με συνέπεια να μην απαιτείται η κατασκευή μεγάλων έργων.
- Όταν οι υδροφορείς αναπτύσσονται κάτω από τις εκτάσεις όπου γίνεται η κατανάλωση, αποφεύγεται η κατασκευή σημαντικών **έργων μεταφοράς**.
- Οι γεωτρήσεις μπορούν να κατασκευάζονται και να λειτουργούν αυτόνομα και ανεξάρτητα, επιτρέποντας τη **σταδιακή ανάπτυξη** των σχετικών έργων αξιοποίησης.

□ Τυπικά μειονεκτήματα:

- Κατά κανόνα, το αξιοποιήσιμο υπόγειο δυναμικό μιας λεκάνης είναι μικρότερο σε σχέση με τα εκμεταλλεύσιμα επιφανειακά νερά (**βραδύς ρυθμός ανανέωσης**).
- Η άντληση του υπόγειου νερού, επειδή συχνά γίνεται από μεγάλα βάθη, συνεπάγεται σημαντική **ενεργειακή και οικονομική επιβάρυνση**, καθώς και άλλες επιπτώσεις (π.χ. καθιζήσεις εδαφών).
- Η **ποιότητα** των υπόγειων υδατικών πόρων, αν και είναι καλύτερη από των επιφανειακών, μπορεί να υποβαθμιστεί έντονα από την εκτεταμένη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων, καθώς και τη διείσδυση της θάλασσας (υφαλμύριση), και συχνά οι επιπτώσεις είναι μη αναστρέψιμες.

Συνδυασμένη διαχείριση επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων



Οι έννοιες της ασφαλούς απόδοσης και αξιοπιστίας

- Η **αξιοπιστία** (reliability) αποτελεί θεμελιώδες μέγεθος ενός συστήματος υδατικών πόρων, και ορίζεται ως η **πιθανότητα** επίτευξης ενός συγκεκριμένου στόχου ή επίδοσης, για καθορισμένο χρονικό διάστημα και για καθορισμένες συνηθήκες του συστήματος,
- Συμπληρωματική της έννοιας της αξιοπιστίας, r , είναι η **πιθανότητα αστοχίας**:

$$\alpha = 1 - r = P(X < x^*)$$

όπου X τυχαία μεταβλητή που εκφράζει την πραγματική επίδοση που επιτυγχάνεται κατά το χρονικό διάστημα ελέγχου (π.χ., εκροή για ύδρευση, άρδευση, παραγωγή ενέργειας, κτλ.) και η x^* αντίστοιχη τιμή-στόχος που καλείται **ασφαλής απόδοση** (safe yield) ή, ειδικότερα:

- αν πρόκειται για ζήτηση νερού, καλείται **ασφαλής απόληψη** (safe release)
- αν πρόκειται για ζήτηση ενέργειας, καλείται **πρωτεύουσα ενέργεια** (firm energy)
- Σε ένα σύστημα υδατικών πόρων, η πραγματική επίδοση X είναι **τυχαία μεταβλητή**, επειδή διάφορες συνιστώσες ή διεργασίες του διέπονται από **αβεβαιότητα**.
- Βασικές παραδοχές:
 - Λαμβάνεται υπόψη μόνο η **υδρολογική αβεβαιότητα**, ενώ οι άλλες πηγές αβεβαιότητας του συστήματος αγνοούνται.
 - Οι υδρολογικές εισροές αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των οποίων θεωρείται ότι δεν μεταβάλλονται διαχρονικά (υπόθεση **στασιμότητας**, stationarity).
 - Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος είναι σταθερά (υπόθεση **μόνιμων συνθηκών**, steady state).

Η σχέση ασφαλούς απόληψης – αξιοπιστίας σε απλά έργα υδροληψίας

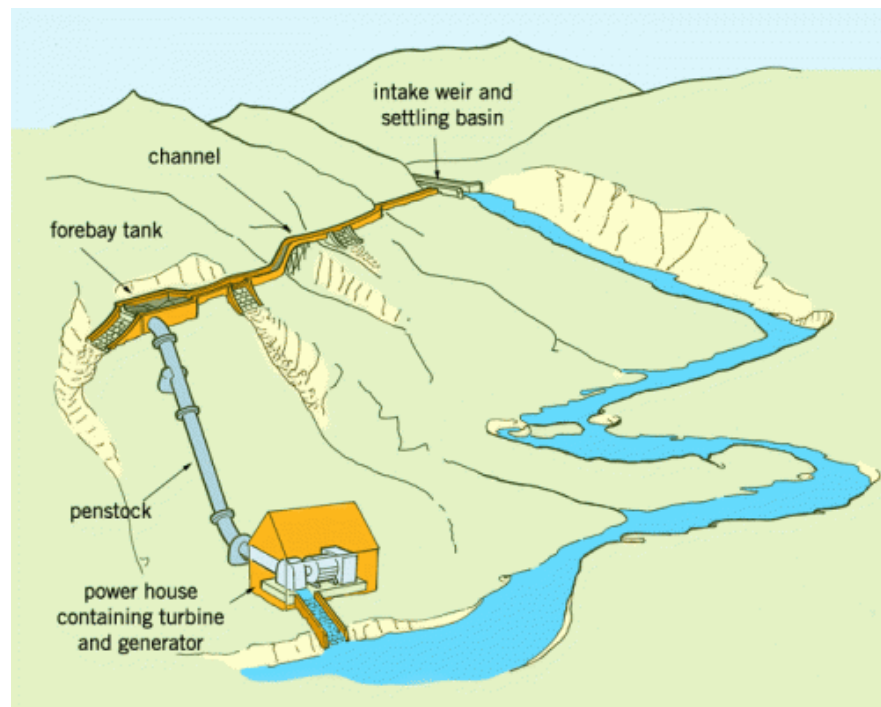
- Έστω έργο υδροληψίας σε θέση ποταμού, αμελητέας αποθηκευτικής ικανότητας, για το οποίο τίθεται ένας στόχος σταθερής ζήτησης d (θεωρείται ότι η ζήτηση μπορεί να παραληφθεί από το έργο μεταφοράς).
- Έστω ότι στη θέση του έργου διατίθεται ένα δείγμα (χρονοσειρά) εισροών i_t για ένα χρονικό ορίζοντα ελέγχου, μήκους n .
- Σε κάθε χρονικό βήμα $t = 1, \dots, n$, η απόληψη νερού από το έργο υδροληψίας δίνεται από το στοιχειώδες μοντέλο:

$$x_t = \min(i_t, d)$$

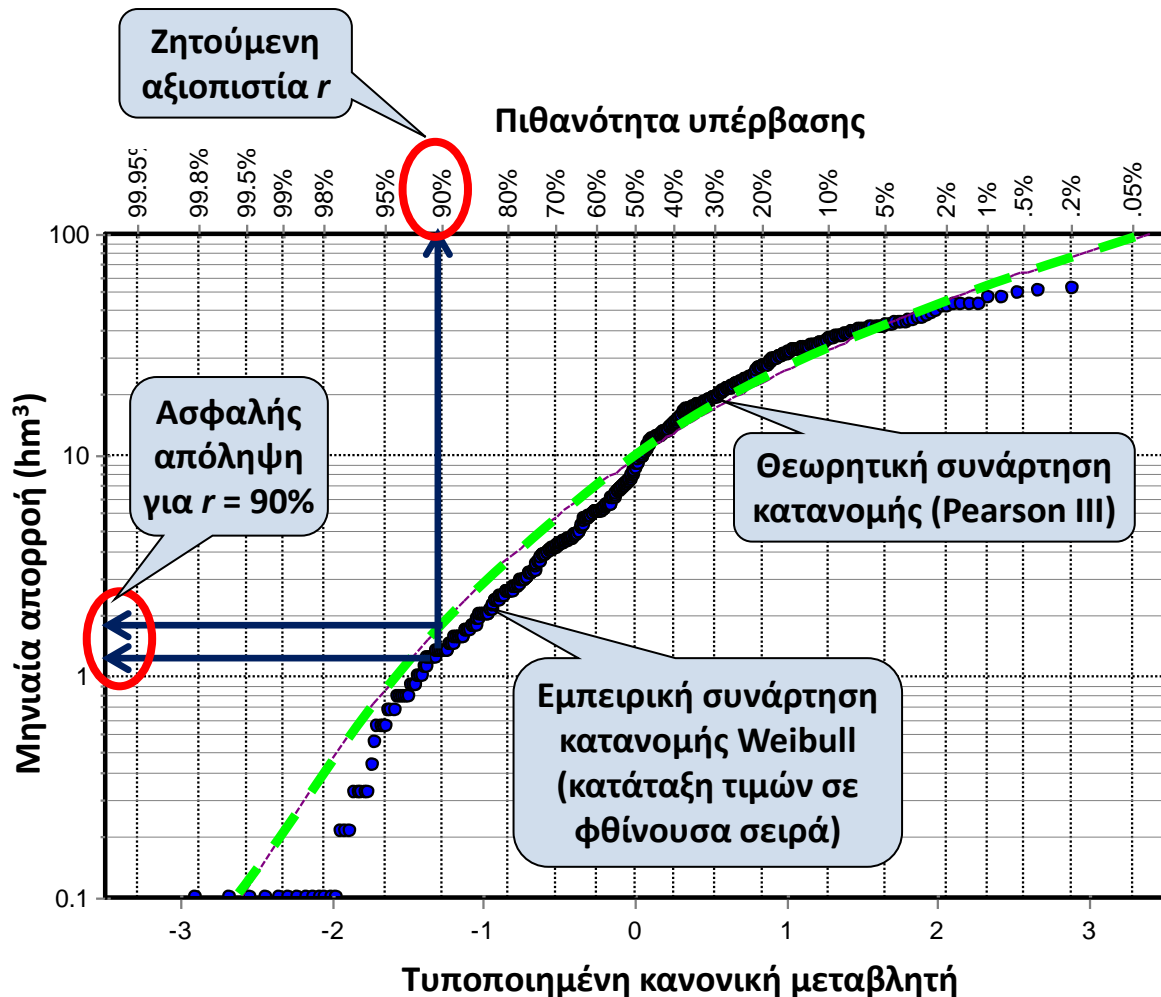
- Λόγω της απλής δομής του μοντέλου, η αξιοπιστία του συστήματος μπορεί να εκτιμηθεί **θεωρητικά**, προσαρμόζοντας μια **κατανομή πιθανοτήτων** στο δείγμα των εισροών.
- Εναλλακτικά, η αξιοπιστία μπορεί να εκτιμηθεί και **εμπειρικά**, ως η συχνότητα επίτευξης της ζήτησης d κατά το χρονικό διάστημα του δείγματος, δηλαδή:

$$r = n_d / n$$

όπου n_d το πλήθος των χρονικών βημάτων κατά τα οποία $x_t = d$.



Αναλυτικές και εμπειρικές προσεγγίσεις εκτίμησης της ασφαλούς απόληψης σε έργα χωρίς αναρρύθμιση



Παράδειγμα εκτίμησης ασφαλούς απόληψης από θέση υδροληψίας, για αξιοπιστία 90%, μέσω στατιστικής ανάλυσης του δείγματος μηνιαίων απορροών:

- Θεωρητική εκτίμηση, με προσαρμογή της κατανομής γάμμα τριών παραμέτρων (Pearson III) = 1.8 hm^3
- Εκτίμηση με την εμπειρική συνάρτηση Weibull = 1.2 hm^3
- Εναλλακτικές εμπειρικές προσεγγίσεις (ισοδύναμες της Weibull):
 - Καμπύλη διάρκειας-μηνιαίας απορροής
 - Αναπαράσταση λειτουργίας έργου και καταγραφή ποσοστού ελλειμμάτων (έμμεση εκτίμηση, μέσω προσομοίωσης)

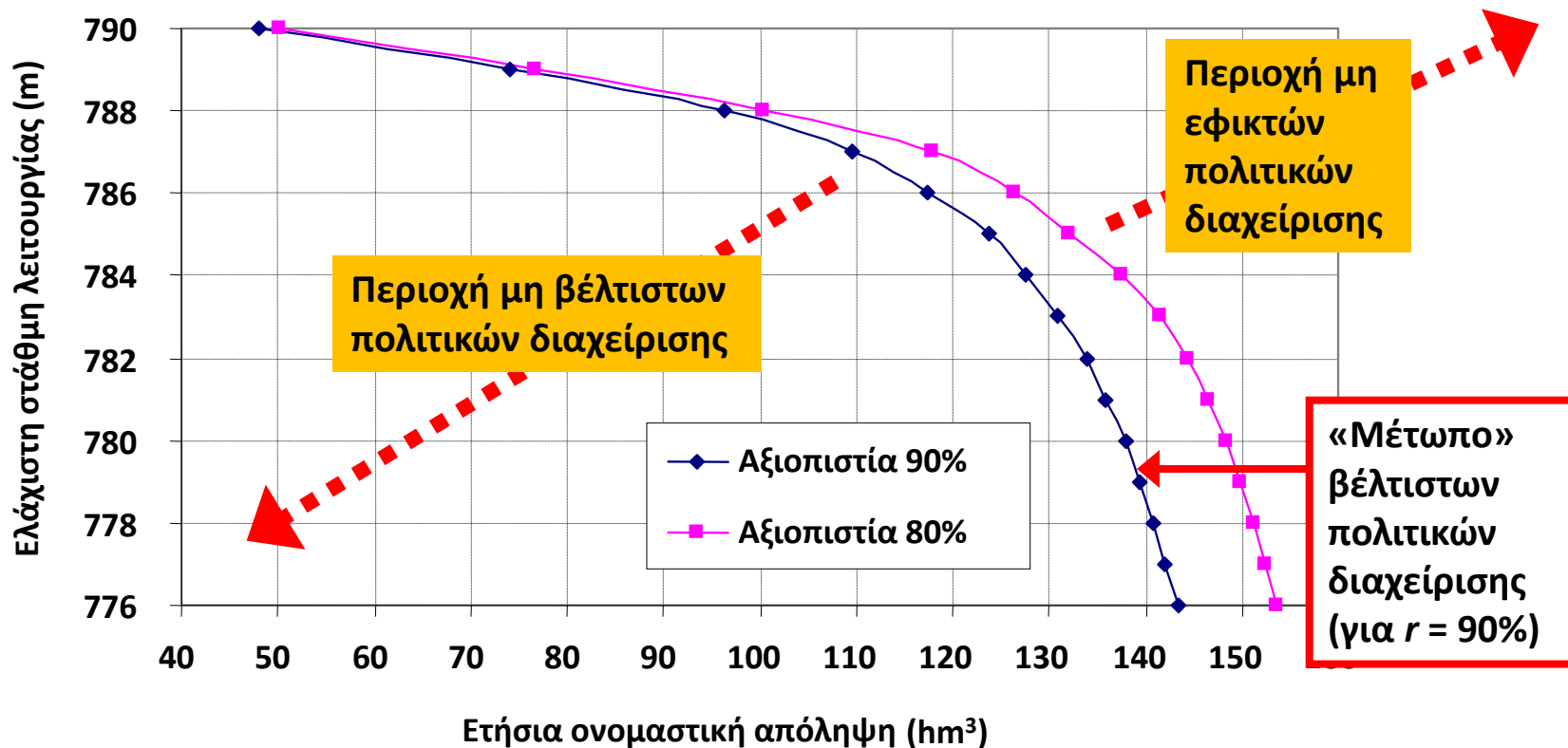
Χρονοσειρά απορροών: Μηνιαίες εισροές στον ταμιευτήρα Πλαστήρα, εκτιμημένες από το υδατικό ισοζύγιο (υδρολογικά έτη 1966-67 ως 2009-10)

Εκτίμηση αξιοπιστίας ταμιευτήρα

- Έστω ταμιευτήρας ωφέλιμης χωρητικότητας k , για τον οποίο τίθεται ένας στόχος σταθερής ζήτησης d , με δεδομένη χρονοσειρά εισροών i_t για ένα χρονικό ορίζοντα ελέγχου, μήκους n , και δεδομένο αρχικό απόθεμα s_0 .
- Λόγω της **αναρρυθμιστικής λειτουργίας** του ταμιευτήρα, η στατιστική δίαιτα των απολήψεων διαφοροποιείται από την δίαιτα των εισροών, και συνεπώς η αξιοπιστία του ταμιευτήρα μπορεί να εκτιμηθεί μόνο εμπειρικά.
- Μαθηματική διατύπωση **μοντέλου προσομοίωσης** ταμιευτήρα:

$$s_t = s_{t-1} + i_t - x_t - w_t \text{ για κάθε } t = 1, \dots, n \text{ (υδατικό ισοζύγιο)}$$
$$x_t = \min(s_t, d) \text{ για κάθε } t = 1, \dots, n \text{ (περιορισμοί απολήψεων)}$$
$$w_t = \max(0, s_t - k) \text{ για κάθε } t = 1, \dots, n \text{ (περιορισμοί υπερχειλίσεων)}$$
- Η αξιοπιστία του ταμιευτήρα ως προς την κάλυψη της ζήτησης d εκτιμάται εμπειρικά ως:
$$r = \text{COUNT}(x_t = d)$$
- Η αξιοπιστία, όπως και η ασφαλής απόληψη, ήτοι η σταθερή ζήτηση που εξασφαλίζεται για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας, εκτιμώνται σε **ετήσια βάση**, καταμετρώντας τα ελλείμματα κάθε έτους (συντηρητική παραδοχή, άρση επίδρασης της εποχικότητας).
- Εναλλακτικές διατυπώσεις (προβλήματα βελτιστοποίησης):
 - Δίνονται $d, r \rightarrow$ προσδιορισμός χωρητικότητας k (πρόβλημα διαστασιολόγησης, αφορά στον σχεδιασμό του ταμιευτήρα)
 - Δίνονται $k, r \rightarrow$ εκτίμηση ασφαλούς απόληψης d (αποτίμηση της επίδοσης ταμιευτήρα)

Η σχέση ωφέλιμης χωρητικότητας ταμιευτήρα – ασφαλούς απόληψης – αξιοπιστίας



Αύξηση ωφέλιμης χωρητικότητας (ρυθμιστικός όγκος) → αύξηση ασφαλούς απόληψης, για δεδομένη αξιοπιστία, ή αύξηση αξιοπιστίας, για δεδομένη ζήτηση.

Η παραπάνω σχέση έχει καταρτιστεί στο πλαίσιο διερεύνησης εναλλακτικών διαχειριστικών πολιτικών λειτουργίας του ταμιευτήρα Πλαστήρα, με σκοπό την θέσπιση μιας ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης αρδευτικών απολήψεων. Οι σχετικές αναλύσεις έγιναν στο πλαίσιο ερευνητικού έργου του ΕΜΠ (<http://www.itia.ntua.gr/el/projinfo/77/>).

Αποτίμηση ενεργειακής επίδοσης Υ/Η έργου

- Έστω Υ/Η έργο για το οποίο τίθεται στόχος παραγωγής ενέργειας e^* (σταθερός). Η αποτίμηση της ενεργειακής του επίδοσης γίνεται με βάση την προσομοιωμένη χρονοσειρά παραγωγής ενέργειας, e_t , με βάση την οποία εκτιμώνται:
 - η αξιοπιστία κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης (εκτιμάται εμπειρικά ως ποσοστό των χρονικών βημάτων για τα οποία ισχύει $e_t \geq e^*$)
 - η παραγωγή ενέργειας πάνω από τον στόχο e^* (δευτερεύουσα ενέργεια)
 - η παραγωγή ενέργειας κάτω από τον στόχο e^* (έλλειμμα ενέργειας)
- Κατατάσσοντας τη χρονοσειρά σε φθίνουσα σειρά, και αντιστοιχώντας μια πιθανότητα υπέρβασης σε κάθε τιμή, προκύπτει η καμπύλη διάρκειας-παραγωγής ενέργειας.
- Αν n είναι το μέγεθος της προσομοιωμένης χρονοσειράς, η εμπειρική πιθανότητα υπέρβασης της ταξινομημένης τιμής που βρίσκεται στη θέση i εκτιμάται από τη σχέση:
$$p_i = i / (n + 1)$$
- Με βάση την καμπύλη διάρκειας μπορεί να εκτιμηθεί η ενέργεια που εξασφαλίζεται για υψηλό (της τάξης του 95 έως 99%) επίπεδο αξιοπιστίας (**πρωτεύουσα ενέργεια**).

