

# STANDARDNI I SAVREMENI PRISTUPI U ODREĐIVANJU ENERGETSKIH KARAKTERISTIKA VELIKIH I MALIH HIDROELEKTRANA

**dr Ivan Božić, vanredni profesor**

Katedra za hidraulične mašine i energetske sisteme  
Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet

**dr Radiša Jovanović, vanredni profesor**

Katedra za automatsko upravljanje  
Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet

*Predavanje po pozivu*



# Energetske karakteristike i vrednovanje hidroelektrana

Brojnost parametara – nemogućnost njihovog jednostavnog i jednoznačnog grupisanja

Načelna podela:

## Osnovni energetske parametri

- ✓ instalisani protok
- ✓ garantovani ekološki protok (ekološki prihvatljiv protok, biološki minimum)
- ✓ karakteristični bruto i neto padovi
- ✓ maksimalna i garantovana snaga
- ✓ ukupna i korisna zapremina akumulacije
- ✓ geometrija derivacionog sistema
- ✓ tip i broj agregata
- ✓ stepeni korisnosti
- ✓ druge hidrološke i pogonske specifičnosti
- ✓ ...

## Pokazatelji HE u EES i VPS

- ✓ zahtevani protoci
- ✓ zahtevana proizvodnja električne energije
- ✓ raspoloživost
- ✓ moguća srednja godišnja proizvodnja EE
- ✓ godišnja proizvodnja određenih verovatnoća
- ✓ potreba za snabdevanjem vodom i navodnjavanjem
- ✓ uloga u dijagramu opterećenja i struktura u EES
- ✓ karakteristike HE u EES
- ✓ uticaj struktura i karakteristika drugih energetskih sistema u EES na HE
- ✓ ...

## Osnovni energetske parametri

$$E_{HE} = \sum_{i=1}^m E_{Ai} = \sum_{i=1}^m (P_{Ai} \cdot t)$$

$$P_A = P_h \cdot \eta_A = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T \cdot \eta_G$$

$$P_A = \rho(p, T, S, \dots) \cdot g(\varphi, z) \cdot Q \cdot H(Q^2, \Delta p, \Delta z) \cdot \eta_T(H, Q) \cdot \eta_G(P_G \cos \varphi)$$

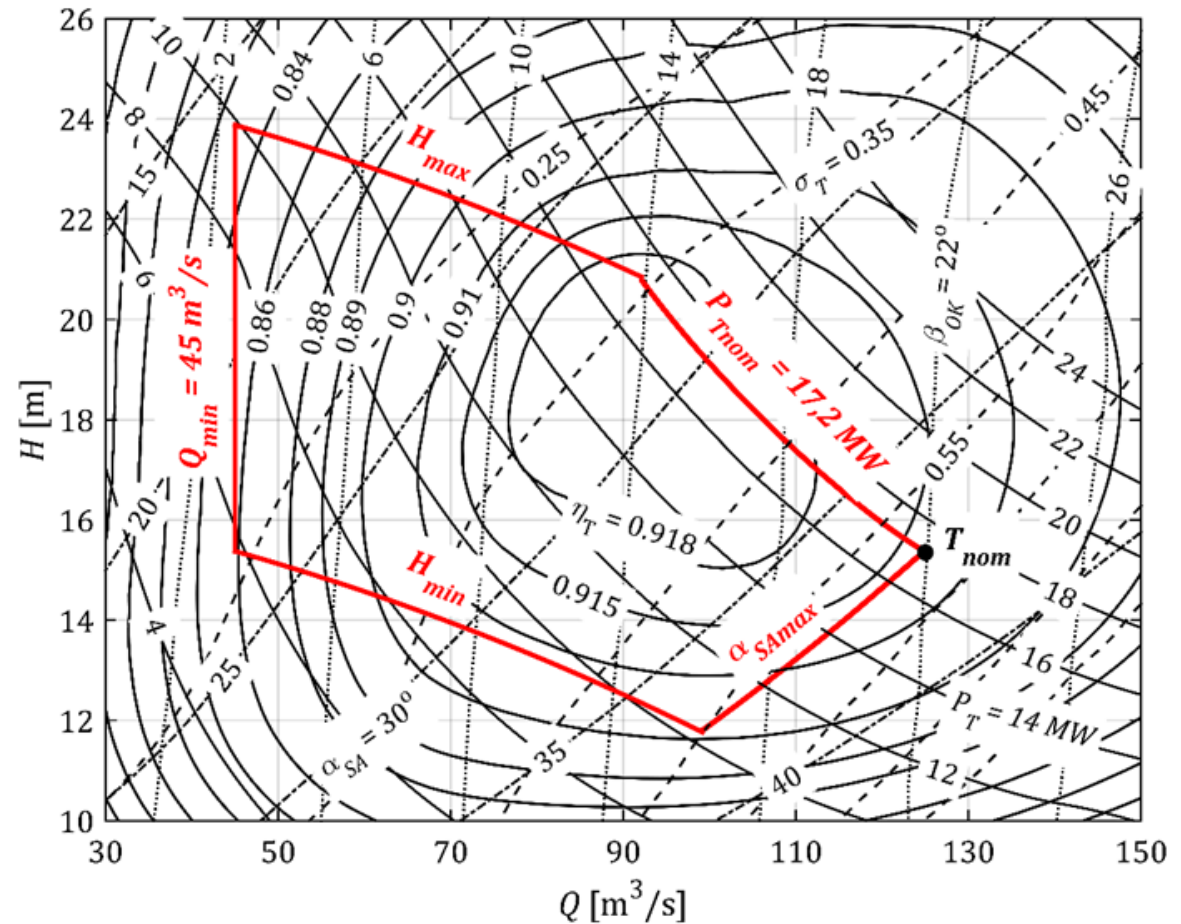
*Neophodnost određivanja karakteristika hidroagregata u širokom opsegu rada:  
eksploatacione karakteristike hidrauličnih turbina i pogonske karakteristike  
hidrogeneratora*

# Eksplatacione karakteristike hidraulične turbine

$$P_T = \rho g \cdot Q \cdot H(Q^2, \Delta p, \Delta z) \cdot \eta_T(Q^2, \Delta p, \Delta z, Q)$$

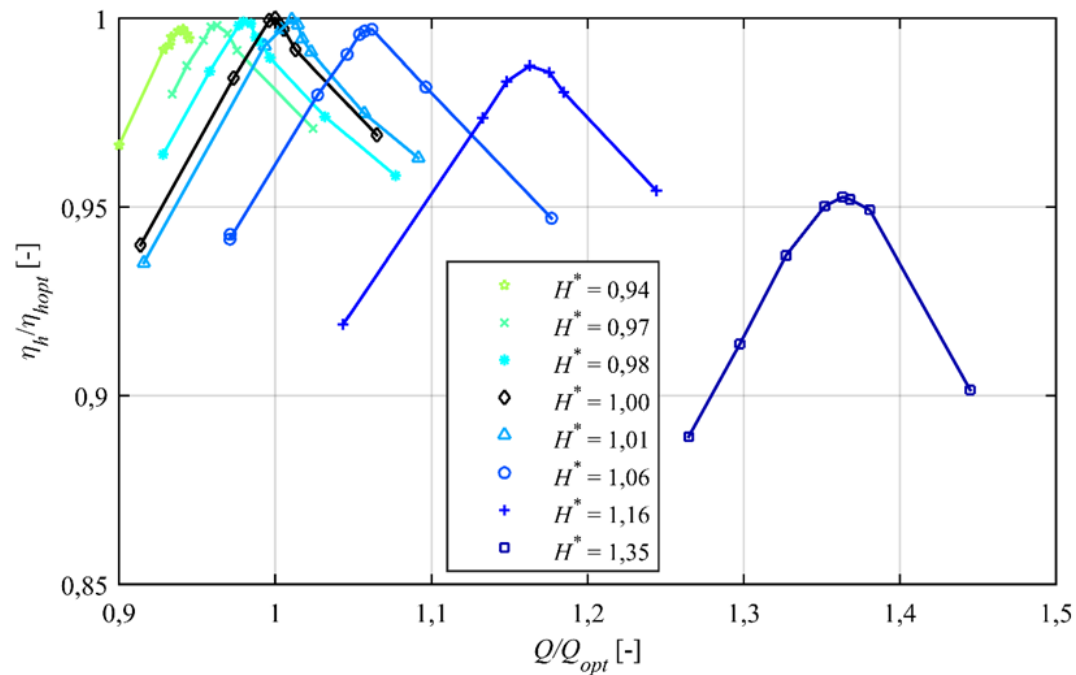
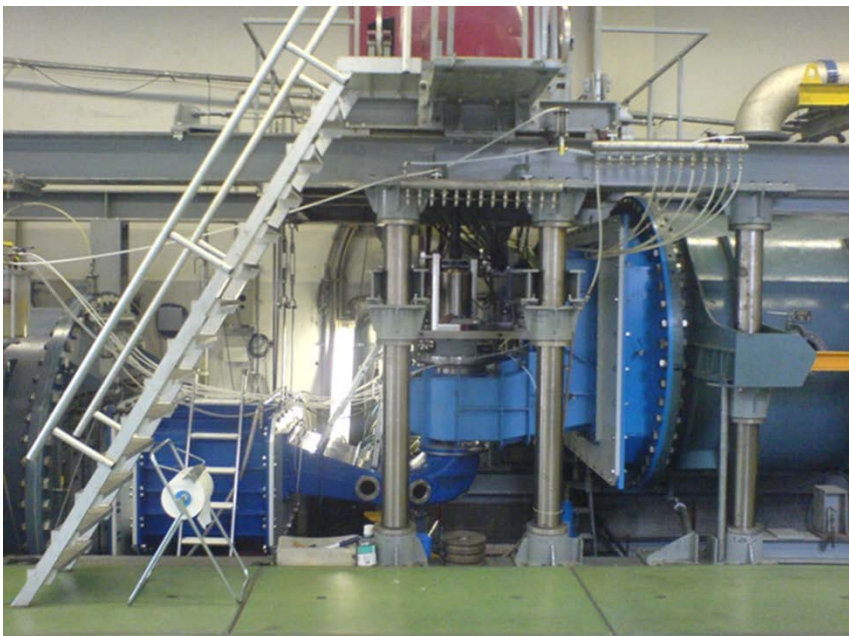
$$\eta_T = \eta_T(D_1, \beta_{OK}, \alpha_{SA}, Q, n, H, T, \rho, g, \dots)$$

$$\sigma_T = \sigma_T(D_1, \beta_{OK}, \alpha_{SA}, Q, n, H, T, \rho, g, \dots)$$



# Standardni pristup - eksperimentalna modelska ispitivanja u laboratoriji

IEC 60193:1999-11 - *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests*



$$\eta_{hP} = \eta_{hM} + \frac{1 - \eta_{hMopt}}{\left(\frac{Re_{ref}}{Re_{Mopt}}\right)^{0,16} + \frac{1 - V_{ref}}{V_{ref}}} \left[ \left(\frac{Re_{ref}}{Re_M}\right)^{0,16} - \left(\frac{Re_{ref}}{Re_P}\right)^{0,16} \right]$$

## Standardni pristup – preračunavanje modelskih karakteristika

IEC 62097:2009-02 - *Hydraulic machines, radial and axial - Performance conversion method from model to prototype*

$$\eta_{hP} = \eta_{hM} (1 + \Delta_E)(1 + \Delta_T)(1 + \Delta_Q)$$

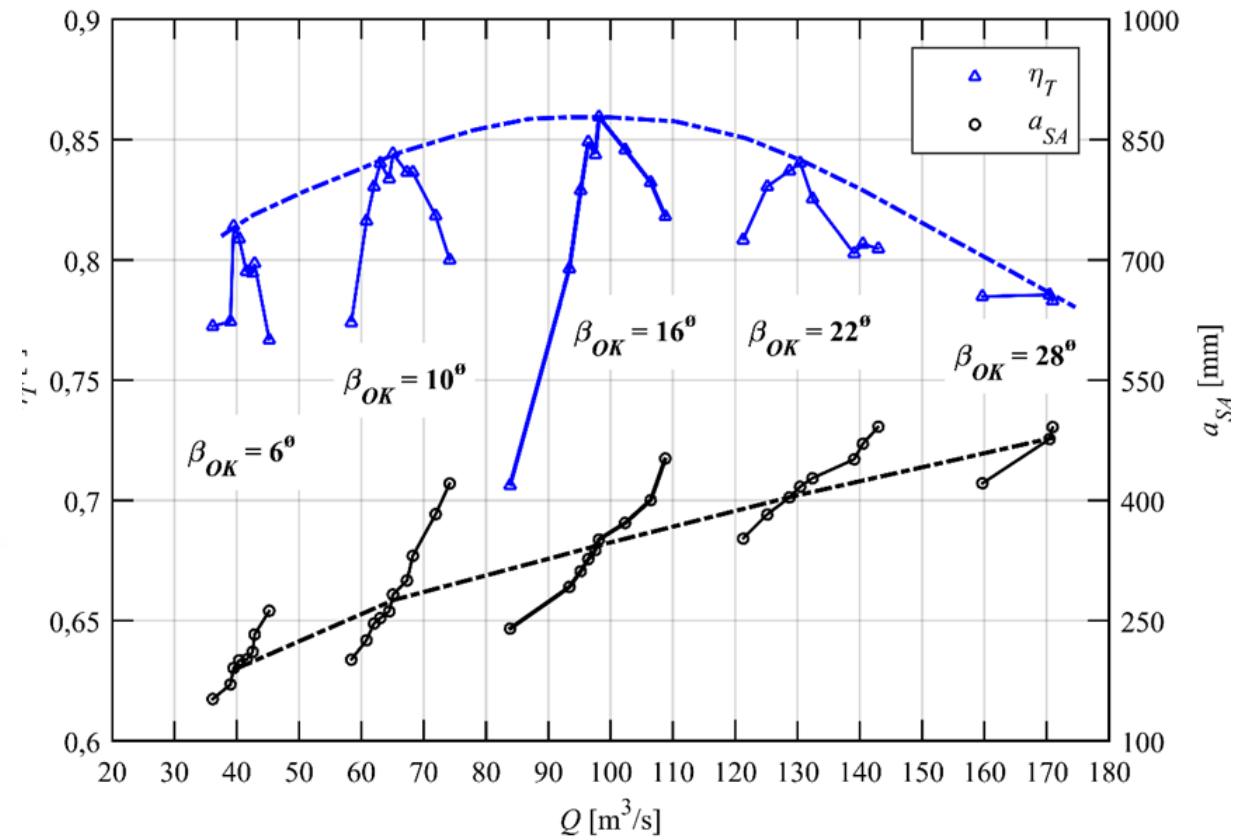
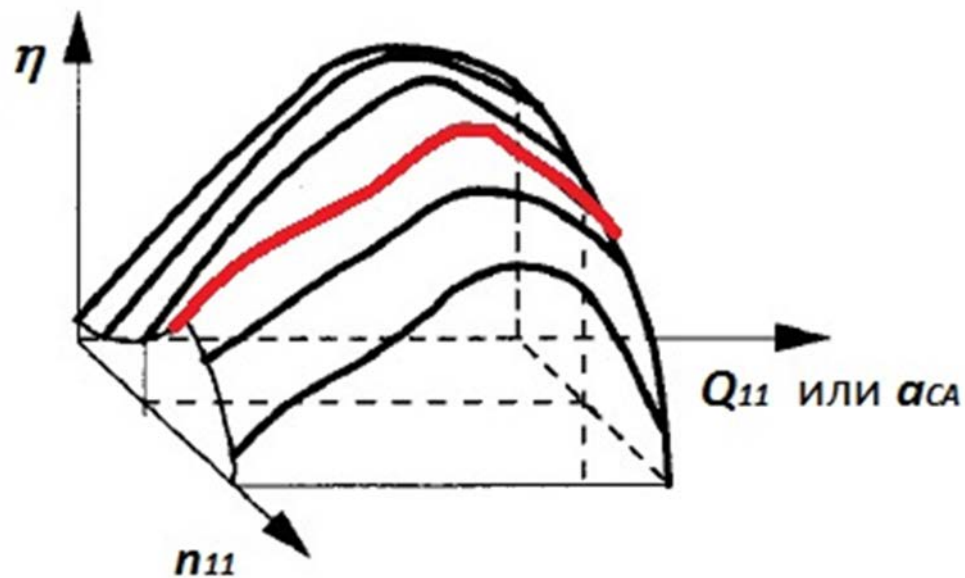
$$\Delta_E = \sum_{k=1}^P \frac{\delta_{Eref(k)}}{1 + 0,35(\kappa_{u(k)} \cdot \kappa_{d(k)})^{0,2}} \left[ \left( 4 \cdot 10^5 \kappa_{u(k)} \frac{Ra_{(k)M}}{D_M} + \frac{Re_{ref}}{Re_M} \right)^{0,2} - \left( 4 \cdot 10^5 \kappa_{u(k)} \frac{Ra_{(k)P}}{D_P} + \frac{Re_{ref}}{Re_P} \right)^{0,2} \right]$$

$$\Delta_Q = 0,01 \left[ 1 - \left( \frac{K_M}{K_P} \right)^{0,5} \right]$$

$$\Delta_T = \frac{\delta_{Tref}}{1 + 0,154\kappa_T^{0,4}} \left[ \left( 7,5 \cdot 10^4 \kappa_T \frac{Ra_{TM}}{D_M} + \frac{Re_{ref}}{Re_M} \right)^{0,2} - \left( 7,5 \cdot 10^4 \kappa_T \frac{Ra_{TP}}{D_P} + \frac{Re_{ref}}{Re_P} \right)^{0,2} \right]$$

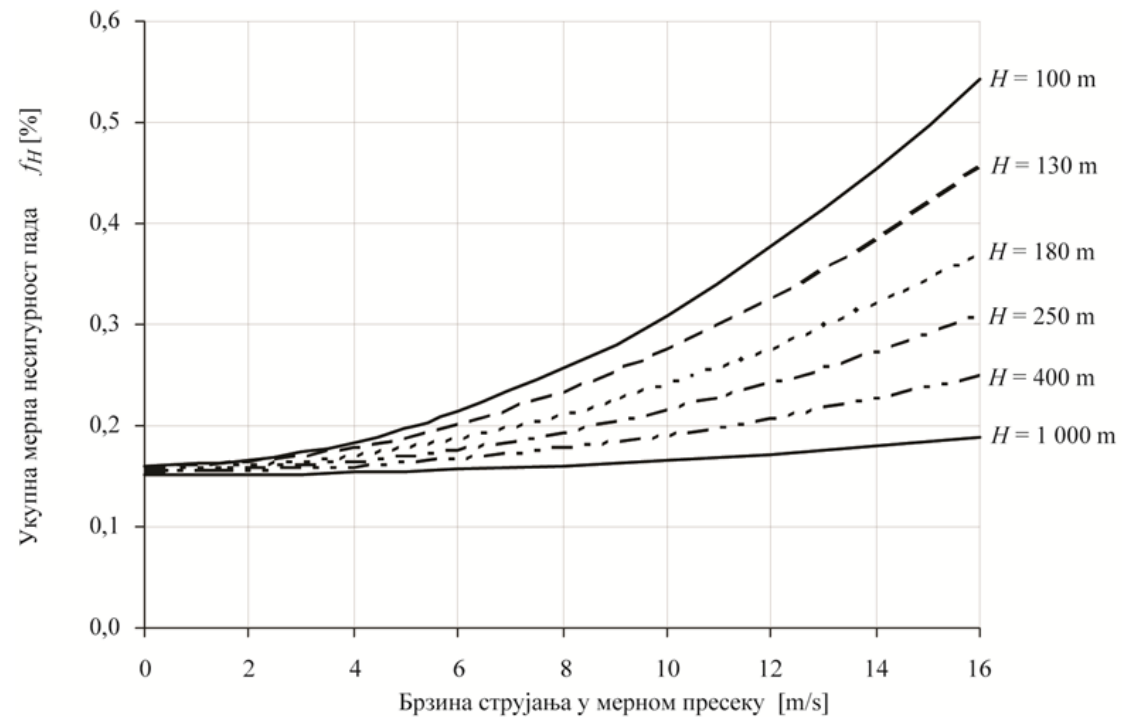
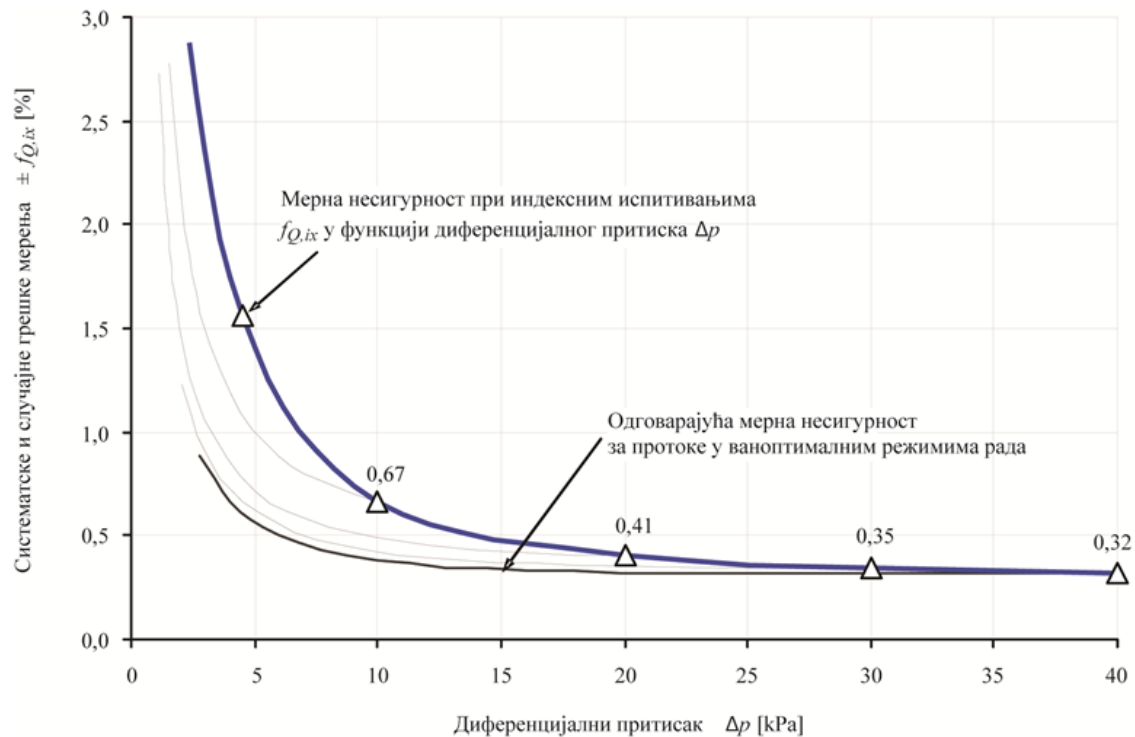
# Standardni pristup - eksperimentalna ispitivanja na terenu (u velikoj hidroelektrani)

IEC 60041:1991-11 - *Field acceptance tests to determine hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*



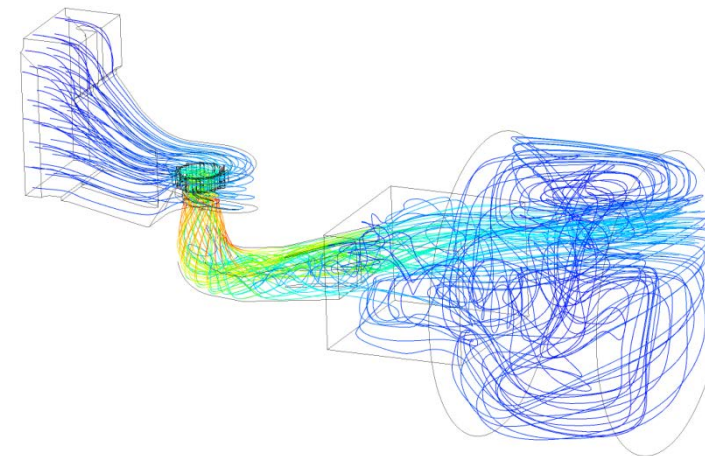
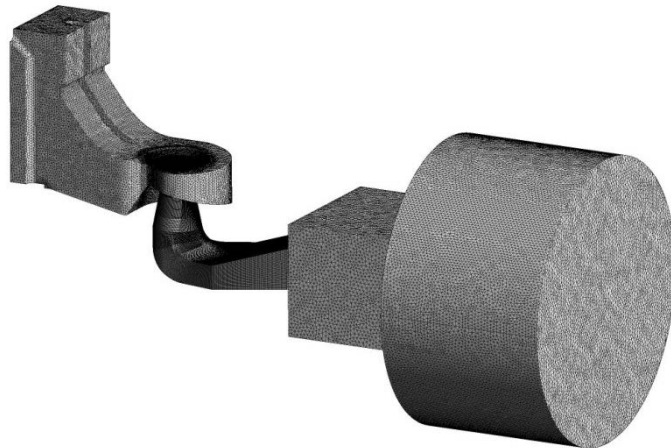
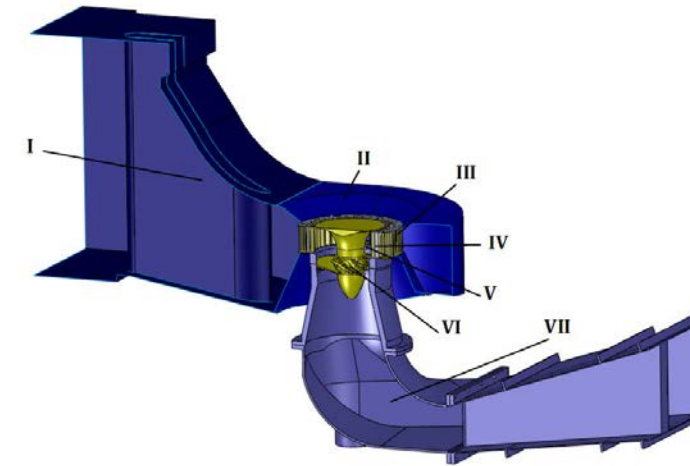
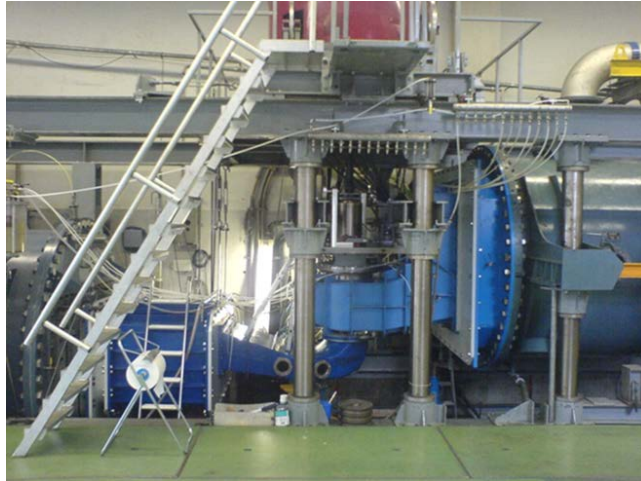
# Standardni pristup - eksperimentalna ispitivanja na terenu (u maloj hidroelektrani)

IEC 62006:2010-10 - Hydraulic machines - Acceptance tests of small hydroelectric installations



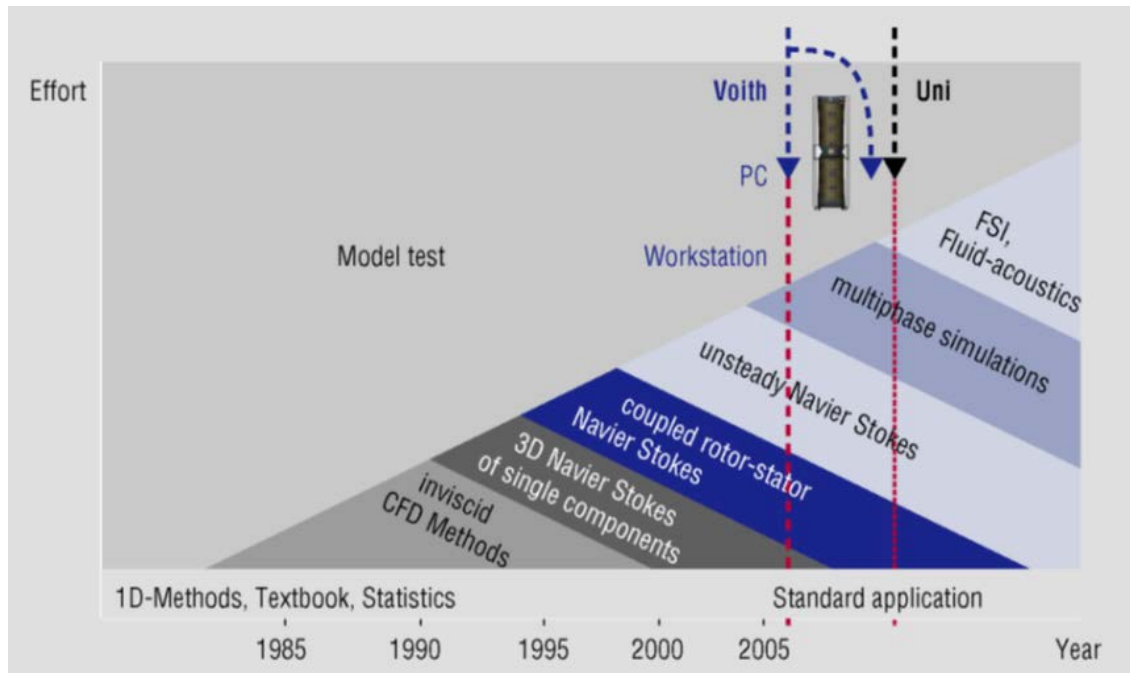


# Savremeni pristup – numeričke simulacije strujanja u modelu i prototipu



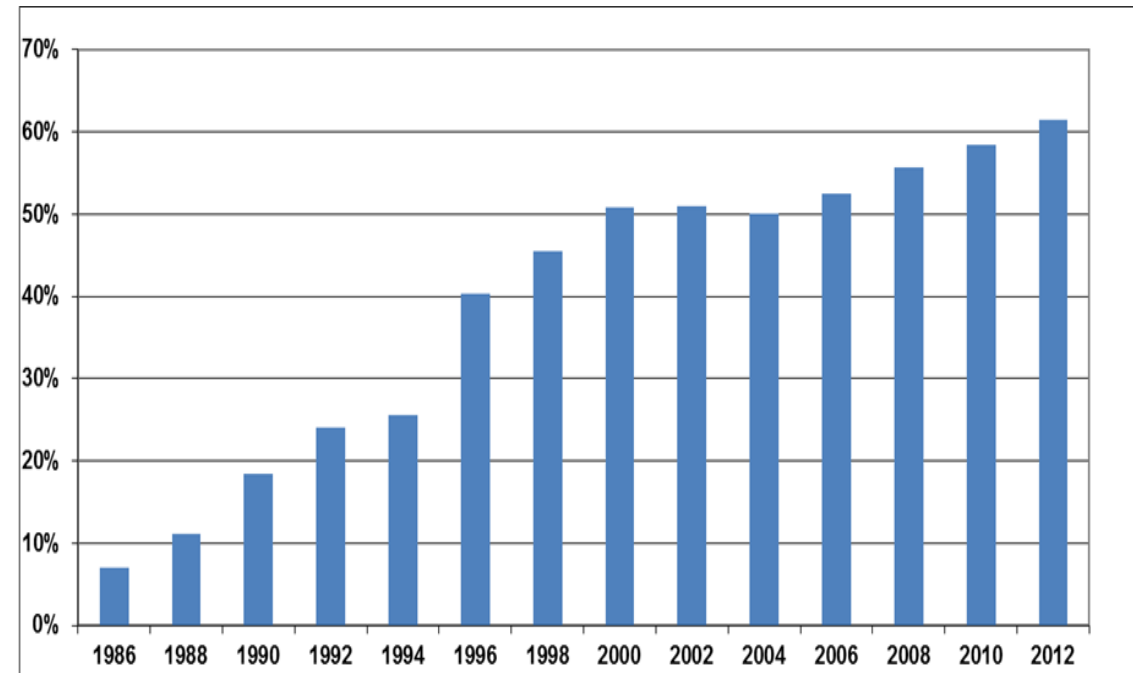
# Savremeni pristup – numeričke simulacije strujanja u modelu i prototipu

## Trend primene CFD analiza

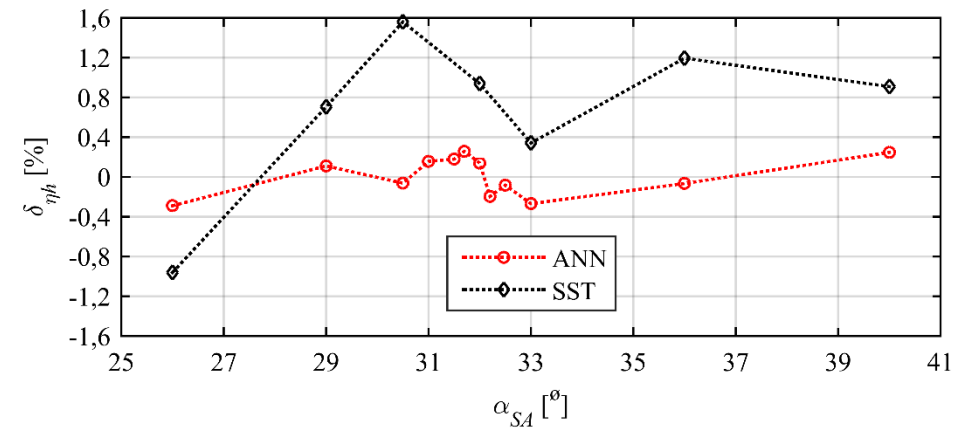
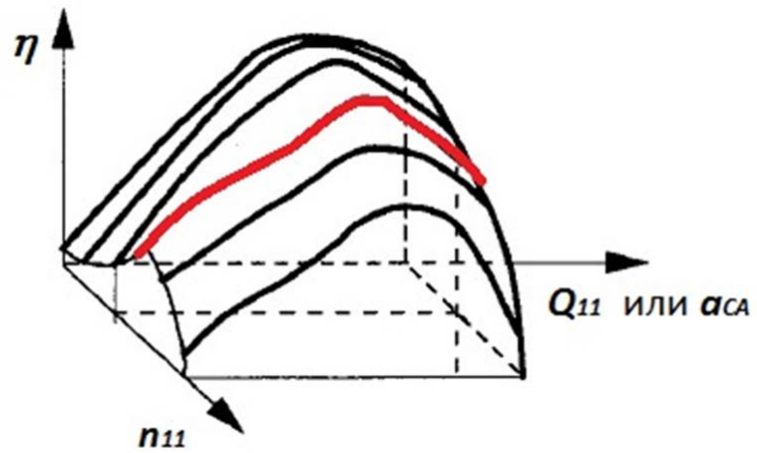
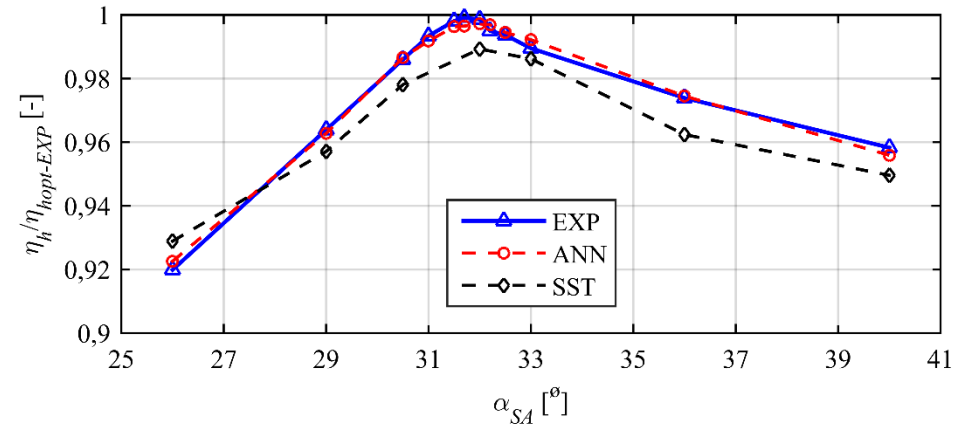
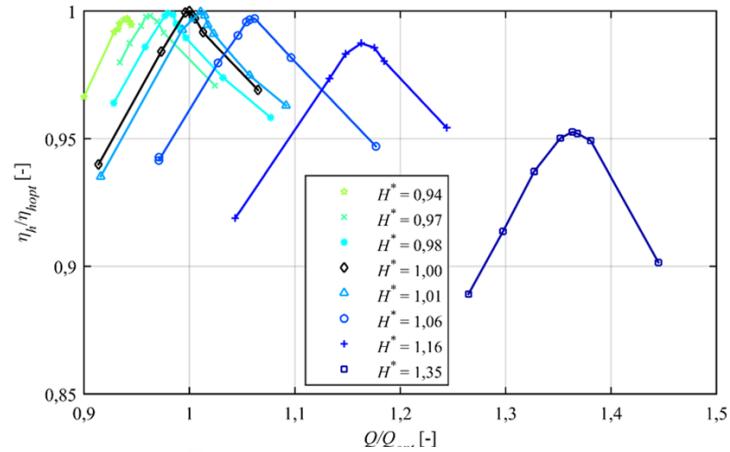


Kocon S.J. , Voith Hydro – USA, *An Overview of the Technical Challenges and the Methods Used to Overcome Them*, Hydropower – 2011

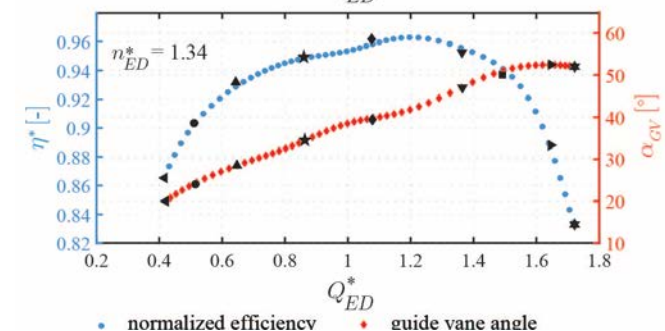
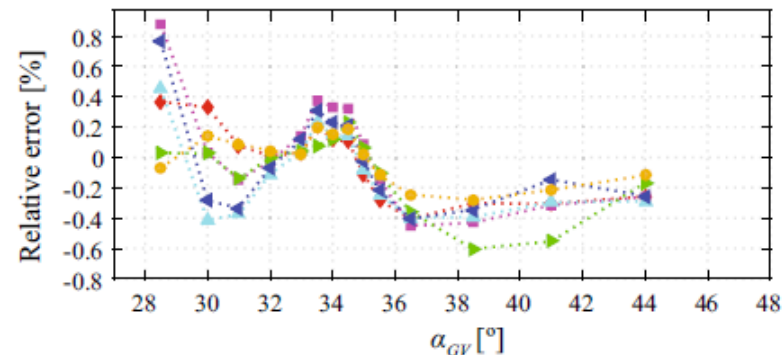
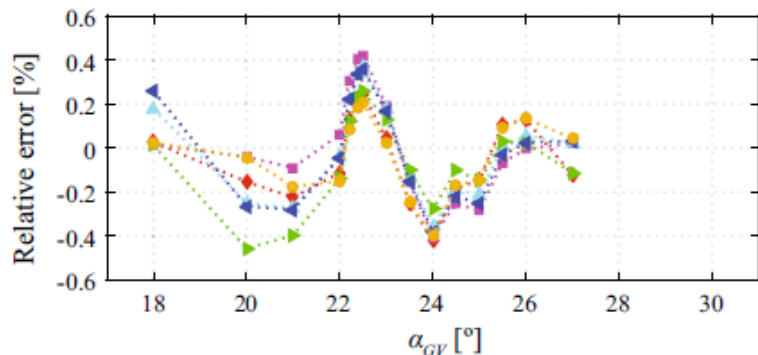
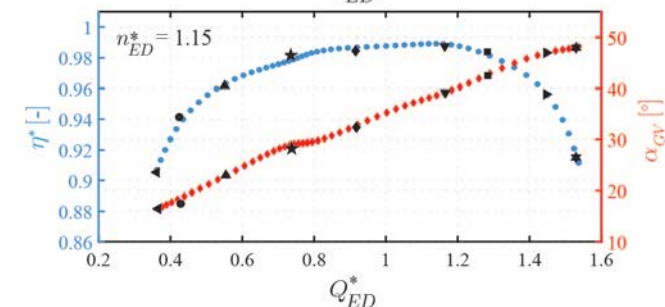
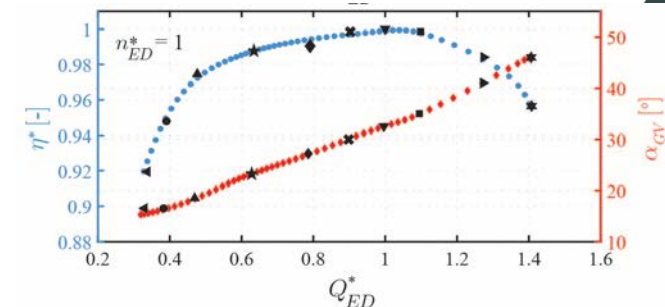
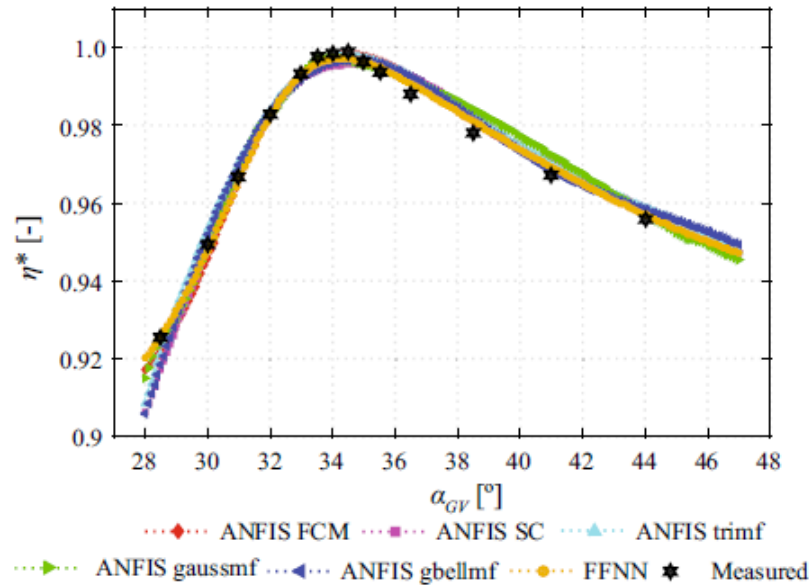
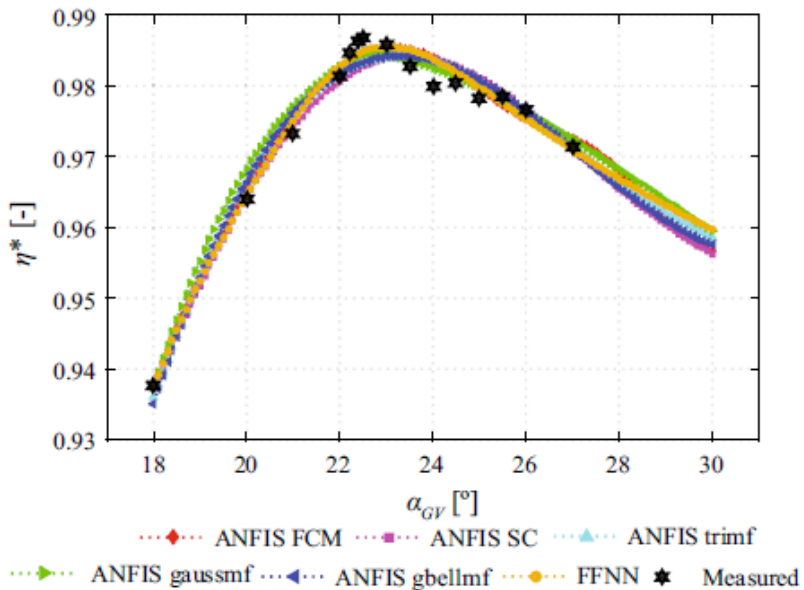
## Učešće radova sa CFD analizama na IAHR



# Savremeni pristup – primena veštačkih neuronskih mreža



# Savremeni pristup – primena veštačkih neuronskih mreža



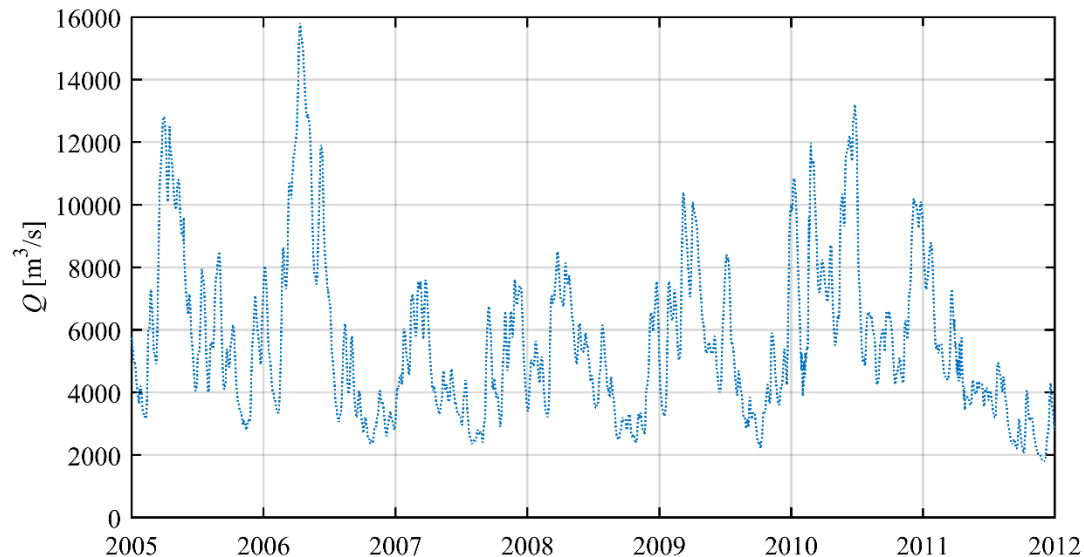
Jovanović, R., I. Božić, *Feedforward Neural Network and ANFIS Based Approaches to Forecasting the Off-Cam Energy Characteristics of Kaplan Turbine*, Neural Computing and Applications, (2017)

Božić, I., R. Jovanović, *Prediction of Double-Regulated Hydraulic Turbine On-Cam Energy Characteristics by Artificial Neural Networks Approach*, FME Transactions, 44 (2016),

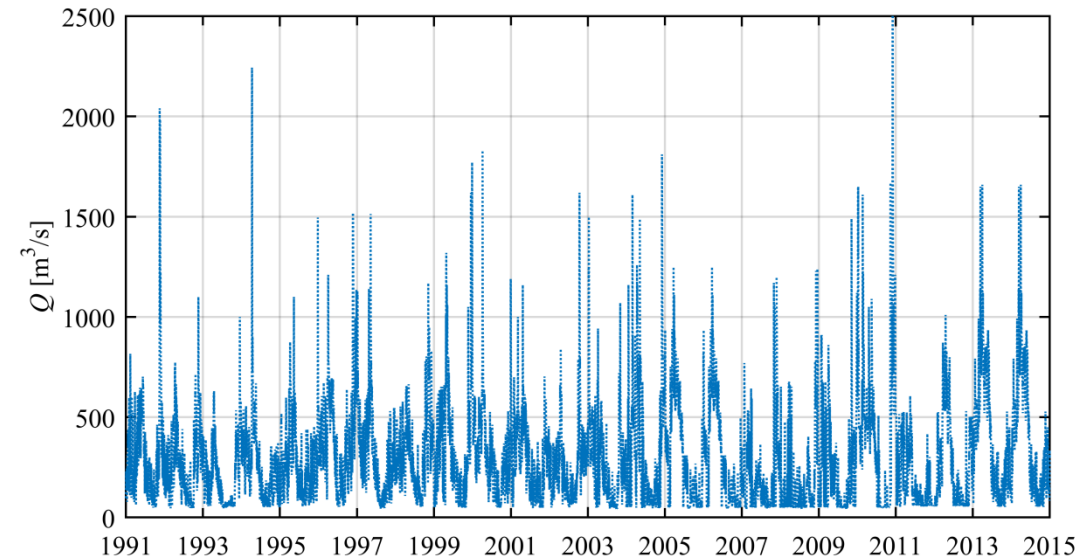


# Standardni pristup u određivanju protoka - hidrometrija

Hidrološki mereni podaci u uslovima prirodnih i delimično regulisanih režima protoka Dunava



Hidrološki mereni podaci u uslovima regulisanih režima protoka Drine nizvodno od HE Bajina Bašta



# Savremeni pristupi u određivanju protoka

**Savremena hidrologija** – savremeni pristupi:

- ✓ grafoanalitičke metode
- ✓ metode operativnog istraživanja (linearno i dinamičko programiranje)
- ✓ fazi metode
- ✓ metode neuronskih mreža
- ✓ statističke metode
- ✓ geostatističke metode
- ✓ numerički pristupi (mereni podaci, fizički modeli, hibridni modeli)

**Brojni simulacioni modeli:** FEQ (Full EQuations), RIBASIM (River Basin Si-mulation Model), AQUATOOL, MIKE HYDRO Basin, WASP (Water Quality Analysis Simulation Program), WEAP (Water Planning and Evaluation System) ...

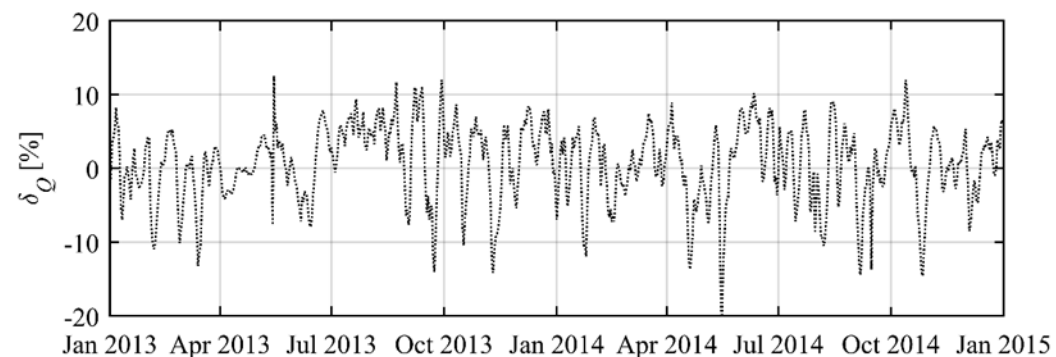
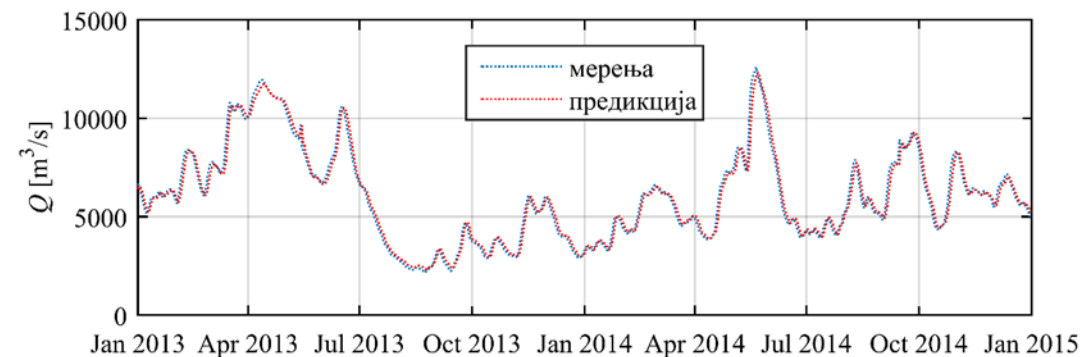
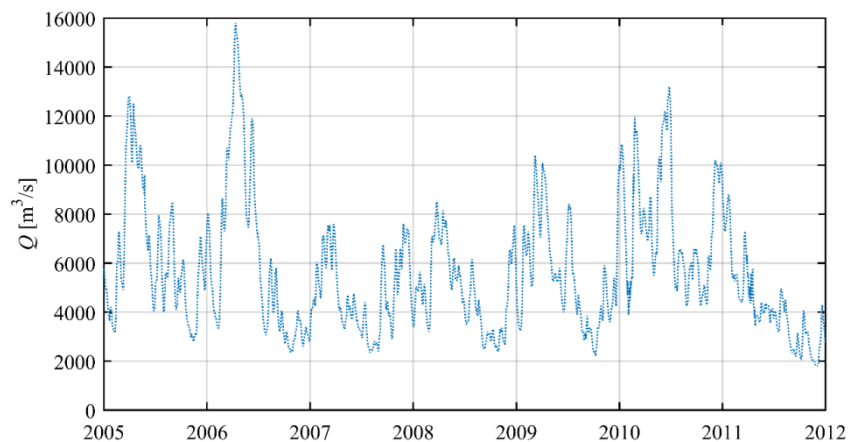
**Ekološki protok** – od velikog značaja za planere, projektante i korisnike hidrotehničkih sistema

Brojnost kriterijuma i raznovrsnost metoda – npr. jedan od razvijenih i primenjenih pouzdanih metoda za reke zapadnog Balkana je GEP metoda (*Đorđević, Dašić*)



## Savremeni pristupi u određivanju protoka – metode neuronskih mreža

Integralna vrednost protoka – dinamički vrlo promenljiva i zavisi od mnogih drugih stohastičkih veličina: padavine, isparavanja, oticaji, procurivanj



## Zaključna razmatranja\_1/2

Određivanje pouzdanih energetske karakteristika malih i velikih hidroelektrana u širokoj radnoj oblasti se zasniva na **opsežnim i detaljnim eksperimentalnim laboratorijskim ispitivanjima na modelu i ispitivanjima na terenu.**

Postojeći **standardi definišu** uslove, procedure i postupke merenja, mernu opremu, obradu i analizu rezultata merenja u zavisnosti od vrste zahtevanih ispitivanja.

Kompleksnost **skupih ispitivanja nameće stalnu potrebu za racionalizacijom** uslova pri kojima će se ispitivanja obaviti, a da se pri tome **ne ugrozi pouzdanost dobijenih karakteristika.**

U cilju brzih donošenja odluka, utvrđivanja trendova promena pojedinih parametara i smanjivanja direktnih i indirektnih troškova ispitivanja hidroelektrana **sve više se primenjuju savremeni numerički CFD eksperimenti i metode veštačkih neuronskih mreža.**



## Zaključna razmatranja\_2/2

Primene postojećih matematičkih modela i sprovođenje numeričkih eksperimenata za određivanje pojedinih energetske pokazatelja pokazuju svoje nesavršenosti u dobijenim rezultatima čija se pouzdanost mora verifikovati eksperimentalnim podacima, ali i prednosti u donošenju kvalitativnih ocena.

Metode veštačke inteligencije imaju sposobnost samoučenja na osnovu postojećih eksperimentalnih podataka između kojih ne mora da postoji jasna matematička veza, te svoju dominantnu primenu potvrđuju u predikcijama karakteristika agregata u nemeranim radnim režimima, kao i u predviđanju budućih energetske događaja poput proizvodnje električne energije u HE.

Preimućstvo u istraživanju energetske karakteristika i dalje je na strani eksperimentalnih ispitivanja, ali savremeni pristupi itekako mogu da posluže smanjivanju obima ispitivanja.

Racionalizacija ima pozitivne efekte na ekonomičnost i brzinu određivanja energetske karakteristika, dok kvalitet, sveobuhvatnost i upotrebljivost dobijenih rezultata vode ka optimizaciji eksploatacije kako samog agregata tako i celog hidropostrojenja.



# HVALA NA PAŽNJI!

v. prof. dr Ivan Božić – [ibozic@mas.bg.ac.rs](mailto:ibozic@mas.bg.ac.rs)

Katedra za hidraulične mašine i energetske sisteme  
Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet

v. prof. dr Radiša Jovanović – [rjovanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:rjovanovic@mas.bg.ac.rs)

Katedra za automatsko upravljanje  
Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet