

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Poslijediplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

Doktorska disertacija

MODEL STROJNOG UČENJA ZA ODREĐIVANJE
EKSPONENTA CURENJA N1 NA VODOOPSKRBNIM
SUSTAVIMA

Igor Dundović, univ. spec. aedif.

Osijek, [mjesec i godina obrane]. godine

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek
Postgraduate University Study Programme in Civil Engineering

Doctoral dissertation

MACHINE LEARNING MODEL FOR DETERMINING
THE N1 LEAKAGE EXPONENT ON WATER
DISTRIBUTION SYSTEMS

Igor Dundović, univ. spec. aedif.

Osijek, [mjesec i godina obrane]

Prosudbena povjerenstva i bibliografski podatci

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorske disertacije

[imena članova povjerenstva za prihvaćanje teme, naziv sjednice i datum — po imenovanju; tema prihvaćena na sjednici Fakultetskog vijeća 14. 1. 2025. — potvrditi točan navod]

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije

[imena članova povjerenstva za ocjenu, sjednica i datum — po imenovanju]

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije

[imena članova povjerenstva za obranu, sjednica i datum — po imenovanju]

Datum obrane: [datum obrane]

Bibliografski podatci

Doktorska disertacija sadržava 229 stranica, 11 ilustracija, 23 tablice, 4 dodatka i 94 citirane publikacije.

Mentorica doktorske disertacije je prof. dr. sc. Marija Šperac, dipl. ing. građ.

Istraživanje provedeno u okviru ove doktorske disertacije pripada znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo.

Izjava

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je doktorska disertacija isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno prepisan iz necitiranog rada te kako nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem kako nisam prijavio doktorsku disertaciju s istovjetnom temom na drugom studiju Sveučilišta ili na drugom sveučilištu.

U Osijeku, **[datum]**

Potpis: _____

Igor Dundović

Predgovor

Ova doktorska disertacija bavi se praktičnim problemom odnosa tlaka i curenja u vodoopskrbnim sustavima. Taj odnos definiran je eksponentom curenja $N1$ — veličinom koja prema FAVAD metodologiji određuje koliko će smanjenje tlaka smanjiti stvarne gubitke vode. Isti služi kao vodilja za donošenje investicijske odluke o upravljanju tlakom u svakoj mjernoj zoni, a njegovo izravno mjerenje zahtijeva skup i organizacijski zahtjevan noćni test tlačnih koraka uz ugradnju ventila za redukciju tlaka, stoga se u praksi umjesto mjerenja gotovo redovito poseže za paušalnim literaturnim vrijednostima. Disertacija taj raskorak razrješava razvojem modela strojnog učenja koji eksponent $N1$ određuje analitički, iz podataka koje operater već posjeduje nakon rutinske mjerne kampanje. Na međunarodnoj bazi od 217 terenskih testova tlačnih koraka u 172 mjerne zone triju država razvijen je i pod strogom, po zonama grupiranom validacijom provjeren konačni model — ponderirana linearna regresija s jednim ulazom i validiranom točnošću $MAE = 0,230$ — isporučen s pragom primjene, intervalom predviđanja i dvorazinskom shemom procjene te operacionaliziran u proračunskom kalkulatoru i programskom modulu. Rezultati su namijenjeni inženjerima, konzultantima i projektantima, kojima omogućuju rangiranje zona za upravljanje tlakom preko cijelog portfelja bez ijednog dodatnog terenskog mjerenja, ali i istraživačkoj zajednici, kojoj disertacija ostavlja kritički kontroliranu bazu, protokolarni pojas tlačnog koraka od 15 do 35 % za pouzdano terensko određivanje eksponenta te dijagnozu uvjetne uloge cijevnog materijala — nalaze čija vrijednost nadilazi konkretni model.

[zahvale — mentorici, povjerenstvima, ustanovama koje su ustupile podatke, obitelji]

Sažetak

EkspONENT curenja N_1 prema FAVAD metodologiji kvantificira osjetljivost stvarnih gubitaka vodoopskrbnog sustava na promjenu tlaka ($L_1/L_0 = (P_1/P_0)^{N_1}$) i time izravno određuje ekonomsku opravdanost upravljanja tlakom u pojedinoj mjernoj zoni — prepolovljenje tlaka smanjuje istjecanje za približno 29 % pri $N_1 = 0,5$, a za 82 % pri $N_1 = 2,5$. Njegovo izravno određivanje, međutim, zahtijeva noćni terenski test tlačnih koraka uz ugradnju ventila za redukciju tlaka — zahvat toliko zahtjevan da se u operativnoj praksi provodi iznimno, stoga investicijske odluke u pravilu počivaju na paušalnim pretpostavkama. U disertaciji je razvijen postupak analitičkog određivanja eksponenta N_1 iz podataka standardne mjerne kampanje, bez terenskog testa, primjenom metoda strojnog učenja.

Empirijsku osnovu istraživanja čini objedinjena međunarodna baza od 217 zapisa terenskih testova tlačnih koraka u 172 mjerne zone u Ekvadoru, Južnoafričkoj Republici i Kanadi, sistematizirana u jedinstvenu relacijsku shemu s oznakama kvalitete svakoga zapisa. Kriitička evaluacija kvalitete provedena je na tri razine: filtrom fizikalne vjerodostojnosti (13 % terenskih rezultata daje fizikalno nemoguće vrijednosti), sustavnim otkrivanjem pravila kvalitete (pouzdanost izmjerenog eksponenta raste s intenzitetom signala gubitaka, a ne s tlakom) i težinskim vrednovanjem pouzdanosti mjerenja. Metodološki okvir obuhvaća usporedbu šest obitelji algoritama strojnog učenja pod unakrsnom validacijom grupiranom po mjernim zonama, naivne referentne modele, trianguliran odabir značajki te ponderiranje učenja s ispravkom za poznatu pristranost mjernih podataka. Optimizacijom je ulazni prostor sveden s trinaest kandidatskih parametara na jednu izvedenu značajku — specifičnu gustoću stvarnih gubitaka normaliziranu tlakom LD (engl. *leakage density*) — koja objedinjuje tri izvorna podatka: noćni protok stvarnih gubitaka L_0 , duljinu glavnih cjevovoda L_m i prosječni zonski tlak P_0 — bez statistički značajnoga gubitka točnosti.

Konačni model v4.0, ponderirana linearna regresija $N_1 = 1,3375 - 0,2187 \cdot \ln(1 + 100 \cdot LD)$ uz ograničenje na fizikalni raspon $[0,50, 1,50]$, postiže na kvalitetno filtriranim podacima validiranu točnost $MAE = 0,230$ uz gotovo nultu sustavnu pristranost (64 % predikcija unutar $\pm 0,25$; 90 % unutar $\pm 0,50$), s 80-postotnim intervalom predviđanja i dvorazinskom shemom procjene. Zone s dostatnim signalom gubitaka dobivaju validiranu statističku procjenu, a zone malih gubitaka jasno označenu teorijsku procjenu iz krivulje gornje granice eksponenta prema materijalu cijevi. Validacija izostavljanjem po jedne države i klusterski eksperiment proveden bez uporabe državnih oznaka pokazali su da je granica valjanosti modela pokrivenost domene

u prostoru intenziteta gubitaka, a ne geografija. Uz model, istraživanje je dalo tri samostalna znanstvena doprinosa: protokolarni pojas relativnoga tlačnog koraka od 15 do 35 % za pouzdano i nepristrano terensko određivanje eksponenta, kontroliranu dijagnozu triju čimbenika zbog kojih mreže sa 100 % plastičnih cijevi ne dosežu teorijski eksponent te nalaz da cijevni materijal djeluje kao uvjetna gornja granica eksponenta, a ne kao aditivan parametar. Model je operacionaliziran u proračunskom kalkulatoru i programskom modulu te dopunjen protokolom kontinuirane rekalkulacije kojim svako puštanje redukcijaskog ventila u pogon proširuje empirijsku osnovu modela. Time eksponent N1 od skupo mjerene ili paušalno pretpostavljane veličine postaje analitički određiva značajka svake zone u portfelju, čime se potreba za terenskim testovima tlačnih koraka u planerskoj primjeni uklanja, a u investicijski osjetljivim slučajevima racionalizira.

Ključne riječi

eksponent curenja N1, FAVAD, gubici vode, upravljanje tlakom, vodoopskrbni sustav, strojno učenje, mjerna zona, test tlačnih koraka, infrastrukturni indeks curenja

Abstract

The $N1$ leakage exponent of the FAVAD methodology quantifies the sensitivity of a water distribution system's real losses to pressure change ($L_1/L_0 = (P_1/P_0)^{N1}$) and thereby directly governs the economic justification of pressure management in each district metered area: halving the pressure reduces leakage by approximately 29 % at $N1 = 0.5$, but by 82 % at $N1 = 2.5$. Its direct determination, however, requires a night-time pressure step test with an installed pressure reducing valve — an intervention so demanding that it is rarely performed in operational practice, so investment decisions typically rest on blanket assumptions. This dissertation develops a procedure for the analytical determination of the $N1$ exponent from standard measurement-campaign data, without field testing, using machine learning methods.

The empirical basis is a consolidated international database of 217 field pressure step test records from 172 district metered areas in Ecuador, South Africa and Canada, systematised into a single relational schema with quality flags on every record. Data quality was critically appraised on three levels: a physical plausibility filter (13 % of field results yield physically impossible values), systematic discovery of quality rules (the reliability of a measured exponent scales with leakage signal intensity, not with pressure), and measurement reliability weighting. The methodological framework comprises a comparison of six machine learning algorithm families under cross-validation grouped by metered zones, naive baselines, triangulated feature selection, and bias-aware training weights. Optimisation reduced the input space from thirteen candidate parameters to a single derived feature — the leakage density LD , a pressure-normalised specific real-loss density, combining three source data items: night flow L_0 , mains length L_m and average zone pressure P_0 — with no statistically significant loss of accuracy.

The final model v4.0, a weighted linear regression $N1 = 1.3375 - 0.2187 \cdot \ln(1 + 100 \cdot LD)$ clipped to the physical range $[0.50, 1.50]$, achieves a validated accuracy of $MAE = 0.230$ with practically zero systematic bias on quality-filtered data (64 % of predictions within ± 0.25 ; 90 % within ± 0.50), an 80 % prediction interval, and a two-tier estimation scheme: zones with sufficient leakage signal receive a validated statistical estimate, while low-loss zones receive a clearly labelled theoretical estimate from the material upper-bound curve. Leave-one-country-out validation and a clustering experiment performed without country labels showed that the model's validity boundary is domain coverage in loss-intensity space, not geography. Beyond the model, the research produced three independent scientific contributions: a protocol band of 15 to 35 % relative pressure step for reliable and unbiased field determination of the exponent,

a controlled diagnosis of the three factors that keep networks with 100 % plastic pipes below the theoretical exponent, and the finding that pipe material acts as a conditional upper bound on the exponent rather than an additive parameter. The model is operationalised in a spreadsheet calculator and a stand-alone software module, and complemented by a continuous recalibration protocol whereby every pressure reducing valve commissioning extends the model's empirical basis. The N1 exponent thus turns from an expensively measured or blanket-assumed quantity into an analytically determinable attribute of every zone in the portfolio, removing the need for pressure step tests in planning applications and rationalising it in investment-critical cases.

Key words

N1 leakage exponent, FAVAD, water losses, pressure management, water distribution system, machine learning, district metered area, pressure step test, infrastructure leakage index

Sadržaj

Prosudbena povjerenstva i bibliografski podatci	iii
Izjava	iv
Predgovor	vi
Sažetak	vii
Abstract	ix
Sadržaj	xi
Popis ilustracija	xiv
Popis tablica	xv
Popis kratica i simbola	xvi
1. Uvod	1
1.1. Motivacija i definicija problema	1
1.2. Predmet istraživanja	3
1.3. Hipoteze istraživanja	4
1.4. Ciljevi istraživanja	5
1.4.1. Opći i specifični ciljevi	5
1.4.2. Pristup provjeri hipoteza	6
1.5. Znanstveni doprinos	7
1.6. Struktura disertacije	8
2. Teorijske osnove	10
2.1. Gubici vode u vodoopskrbnim sustavima	10
2.2. Odnos tlaka i curenja	15
2.2.1. Koncept FAVAD (Fixed and Variable Area Discharge)	15
2.2.2. Eksponent curenja N1 — definicija i fizikalno značenje	19
2.2.3. Utjecaj materijala cijevi i geometrije pukotine	23
2.3. Terensko određivanje eksponenta N1 (metoda koraka tlaka, PRV)	28
2.4. Strojno učenje — osnovni pojmovi relevantni za rad	34
3. Pregled dosadašnjih istraživanja	40
3.1. Terenska istraživanja eksponenta N1	40
3.2. Modeliranje i primjena eksponenta N1 / FAVAD	51
3.3. Strojno učenje u vodoopskrbnim sustavima	62
3.3.1. Predviđanje puknuća i otkrivanje curenja	64
3.3.2. Predviđanje potrošnje i potražnje	68
3.3.3. Otkrivanje anomalija i kvaliteta vode	70
3.4. Istraživačka praznina	72
4. Metodologija	76

4.1. Pregled istraživačkog postupka	76
4.2. Prikupljanje i opis podataka	80
4.2.1. Izvori terenskih podataka	81
4.2.2. Opis baze podataka.....	83
4.2.3. Filtriranje i kontrola kvalitete podataka	87
4.3. Metodološki okvir modeliranja	91
4.3.1. Unakrsna validacija grupirana po DMA zonama	92
4.3.2. Isključivanje varijabli koraka tlaka	94
4.3.3. Osnovne (naivne) referentne vrijednosti	95
4.3.4. Odabir značajki	97
4.3.5. Težinsko vrednovanje pouzdanosti mjerenja	101
4.3.6. Odabir mjere uspješnosti (MAE)	104
4.4. Usporedba algoritama	107
5. Razvoj i rezultati modela.....	115
5.1. Razvoj modela (v1 → v4.0)	115
5.2. Konačni model v4.0	124
5.2.1. Oblik modela i jednadžba.....	124
5.2.2. Uspješnost i intervali predviđanja	127
5.2.3. Dvorazinska shema procjene (razina 1 / razina 2)	134
5.3. Granice generalizacije	138
5.3.1. Provjere prenosivosti.....	138
5.3.2. Domenske granice primjene.....	142
5.4. Popratni znanstveni doprinosi	143
5.4.1. Materijal cijevi kao uvjetna gornja granica eksponenta.....	146
5.4.2. Dijagnoza zona sa 100 % plastičnih cijevi.....	151
5.4.3. Protokol koraka tlaka 15–35 %	155
6. Rasprava	160
6.1. Provjera hipoteza.....	160
6.2. Znanstveni doprinos u odnosu na dosadašnja istraživanja.....	167
6.3. Praktična primjena.....	173
6.3.1. Alati za primjenu	174
6.3.2. Primjena na razini zone i portfelja	176
6.3.3. Protokol kontinuirane rekalkibracije i uvođenje u praksu	178
6.4. Ograničenja istraživanja.....	179
7. Zaključak.....	184
7.1. Glavni nalazi i doprinos	184
7.2. Preporuke i smjernice za daljnja istraživanja	189

Dodaci	194
Literatura	204
Životopis.....	214

Popis ilustracija

Slika 2.1. Standardna bilanca vode prema IWA metodologiji.....	29
Slika 2.2. Shema FAVAD koncepta.....	35
Slika 2.3. Osjetljivost smanjenja istjecanja na vrijednost eksponenta N1	38
Slika 2.4. Shema noćnog testa tlačnih koraka.....	51
Slika 4.1. Dijagram tijeka istraživačkog postupka.....	96
Slika 4.2. Histogram izmjerenih vrijednosti eksponenta N1 u bazi (217 zapisa)	104
Slika 4.3. Točnost modela po broju uključenih značajki — postupno uključivanje pod grupiranom unakrsnom validacijom.....	118
Slika 5.1. Predviđeni naspram izmjerenog eksponenta N1 izvan preklopa (188 zapisa, 80-postotni interval predviđanja).....	146
Slika 5.2. Dvorazinska shema procjene — granična krivulja materijala i domena statističkog modela	153
Slika 5.3. Izmjereni eksponent N1 naspram udjela plastičnih cijevi s teorijskom FAVAD krivuljom i pojasom prihvatanja ± 16 %	165
Slika 5.4. Dijagnoza zona sa 100 % plastičnih cijevi (dubina koraka, ILI, države)	170

Popis tablica

Tablica 2.1. Kategorije učinkovitosti upravljanja stvarnim gubicima prema vrijednosti ILI pokazatelja (matrica Svjetske banke).....	32
Tablica 2.2. Pregled tipičnih vrijednosti eksponenta N1 po materijalu cijevi i tipu otvora istjecanja.....	44
Tablica 3.1. Pregled terenskih i laboratorijskih istraživanja eksponenta N1	58
Tablica 3.2. Pregled modeliranja i primjena eksponenta N1 / FAVAD	76
Tablica 3.3. Pregled primjena strojnog učenja u vodoopskrbnim sustavima po području primjene.....	81
Tablica 4.1. Zapisi terenskih testova tlačnih koraka po državama.....	99
Tablica 4.2. Opis baze podataka — varijable, jedinice i izvor.....	102
Tablica 4.3. Kriteriji filtra kvalitete i broj isključenih zapisa	106
Tablica 4.4. Naivne referentne vrijednosti pod grupiranim validacijskim protokolom.....	114
Tablica 4.5. Eksperiment postupanja s nepouzdanim zapisima — ponderiranje naspram uklanjanja	121
Tablica 4.6. Obitelji algoritama u usporedbi — ključne postavke pretrage i uloga svake obitelji.....	125
Tablica 4.7. Pregled statističkih, analitičkih i metoda strojnog učenja korištenih u istraživanju	130
Tablica 5.1. Usporedna evaluacija kandidatskih ulaza pod grupiranom unakrsnom validacijom	135
Tablica 5.2. Razvoj modela v1 → v4.0 — povod, ulazi, formula i validirana točnost svake verzije	138
Tablica 5.3. Validacijske statistike izvan preklopa po podskupovima	147
Tablica 5.4. Rezultati validacije izostavljanjem po jedne države	157
Tablica 5.5. Eksperimenti provjere generalizacije	160
Tablica 5.6. Konsenzusni poredak važnosti kandidatskih parametara sa smjerom veze i hidrauličkom interpretacijom	162
Tablica 5.7. Usporedba modela na teorijski konzistentnom podskupu pod validacijom izostavljanja po jedne zone	166
Tablica 6.1. Sažetak provjere hipoteza (H1–H3): formulacija, dokazna građa, ključni kvantitativni pokazatelji, status potvrde.....	183
Tablica 6.2. Scenariji praktične primjene.....	196
Tablica D.1. Opisna statistika ulaznih podataka po državama i ukupno.....	213
Tablica D.2. Potpuni ispis očišćene baze terenskih testova tlačnih koraka (217 zapisa).....	215

Popis kratica i simbola

Kratice

Kratika	Značenje
AMI	napredna mjerna infrastruktura (engl. <i>Advanced Metering Infrastructure</i>)
ANN	umjetna neuronska mreža (engl. <i>Artificial Neural Network</i>)
ANP	aktivna noćna populacija (engl. <i>Active Night Population</i>)
ARIMA	engl. <i>AutoRegressive Integrated Moving Average</i>
AZP	prosječni zonski tlak (engl. <i>Average Zone Pressure</i>)
BABE	komponentna analiza stvarnih gubitaka (engl. <i>Bursts and Background Estimates</i>)
CARL	tekući godišnji stvarni gubici (engl. <i>Current Annual Real Losses</i>)
CART	stabla klasifikacije i regresije (engl. <i>Classification and Regression Trees</i>)
DMA	mjerna zona (engl. <i>District Metered Area</i>)
FAVAD	engl. <i>Fixed and Variable Area Discharge</i>
GIS	geografski informacijski sustav
ICF	faktor stanja infrastrukture
ILI	infrastrukturni indeks curenja (engl. <i>Infrastructure Leakage Index</i>)
IWA	Međunarodna udruga za vode (engl. <i>International Water Association</i>)
LASSO	engl. <i>Least Absolute Shrinkage and Selection Operator</i>
MAE	srednja apsolutna pogreška (engl. <i>Mean Absolute Error</i>)
MAR	engl. <i>Missing At Random</i>
MCAR	engl. <i>Missing Completely At Random</i>
MNAR	engl. <i>Missing Not At Random</i>
MNF	minimalni noćni protok (engl. <i>Minimum Night Flow</i>)
NDF	faktor noć–dan (engl. <i>Night-Day Factor</i>)
NRW	neprihodovana voda (engl. <i>Non-Revenue Water</i>)
OLS	obični najmanji kvadrati (engl. <i>Ordinary Least Squares</i>)
PMZ	zona upravljanja tlakom (engl. <i>Pressure Management Zone</i>)
PRISMA	engl. <i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
PRV	ventil za redukciju tlaka (engl. <i>Pressure Reducing Valve</i>)
RMSE	korijen srednje kvadratne pogreške (engl. <i>Root Mean Square Error</i>)
SARIMA	sezonski ARIMA
SCADA	sustav nadzora, upravljanja i prikupljanja podataka (engl. <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>)
SVM	metoda potpornih vektora (engl. <i>Support Vector Machine</i>)
UARL	neizbježni godišnji stvarni gubici (engl. <i>Unavoidable Annual Real Losses</i>)
WLS	ponderirani najmanji kvadrati (engl. <i>Weighted Least Squares</i>)

Simboli

Simbol	Značenje	Jedinica
N_1	eksponent curenja (FAVAD)	—
L_0	noćni protok stvarnih gubitaka pri osnovnom tlaku	l/s
L_1	noćni protok stvarnih gubitaka nakon tlačnog koraka	l/s
P_0	prosječni tlak zone pri osnovnom stanju	m
P_1	prosječni tlak zone nakon tlačnog koraka	m
ΔP	promjena tlaka pri tlačnom koraku	m
L_m	duljina glavnih cjevovoda	km
N_c	broj kućnih priključaka	—
L_p	ukupna duljina privatnih priključnih cjevovoda	km
P	prosječni radni tlak	m
Q	protok istjecanja	l/s
Q_{rl}	protok stvarnih gubitaka (engl. <i>real losses</i>); u nazivima stupaca izvorne baze zadržan je zatečeni zapis Q_{lr}	l/s
Q_{rl}/km	stvarni gubici po kilometru mreže (stupac baze: Q_{lr}/km)	l/s/km
Q_{rl}/SC	stvarni gubici po priključku (stupac baze: Q_{lr}/SC)	l/s/priključku
$Q_{lr}/\text{km}/P$	stvarni gubici po kilometru mreže po metru tlaka (stupac baze podataka; u tekstu: LD)	l/s/km/m
LD	specifična gustoća stvarnih gubitaka normalizirana tlakom (engl. <i>leakage density</i>); definirana u pogl. 4.2.2, jedn. (4.1)	l/s/km/m
WL	gubici vode kao udio ulaza u sustav	%
ILI	infrastrukturni indeks curenja (CARL/UARL)	—
h	tlačna visina na otvoru istjecanja	m
A	površina otvora istjecanja	m^2 (mm^2)
A_0	početna površina otvora istjecanja	m^2 (mm^2)
m	nagib odnosa tlaka i površine otvora	mm^2/m
m'	efektivni nagib odnosa tlaka i površine ($\text{Cd} \cdot \text{m}$)	mm^2/m
LN	broj curenja (engl. <i>Leakage Number</i>), $\text{LN} = m \cdot h / A_0$	—
Cd	koeficijent istjecanja	—
g	ubrzanje sile teže	m/s^2
MAE	srednja apsolutna pogreška	jedinica ciljne veličine
RMSE	korijen srednje kvadratne pogreške	jedinica ciljne veličine
R^2	koeficijent determinacije	—
r	Pearsonov koeficijent linearne korelacije	—

Simbol	Značenje	Jedinica
ρ	Spearmanov koeficijent korelacije ranga	—
p	p-vrijednost statističkog testa	—
n	broj zapisa (opažanja)	—
C	koeficijent istjecanja sustava u potencijskoj jednadžbi, jedn. (2.4)	—
a, b	koeficijenti zonske FAVAD jednadžbe, jedn. (2.11)	—
ρ_g	umnožak gustoće vode i ubrzanja sile teže, jedn. (2.12)	N/m^3
p_{kr}	udio krutih cijevi u mreži, jedn. (2.14) i (2.15)	%
C_o	koeficijent jednadžbe curenja s utjecajem tla, jedn. (3.1)	—
S	svojstvo tla u jedn. (3.1) (npr. srednji promjer zrna)	—
n_1, n_2	eksponenti tlaka i svojstva tla u jedn. (3.1)	—
$\bar{\rho}$	prosječna korelacija reziduala stabala ansambla, jedn. (4.5)	—
σ^2	varijanca predikcije pojedinačnog stabla, jedn. (4.5)	—
B	broj stabala u ansamblu, jedn. (4.5)	—

1. Uvod

1.1. Motivacija i definicija problema

Vodni gubici trajno su obilježje pogona vodoopskrbnih sustava i jedan od središnjih tehničkih, ekonomskih i okolišnih problema suvremenoga vodnog gospodarstva. Dio vode zahvaćene, obrađene i tlačene u distribucijsku mrežu nikada ne stigne do korisnika, nego istječe kroz puknuća cjevovoda, propusne spojeve i difuzno pozadinsko istjecanje. Procjena stvarnih gubitaka i njihovo iskazivanje standardiziranim pokazateljima učinka, poput infrastrukturnog indeksa curenja ILI (engl. *Infrastructure Leakage Index*), razvijeni su upravo zato da bi se opseg problema mogao objektivno kvantificirati i uspoređivati među sustavima (McKenzie i Seago, 2005; Winarni, 2009). Razmjeri problema nisu zanemarivi — na svjetskoj se razini gubici u distribucijskim mrežama tipično kreću u rasponu od 10 do 55 % ulaznog volumena sustava (Zhang i sur., 2024). Uz izravan gubitak resursa i prihoda, stvarni gubici povlače i nepotrebnu potrošnju energije. Naime, voda koja istekne iz mreže prethodno je zahvaćena, kondicionirana i tlačena crpkama, stoga se u analizama pogona i obnove distribucijskih mreža trošak energije crpljenja i trošak izgubljene vode iskazuju kao povezane sastavnice operativnog troška (Price i Ostfeld, 2014; Evangelista i sur., 2023). Otvori istjecanja ujedno predstavljaju potencijalne putove prodora onečišćenja u mrežu pri padovima tlaka (Mora-Rodríguez i sur., 2015; van Zyl i sur., 2017), zbog čega smanjivanje stvarnih gubitaka predstavlja prioritet upravljanja svakim vodoopskrbnim sustavom.

Među raspoloživim mjerama smanjenja stvarnih gubitaka upravljanje tlakom istaknuto je kao najpristupačniji i ekonomski najučinkovitiji prvi korak zato što smanjenje radnoga tlaka istodobno smanjuje protok kroz postojeće otvore istjecanja, smanjuje učestalost novih puknuća i produljuje vijek trajanja cjevovoda (Thornton, 2003; Lambert i Thornton, 2011; Samir i sur., 2017). Kvantitativna poluga te mjere jest odnos tlaka i istjecanja. Klasična hidraulika otvora, prema kojoj protok raste s korijenom tlaka, pokazala se nedostatnom za opis stvarnog ponašanja distribucijskih mreža — terenska i laboratorijska istraživanja dosljedno pokazuju da istjecanje u stvarnim sustavima reagira na promjenu tlaka znatno osjetljivije od teorijskoga korijena (Van Zyl i Clayton, 2007; Greyvenstein i Van Zyl, 2007). Taj je nesklad razriješen konceptom FAVAD (engl. *Fixed and Variable Area Discharge*), koji je uveo May (1994), prema kojem se dio otvora istjecanja — pukotine u plastičnim materijalima, zazori na spojevima — elastično širi s porastom tlaka, te se ukupno istjecanje sastoji od otvora nepromjenjive i otvora

promjenjive površine (Van Zyl i Malde, 2017; van Zyl i sur., 2017). Odnos gubitaka i tlaka tada poprima potencijalski oblik:

$$L_1/L_0 = (P_1/P_0)^{N_1} \quad (1.1)$$

U jedn. (1.1) eksponent curenja N_1 sažima cjelokupnu osjetljivost stvarnih gubitaka zone na promjenu tlaka (Van Zyl i Clayton, 2007; Lambert i sur., 2017).

Upravo eksponent N_1 čini razliku između zone u kojoj se upravljanje tlakom višestruko isplati i zone u kojoj ono daje tek skroman učinak. Terenske studije bilježe vrijednosti eksponenta u širokom rasponu, tipično od 0,5 do 2,79 uz medijan oko 1,15 (Van Zyl i Clayton, 2007; Greyvenstein i Van Zyl, 2007), pri čemu ista promjena tlaka proizvodi bitno različite uštede ovisno o vrijednosti eksponenta — prepolovljenje tlaka smanjuje istjecanje za približno 29 % pri $N_1 = 0,5$, za 50 % pri $N_1 = 1,0$, a za čak 82 % pri $N_1 = 2,5$ (Van Zyl i Clayton, 2007). U praktičarskoj aproksimaciji, postotno smanjenje curenja približno je jednako umnošku eksponenta N_1 i postotnog smanjenja prosječnog tlaka. Tako smanjenje tlaka od 10 % donosi uštedu gubitaka od približno 5 % u zoni s dominacijom puknuća ($N_1 \approx 0,5$), ali približno 15 % u zoni s dominacijom pozadinskog istjecanja ($N_1 \approx 1,5$) (Thornton, 2003). Eksponent N_1 stoga nije tek deskriptivna veličina, nego ulazni podatak investicijske odluke jer o njemu ovisi hoće li u pojedinoj mjernoj zoni (DMA, engl. *District Metered Area*) prednost dobiti ugradnja opreme za redukciju tlaka ili aktivno traženje i sanacija kvarova.

Problem nastaje pri određivanju eksponenta. Izravno, terenski utemeljeno mjerenje N_1 zahtijeva provedbu noćnog testa tlačnih koraka. U zoni se, u pravilu uz ugradnju ventila za redukciju tlaka (PRV, engl. *Pressure Reducing Valve*), tlak stupnjevito snižava u razdoblju minimalne noćne potrošnje, a iz izmjerenih parova istjecanja i tlaka prije i nakon koraka izračunava se eksponent (Deyi i sur., 2014; Dundović i Tadić, 2022; Jenks i sur., 2023). Takav je zahvat vremenski, organizacijski i financijski zahtjevan — traži noćni terenski rad, privremenu ili trajnu ugradnju regulacijske opreme, pouzdano mjerenje protoka i tlaka te pažljivu procjenu legitimne noćne potrošnje — zbog čega se u operativnoj praksi provodi iznimno; upravo je zahtjevnost klasičnog ispitivanja motivirala i razvoj mobilnih pristupa ispitivanju mjernih zona (Jenks i sur., 2023). Paradoksalno, veličina koja odlučuje o opravdanosti ulaganja u upravljanje tlakom u pravilu nije poznata upravo u trenutku kada se investicijska odluka donosi, nego se umjesto nje koriste teorijske ili iskustvene pretpostavke — u analizama upravljanja tlakom eksponent se nerijetko jednostavno pretpostavlja (Samir i sur.,

2017), a pretpostavka fiksnog, o tlaku neovisnog eksponenta ocijenjena je za opću primjenu u današnjim režimima upravljanja tlakom u osnovi nerealnom (Lambert i sur., 2017).

Iz toga raskoraka između odlučujuće važnosti eksponenta N1 i praktične nedostupnosti njegova mjerenja proizlazi motivacija ovoga istraživanja: razviti postupak analitičkog određivanja eksponenta N1 iz podataka koji su vodoopskrbnim operaterima rutinski dostupni, bez provedbe terenskog testa tlačnih koraka. Metode strojnog učenja, koje su u vodoopskrbnim sustavima već našle primjenu u predviđanju puknuća (Robles-Velasco i sur., 2021a, 2021b), otkrivanju i lociranju curenja (Yussif i sur., 2023; Sousa i sur., 2023) te predviđanju potrošnje (De Souza Groppo i sur., 2019), a čiji je razvoj u tom području sustavno pregledan u novijoj literaturi (Zuñiga-Urbe i sur., 2026), nude metodološki okvir za takav pristup. Primjena metoda umjetne inteligencije i ekspertnih sustava u građevinarstvu i komunalnoj hidrotehnici istražuje se i u domaćem znanstvenom okruženju (Obradović i sur., 2019; Grčić i Šperac, 2024), u koje se ovo istraživanje izravno nadovezuje. Pregledom dostupne literature, međutim, nije utvrđeno nijedno prijašnje istraživanje koje strojno učenje primjenjuje na određivanje eksponenta curenja N1 — i najnovija istraživanja strojnog učenja na razini mjernih zona usmjerena su na pitanje gdje se voda gubi, odnosno na detekciju i lokalizaciju curenja (Canivete i sur., 2026; Chatterjee i sur., 2026), a ne na karakterizaciju odziva gubitaka na promjenu tlaka. Upravo tu istraživačku prazninu ova disertacija nastoji popuniti.

1.2. Predmet istraživanja

Istraživanje pripada znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo, s težištem u hidrotehnici, odnosno u inženjerstvu vodoopskrbnih sustava.

Predmet istraživanja jest odnos tlaka i stvarnih gubitaka vode u mjernim zonama (DMA) vodoopskrbnih sustava, kvantificiran eksponentom curenja N1 prema FAVAD metodologiji, te mogućnost njegova analitičkog određivanja primjenom metoda strojnog učenja. Mjerna zona pritom označava hidraulički omeđen dio distribucijske mreže s mjerenim ulaznim protokom, koji suvremena praksa koristi kao osnovnu jedinicu praćenja i upravljanja vodnim gubicima; zone u kojima se tlakom aktivno upravlja u literaturi se razlikuju od zona namijenjenih isključivo mjerenju i kontroli curenja (Lambert i Thornton, 2011). U središtu je pozornosti pitanje mogu li se, i s kojom točnošću, iz podataka standardne mjerne kampanje — mjerenja protoka na ulazu u zonu, tlaka i iz njih izvedenih pokazatelja stvarnih gubitaka — odrediti vrijednosti eksponenta N1 koje bi inače zahtijevale terenski test tlačnih koraka. Kandidatski prostor ulaznih veličina pritom obuhvaća upravo one podatke koje vodoopskrbni operateri

rutinski posjeduju ili mogu izvesti iz postojećih evidencija: karakteristike mreže poput duljine cjevovoda te broja i gustoće priključaka, vrstu i udjele cijevnoga materijala, izmjerene količine istjecanja i tlakove te standardizirane pokazatelje učinka vodnih gubitaka.

Empirijsku osnovu istraživanja čini baza terenskih testova tlačnih koraka prikupljena iz stvarnih vodoopskrbnih sustava na tri kontinenta, koja obuhvaća 217 zapisa provedenih testova u 172 mjerne zone u Ekvadoru, Južnoafričkoj Republici i Kanadi, uz vlastita terenska iskustva autora u hrvatskim uvjetima (Dundović, 2017; Dundović i Tadić, 2022). Prikupljena građa pokriva širok raspon pogonskih i infrastrukturnih uvjeta — od zona s izrazito malim do zona s ekstremno velikim gubicima, od potpuno krutih do potpuno plastičnih cjevovodnih mreža — što predmet istraživanja smješta u realan, heterogen kontekst svjetske vodoopskrbne prakse, a ne u idealizirane laboratorijske uvjete.

Opseg istraživanja obuhvaća: kritičku analizu metodologije terenskog određivanja eksponenta $N1$ i kvalitete raspoloživih terenskih podataka; identifikaciju fizikalnih parametara vodoopskrbne mreže koji nose informaciju o eksponentu; optimizaciju, odnosno minimizaciju skupa parametara potrebnih za njegovo analitičko određivanje; te razvoj, usporedbu i vrednovanje matematičkih modela utemeljenih na strojnome učenju. Metodološki, istraživanje pripada nadziranomu učenju — eksponent $N1$, terenski izmjeren testom tlačnih koraka, služi kao ciljna veličina, a zadaća je modela naučiti njegovu vezu s dostupnim parametrima zone na način koji se prenosi na zone izvan skupa za učenje. Posebna se pozornost pritom posvećuje vjerodostojnosti vrednovanja — provjeri modela na mjernim zonama koje tijekom učenja nisu bile dostupne te isključivanju veličina koje bi u model unijele informaciju nedostupnu u trenutku primjene. Izvan opsega istraživanja ostaju hidrauličko modeliranje pojedinačnih otvora istjecanja na razini cijevi te aktivne metode otkrivanja i lociranja curenja; istraživanje se odnosi na agregiranu razinu mjerne zone kao osnovne upravljačke jedinice suvremenih vodoopskrbnih sustava.

1.3. Hipoteze istraživanja

Iz opisane motivacije i predmeta istraživanja proizlaze tri istraživačke hipoteze, prihvaćene odobrenim prijedlogom teme doktorske disertacije. One redom obuhvaćaju tri logički povezana koraka analitičkog određivanja eksponenta $N1$: definiranje i optimizaciju ulaznih parametara, dostižnu razinu preciznosti te izgradnju samih modela.

Hipoteza 1 (H1): Moguće je definirati i optimizirati parametre vodoopskrbne mreže potrebne za analitičko definiranje $N1$ eksponenta.

Hipoteza 2 (H2): Moguće je analitički definirati N1 eksponent s visokom razinom preciznosti u svrhu smanjenja ili potpunog uklanjanja potrebe za terenskim ispitivanjem.

Hipoteza 3 (H3): Moguće je izraditi nove matematičke modele definiranja eksponenta curenja N1 bazirane na strojnom učenju.

Hipoteze su međusobno komplementarne, ali ne i istovjetne — H1 se odnosi na informacijski sadržaj i strukturu ulaznoga prostora, H2 na kvantificiranu točnost analitičkog određivanja u odnosu na potrebe praktične primjene, a H3 na metodološku izvedivost i novost samih modela. Njihova se provjera stoga u disertaciji provodi zasebno, kako bi razlika u predmetu, dokaznoj građi i stupnju potvrde svake hipoteze bila jednoznačno vidljiva.

1.4. Ciljevi istraživanja

1.4.1. Opći i specifični ciljevi

U skladu s odobrenim prijedlogom teme, ciljevi istraživanja strukturirani su u opće ciljeve, koji obuhvaćaju prikupljanje, sistematizaciju i kritičku analizu empirijske građe te identifikaciju i optimizaciju relevantnih parametara, i specifični cilj, koji obuhvaća razvoj novih matematičkih modela analitičkog određivanja eksponenta N1.

Opći ciljevi istraživanja jesu:

1. Prikupljanje terenskih podataka izračuna eksponenta N1 na osnovi stvarnih eksperimenata na vodoopskrbnim sustavima diljem svijeta. Cilj je formirati bazu terenskih testova tlačnih koraka koja pokriva širok raspon infrastrukturnih, pogonskih i klimatskih uvjeta, jer je upravo heterogenost građe preduvjet generalizabilnosti. Model kalibriran isključivo na jednoj vodoopskrbnoj praksi neizbježno bi kodirao lokalne mjerne konvencije umjesto hidrauličke fizike.

2. Objedinjavanje i sistematizacija javno dostupnih i prikupljenih podataka terenskog ispitivanja eksponenta N1. Heterogene izvorne zapise potrebno je objediniti u jedinstvenu, analitički upotrebljivu shemu, uz strogu kontrolu mjernih jedinica, izvođenje standardiziranih pokazatelja učinka usporedivih među sustavima te dokumentiran i ponovljiv postupak obrade.

3. Kritičko sagledavanje metodologije terenskog ispitivanja i odabir pouzdanih podataka za daljnju analizu. Terenski izmjereni eksponenti podložni su mjernim pogreškama i sustavnim pristranostima ovisnima o protokolu ispitivanja; cilj je stoga definirati kriterije

fizikalne vjerodostojnosti i kvalitete mjerenja te postupak kojim se pouzdanost pojedinoga zapisa objektivno vrednuje prije uporabe u modeliranju.

4. Istraživanje potrebnih parametara za analitičko određivanje eksponenta N1.

Kandidatski prostor obuhvaća karakteristike mreže (duljinu cjevovoda, broj i gustoću priključaka), vrstu i udjele cijevnoga materijala, količinu istjecanja, tlakove te izvedene pokazatelje učinka vodnih gubitaka; cilj je utvrditi koji od tih parametara nose stvarnu informaciju o eksponentu.

5. Istraživanje utjecaja parametara na konačnu vrijednost eksponenta N1 u svrhu optimizacije broja potrebnih parametara. Cilj je kvantificirati marginalni doprinos svakoga parametra točnosti predviđanja te skup ulaznih parametara svesti na najmanji broj koji ne uzrokuje statistički značajan gubitak točnosti, čime se model približava podacima koje operateri stvarno posjeduju.

Specifični cilj istraživanja jest **razvoj i definiranje novih matematičkih modela određivanja eksponenta curenja N1 za učinkovitu analizu, predviđanje i upravljanje vodoopskrbnim sustavima bez potrebe provedbe terenskih ispitivanja**. Time se zaokružuje logički slijed općih ciljeva: od prikupljene i kritički vrednovane građe, preko identificiranih i optimiziranih parametara, do primjenjivih modela.

1.4.2. Pristup provjeri hipoteza

Provjera hipoteza provodi se zasebno za svaku od triju hipoteza, na zajedničkoj empirijskoj osnovi i pod jedinstvenim metodološkim okvirom vrednovanja, a njezini se rezultati sustavno iznose u 5. i 6. poglavlju disertacije.

Hipoteza H1 provjerava se analizom važnosti parametara provedenom trima neovisnim klasama metoda odabira značajki — filtarskim, ugrađenim i omotačkim — dopunjenima permutacijskom važnošću, te formalnom optimizacijom broja ulaznih parametara pod unakrsnom validacijom grupiranom po mjernim zonama. Hipoteza se smatra potvrđenom pokažu li te neovisne metode suglasno koji parametri nose informaciju o eksponentu N1 te uspije li se ulazni prostor svesti na mali broj parametara bez statistički značajnog gubitka točnosti.

Hipoteza H2 provjerava se kvantificiranjem točnosti analitičkog određivanja eksponenta na podacima koje modeli tijekom učenja nisu vidjeli, uz srednju apsolutnu pogrešku (MAE, engl. *Mean Absolute Error*) kao primarnu mjeru uspješnosti te uz analizu sustavne pristranosti i

udjela predviđanja unutar zadanih tolerancija. Postignuta razina preciznosti vrednuje se u odnosu na dvije referentne točke: naivne referentne modele, koje svaki smisleni model mora nadmašiti, i mjerni šum samih terenskih ispitivanja, koji postavlja gornju granicu smislene točnosti bilo kojega postupka kalibriranog na terenskim podacima. Hipoteza se smatra potvrđenom bude li postignuta preciznost dostatna za razlikovanje pogonskih režima zone o kojima ovisi investicijska odluka u upravljanju tlakom.

Hipoteza H3 provjerava se razvojem i usporednim vrednovanjem modela više obitelji algoritama strojnog učenja — od linearnih regresijskih oblika s regularizacijom do nelinearnih metoda ansambla — unutar cjelovitog metodološkog okvira koji obuhvaća unakrsnu validaciju grupiranu po mjernim zonama, isključivanje varijabli koje bi uzrokovale cirkularnost, naivne referentne modele te vrednovanje pouzdanosti mjernih podataka. Hipoteza se smatra potvrđenom rezultira li taj postupak novim, dosad neobjavljenim modelom određivanja eksponenta N1 utemeljenim na strojnome učenju i primjenjivim bez terenskog ispitivanja.

Rezultati provjere u ovome se poglavlju ne iznose; cjelovita rasprava o potvrdi hipoteza, s pripadajućim kvantitativnim pokazateljima, dana je u 6. poglavlju.

1.5. Znanstveni doprinos

Očekivani znanstveni doprinos disertacije proizlazi izravno iz postavljenih hipoteza i ciljeva te obuhvaća sljedeće sastavnice.

Prvo, **nove matematičke modele određivanja eksponenta curenja N1 utemeljene na strojnome učenju**. Pregledom literature nije utvrđeno nijedno prijašnje istraživanje koje metode strojnog učenja primjenjuje na određivanje eksponenta N1; razvijeni modeli stoga predstavljaju izvoran doprinos na sjecištu FAVAD metodologije i podatkovno vođenoga modeliranja vodoopskrbnih sustava, s neposrednom primjenom u analizi, predviđanju i upravljanju sustavima bez provedbe terenskih ispitivanja.

Drugo, **identifikaciju fizikalnih parametara vodoopskrbnog sustava koji utječu na vrijednost eksponenta N1**. Sustavnom analizom važnosti parametara na heterogenoj međunarodnoj bazi terenskih mjerenja utvrđuje se koji parametri mreže i pogonskoga stanja nose stvarnu informaciju o eksponentu, kakva je njihova hijerarhija prema informacijskom doprinosu te kakvu ulogu u tome ima cijevni materijal kao teorijski središnji čimbenik FAVAD mehanizma.

Treće, **optimizaciju, odnosno minimizaciju broja parametara potrebnih za analitičko određivanje eksponenta N1**. Utvrđivanjem najmanjega skupa ulaznih podataka koji ne uzrokuje značajan gubitak točnosti definira se i minimalni podatkovni zahtjev analitičkog pristupa, čime se izravno određuje koje mjerne aktivnosti operater mora provesti da bi eksponent mogao odrediti bez testa tlačnih koraka, uključujući uvođenje nove izvedene značajke — specifične gustoće stvarnih gubitaka normalizirane tlakom (LD) — kao ulazne veličine za analitičko određivanje eksponenta.

Četvrto, **utvrđivanje načina na koji novi modeli mogu unaprijediti srodna istraživanja i optimizaciju vodoopskrbnih sustava koji se danas oslanjaju na teorijske vrijednosti eksponenta N1**. Time se doprinos proteže i izvan samoga postupka određivanja eksponenta, na širi krug metoda planiranja i upravljanja gubicima u kojima je N1 ulazna pretpostavka.

Uz navedeno, kritička analiza metodologije terenskog ispitivanja, provedena u sklopu općih ciljeva, donosi i metodološke spoznaje o pouzdanosti i protokolu terenskog određivanja eksponenta N1, koje su primjenjive neovisno o razvijenim modelima; njihov je sadržaj prikazan u 5. poglavlju.

1.6. Struktura disertacije

Disertacija je, uz ovo uvodno poglavlje, organizirana u šest poglavlja.

U **2. poglavlju** (*Teorijske osnove*) prikazane su teorijske podloge rada: terminologija i bilanca vodnih gubitaka s pripadajućim pokazateljima učinka, odnos tlaka i curenja s konceptom FAVAD i definicijom eksponenta N1 te utjecajem materijala cijevi i geometrije pukotine, metodologija terenskog određivanja eksponenta testom tlačnih koraka te osnovni pojmovi strojnog učenja relevantni za istraživanje.

U **3. poglavlju** (*Pregled dosadašnjih istraživanja*) dan je sustavan pregled literature: terenskih istraživanja eksponenta N1, modeliranja i primjene eksponenta u sklopu FAVAD metodologije te primjena strojnog učenja u vodoopskrbnim sustavima. Poglavlje zaključuje identifikacija istraživačke praznine iz koje proizlazi novost disertacije.

U **4. poglavlju** (*Metodologija*) opisani su istraživački postupak i podaci: izvori i opis međunarodne baze terenskih testova, postupci filtriranja i kontrole kvalitete te metodološki okvir modeliranja — unakrsna validacija grupirana po mjernim zonama, isključivanje varijabli koje bi uzrokovale cirkularnost, referentni modeli, postupci odabira značajki, težinsko

vrednovanje pouzdanosti mjerenja, izbor mjere uspješnosti i usporedba algoritama strojnog učenja.

U **5. poglavlju** (*Razvoj i rezultati modela*) prikazan je razvoj modela kroz nadzirani slijed inačica do konačnog modela, s njegovim oblikom, uspješnošću i intervalima predviđanja te dvorazinskom shemom procjene. Poglavlje obuhvaća i analizu značajki s fizikalnom interpretacijom uloge cijevnoga materijala, dijagnozu zona s potpuno plastičnim mrežama, preporučeni protokolarni pojas tlačnoga koraka te analizu granica generalizacije modela.

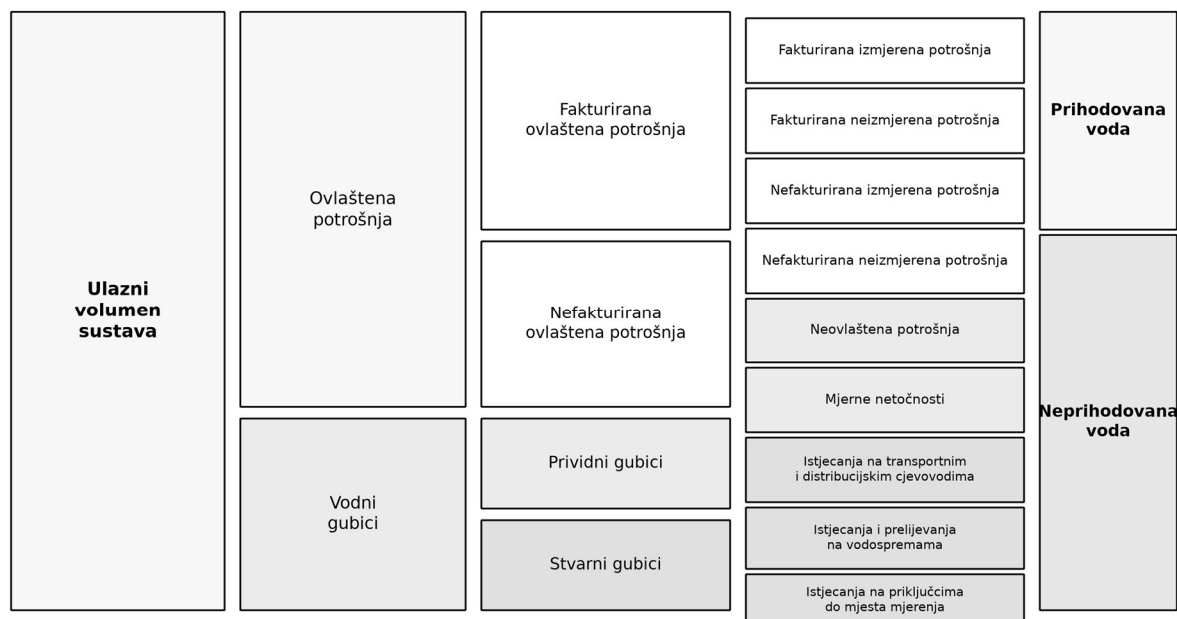
U **6. poglavlju** (*Rasprava*) provedena je provjera triju hipoteza u odnosu na dobivene rezultate, raspravljen je znanstveni doprinos u kontekstu dosadašnjih istraživanja, prikazane su mogućnosti praktične primjene razvijenih alata te su izložena ograničenja istraživanja.

U **7. poglavlju** (*Zaključak*) sažeti su glavni nalazi i doprinos disertacije, uz osvrt na hipoteze i ciljeve te preporuke i smjernice za daljnja istraživanja.

2. Teorijske osnove

2.1. Gubici vode u vodoopskrbnim sustavima

Sustavno upravljanje vodnim gubicima pretpostavlja jednoznačnu terminologiju i standardizirani obračunski okvir. Takav je okvir uspostavila Međunarodna udruga za vode (IWA, engl. *International Water Association*) standardiziranim bilancom vode, koja ulazni volumen sustava raščlanjuje na ovlaštenu potrošnju i vodne gubitke, pri čemu se gubici dalje dijele na prividne gubitke (neovlaštena potrošnja i mjerne pogreške vodomjera) i stvarne gubitke (fizičko istjecanje iz cjevovoda, spojeva i spremnika), a s naplatne strane na prihodovanu i neprihodovanu vodu (NRW, engl. *Non-Revenue Water*) (McKenzie i Seago, 2005; Bozkurt i sur., 2022b). Bilanca je objavljena 2000. godine kao rezultat rada IWA-inih radnih skupina, a metodološki se naslanja na koncepte razvijene u Ujedinjenom Kraljevstvu sredinom 1990-ih godina u sklopu BABE pristupa (engl. *Bursts and Background Estimates*) — komponentne analize koja stvarne gubitke rastavlja na prijavljena puknuća, neprijavljena puknuća i pozadinsko istjecanje (McKenzie i Seago, 2005). U istom je razdoblju termin neprihodovana voda zamijenio raniji pojam „neobračunane vode“ (engl. *unaccounted-for water*), koji je bio podložan proizvoljnim interpretacijama i manipulaciji (McKenzie i Seago, 2005). Terminološki, u ovoj se disertaciji pod pojmom stvarnih gubitaka podrazumijeva ukupno fizičko istjecanje iz distribucijske mreže, dok se pojam curenja koristi za sam proces istjecanja kroz otvore u cjevovodima i spojevima; pozadinsko istjecanje označava brojna mala, pojedinačno nedetektabilna istjecanja na spojevima i priključcima, za razliku od puknuća kao pojedinačno značajnih, detektabilnih kvarova (Van Zyl i Clayton, 2007). Komponentna analiza kvarove dalje razvrstava prema načinu otkrivanja i trajanju. Prijavljeni lomovi imaju visoke protoke ali kratko trajanje jer ih prijave korisnici, neprijavljeni lomovi umjerene protoke ali dugo trajanje do otkrivanja aktivnom kontrolom, dok pozadinska istjecanja traju neprekidno jer su premala i za akustičnu detekciju; zbroj mnogih malih skrivenih istjecanja pritom u pravilu premašuje volumen prijavljenih lomova (Samir i sur., 2017). Standardna raščlamba ulaznog volumena sustava prikazana je na slici 2.1.



Slika 2.1. Standardna bilanca vode prema IWA metodologiji

Razmjeri problema stvarnih gubitaka prikazani su već u uvodnom poglavlju — na svjetskoj se razini gubici u distribucijskim mrežama tipično kreću od 10 do 55 % ulaznog volumena sustava (Zhang i sur., 2024), a za javne vodoopskrbne sustave Republike Hrvatske dokumentirane su vrijednosti nešto manje od 50 % (Dundović, 2017). Za operativno upravljanje tim gubicima u literaturi je uspostavljen okvir četiriju temeljnih poluga: upravljanja tlakom, aktivne kontrole curenja, brzine i kvalitete popravaka te upravljanja cjevovodima i imovinom (Winarni, 2009; Marzola i sur., 2021; Bozkurt i sur., 2022a). Svaka od poluga djeluje na drugu sastavnicu volumena gubitaka. Aktivna kontrola skraćuje trajanje neprijavljenih curenja, brzina popravka skraćuje trajanje prijavljenih, upravljanje imovinom smanjuje učestalost nastanka kvarova, a upravljanje tlakom istodobno smanjuje protok kroz sve postojeće otvore istjecanja i učestalost nastanka novih puknuća (Thornton, 2003; Lambert i Thornton, 2011). Upravo posljednja poluga — čiji je kvantitativni temelj odnos tlaka i istjecanja obrađen u pogl. 2.2 — predstavlja poveznicu ovoga potpoglavlja s ostatkom disertacije.

Upravljanje tlakom kao poluga zaslužuje ovdje širi osvrt, jer je upravo ono kontekst u kojem eksponent curenja $N1$ dobiva operativno značenje. Njegove koristi nadilaze trenutačno smanjenje istjecanja. Smanjenje vršnih i prosječnih tlakova smanjuje i učestalost nastanka novih puknuća te produljuje vijek trajanja infrastrukture, a odnos tlaka i učestalosti puknuća empirijski je opisan analogno odnosu tlaka i istjecanja — postotno smanjenje učestalosti puknuća približno je proporcionalno postotnom smanjenju maksimalnoga tlaka, s prosječnim faktorom proporcionalnosti 1,4 utvrđenim na podlozi od 112 zona upravljanja tlakom u 12

zemalja, uz raspon pojedinačnih vrijednosti od približno 0 do približno 3,0 (Lambert i Thornton, 2011). Terminološki se pritom razlikuju zone upravljanja tlakom (PMZ, engl. *Pressure Management Zone*), u kojima se tlakom aktivno upravlja, od mjernih zona namijenjenih ponajprije mjerenju i kontroli curenja (Lambert i Thornton, 2011). U praksi se redukcija tlaka provodi nizom metoda — od trajnog zoniranja i upravljanja crpkama do ventila s fiksnim izlaznim tlakom te vremenske ili protočne modulacije i daljinskog upravljanja (Thornton, 2003) — a razmjeri ostvarivih ušteda dokumentirani su velikim programima poput Khayelitshe u Južnoafričkoj Republici (24 milijuna litara dnevno) i São Paula u Brazilu (260 milijuna litara dnevno uz stotine ugrađenih ventila) (Thornton, 2003). Unatoč tome, međunarodni je pregled pokazao da se proaktivno upravljanje tlakom u vrijeme objave provodilo u svega 5 od 20 anketiranih zemalja (Thornton, 2003) — raskorak između dokumentirane učinkovitosti mjere i njezine raširenosti u praksi, kojem pridonosi i nedostupnost pouzdanih zonskih vrijednosti eksponenta N1 kao ulaza investicijske odluke.

Procjena volumena stvarnih gubitaka provodi se dvama komplementarnim pristupima. Pristup „odozgo prema dolje” temelji se na godišnjoj bilanci vode — od ulaznog volumena sustava oduzimaju se sve sastavnice ovlaštene potrošnje i procijenjeni prividni gubici, a ostatak čine stvarni gubici. Pristup „odozdo prema gore” temelji se na mjerenju minimalnog noćnog protoka (MNF, engl. *Minimum Night Flow*). U razdoblju minimalne potrošnje, tipično između 2:00 i 4:00 sata (Marzola i sur., 2021), protok na ulazu u mjernu zonu gotovo je u cijelosti posljedica istjecanja, stoga se stvarni gubici procjenjuju oduzimanjem procijenjene legitimne noćne potrošnje od izmjerenoga minimalnog protoka. Kombinacija obaju pristupa omogućuje međusobnu provjeru procjena; primjer suvremene primjene s pametnim mjernim sustavom, u kojem je svaka zgrada sveučilišnoga kampusa tretirana kao zasebna mjerna zona, pokazao je da se statistička analiza noćnih protoka i bilanca vode mogu uskladiti uz razliku od približno 0,12 l/s (Zhang i sur., 2024). Pouzdanost MNF pristupa, međutim, kritično ovisi o procjeni legitimne noćne potrošnje jer primjena literaturnih vrijednosti bez provjere lokalnih uvjeta može procjenu gubitaka učiniti i trostruko većom od stvarne (Marzola i sur., 2021), o čemu se detaljnije raspravlja u pogl. 2.3 u kontekstu terenskog određivanja eksponenta N1.

Za iskazivanje i usporedbu razine gubitaka među sustavima ključan je izbor pokazatelja učinka. IWA metodologija razvila je opsežan sustav od 170 pokazatelja učinka u šest skupina, oslonjenih na 232 varijable, iz kojega se za upravljanje gubicima izdvaja manji broj prioriternih; ista metodologija preporučuje i veličinu mjerne zone od 500 do 5000 priključaka kao okvir u kojem su standardizirani pokazatelji pouzdani (Dundović, 2017). Najrašireniji i intuitivno

najbliži pokazatelj — postotak ulaznog volumena sustava — za ocjenu operativne učinkovitosti upravljanja stvarnim gubicima nije prikladan, što su formalno potvrdili regulatori i strukovna udruženja više zemalja (McKenzie i Seago, 2005). Neprikladnost proizlazi iz ovisnosti postotka o potrošnji — isti stvarni gubici od 100 litara po priključku dnevno čine 29 % ulaznog volumena pri potrošnji od 250 litara po priključku dnevno, ali samo 1 % pri potrošnji od 8000 litara po priključku dnevno (Winarni, 2009). Kod isprekidane opskrbe interpretacija postotka postaje besmislena. Sustav Seula s 34 % gubitaka uz 24-satnu opskrbu zasigurno nije lošiji od sustava Karachija s 30 % gubitaka uz opskrbu od jednog do četiri sata dnevno (Winarni, 2009). Kao osnovni operativni pokazatelj IWA metodologija stoga preporučuje stvarne gubitke izražene u litrama po priključku dnevno za sustave s gustoćom većom od 20 priključaka po kilometru, odnosno u kubnim metrima po kilometru mreže dnevno za rjeđe mreže, pri čemu se svi pokazatelji računaju po danu u kojem je sustav pod tlakom, čime se korektno obuhvaća i isprekidana opskrba (McKenzie i Seago, 2005; Winarni, 2009). Granica od približno 20 priključaka po kilometru ujedno razdvaja sustave u kojima najveći volumen stvarnih gubitaka nastaje na priključcima od onih u kojima prevladavaju gubici na glavnim cjevovodima (Winarni, 2009). Ni taj pokazatelj, međutim, ne uzima u obzir gustoću priključaka, duljinu priključnih cjevovoda ni prosječni radni tlak (McKenzie i Seago, 2005).

Navedene nedostatke rješava detaljni operativni pokazatelj — infrastrukturni indeks curenja ILI, definiran kao omjer trenutačnih godišnjih stvarnih gubitaka (CARL, engl. *Current Annual Real Losses*) i neizbježnih godišnjih stvarnih gubitaka (UARL, engl. *Unavoidable Annual Real Losses*):

$$ILI = CARL / UARL \quad (2.1)$$

pri čemu se neizbježni gubici iz jedn. (2.1), kao tehnički najniža razina gubitaka dobro održavanog sustava pri zadanom tlaku, računaju empirijskom formulom:

$$UARL = (18 \cdot L_m + 0,8 \cdot N_c + 25 \cdot L_p) \cdot P \quad (2.2)$$

gdje je L_m duljina glavnih cjevovoda (km), N_c broj priključaka, L_p ukupna duljina privatnih priključnih cjevovoda (km), a P prosječni radni tlak (m), s rezultatom u litrama na dan (McKenzie i Seago, 2005; Winarni, 2009). Bezdimenzionalnost čini ILI prikladnim za međunarodne usporedbe, a njegova je snaga u tome što mjeri kvalitetu triju infrastrukturnih funkcija upravljanja gubicima — brzine popravaka, aktivne kontrole curenja i upravljanja imovinom — odvojeno od upravljanja tlakom (Winarni, 2009). Na temelju ILI vrijednosti Svjetska banka razvrstava sustave u četiri kategorije tehničke učinkovitosti, s različitim

granicama za razvijene zemlje i zemlje u razvoju (Dundović, 2017; Samir i sur., 2017). Granice kategorija prikazuje tablica 2.1.

Tablica 2.1. Kategorije učinkovitosti upravljanja stvarnim gubicima prema vrijednosti ILI pokazatelja (matrica Svjetske banke)

Kategorija	ILI — razvijene zemlje	ILI — zemlje u razvoju
A	< 2	< 4
B	2–4	4–8
C	4–8	8–16
D	≥ 8	≥ 16

Izvor: Dundović (2017, Tablica 2.4); Samir i sur. (2017, Table 1).

Empirijske vrijednosti ILI pokazatelja pokrivaju izuzetno širok raspon. U sustavima razvijenih zemalja sa strogim regulatorom (Ujedinjeno Kraljevstvo, Australija) zabilježene su vrijednosti bliske jedinici, dok su u drugim dijelovima svijeta dokumentirane vrijednosti veće od 100, s ekstremom od 278 za sustav s ekstremno visokom potrošnjom (Winarni, 2009; McKenzie i Seago, 2005). Pritom između ILI-ja i postotnog pokazatelja nema korelacije — razina stvarnih gubitaka od 50 % ulaznog volumena može odgovarati vrijednosti ILI od približno 12, ali i od približno 114, a sustav s naizgled niskim postotkom gubitaka može biti višestruko manje učinkovit od sustava s višim postotkom (Winarni, 2009). Dokumentirani parovi primjera to zorno pokazuju. Sustav Beča s 8,5 % gubitaka ima ILI od 6,0, dok novozelandski Ecowater s 9,1 % gubitaka ima ILI od svega 0,9 — šesterostruko bolju infrastrukturnu učinkovitost uz nominalno viši postotak; obrnuto, sustavi s postotkom gubitaka većim od 15 % mogu imati izvrsno upravljanje, poput Malte s 19,7 % gubitaka uz ILI od 1,6 (Winarni, 2009). Važno je i da $ILI = 1$ nije nužno cilj upravljanja jer je ILI čisto tehnički pokazatelj koji ne uključuje ekonomiku, a ispod određene razine daljnje smanjivanje gubitaka nije isplativo (Winarni, 2009). Uz to, valjanost UARL formule ograničena je na sustave s više od 5000 priključaka, gustoćom većom od 20 priključaka po kilometru i tlakovima između 25 i 100 m (Winarni, 2009) — ograničenje koje je posebno relevantno za male mjerne zone kakve prevladavaju u ruralnim vodoopskrbnim sustavima, uključujući zone analizirane u vlastitim prethodnim istraživanjima (Dundović, 2017).

Za predmet ove disertacije ključno je svojstvo ILI pokazatelja njegova interakcija s radnim tlakom. Budući da neizbježni gubici u jedn. (2.2) rastu linearno s prosječnim tlakom, promjena tlačnog režima mijenja nazivnik pokazatelja — već su autori metodologije upozorili da se poboljšanim upravljanjem tlakom u pravilu može smanjiti volumen stvarnih gubitaka, ali ne i ILI, zbog čega se upravljanje tlakom i upravljanje ostalim infrastrukturnim funkcijama moraju

pratiti usporedno, kao dva odvojena kolosijeka (McKenzie i Seago, 2005). Empirijska istraživanja tu su nekonzistentnost višestruko dokumentirala. U vlastitom prethodnom istraživanju na hrvatskim mjernim zonama pokazano je da zone s gotovo jednakim volumenom stvarnih gubitaka mogu imati bitno različite ILI vrijednosti isključivo zbog razlike radnih tlakova, što otvara i mogućnost prividnog poboljšanja pokazatelja neoptimiziranjem tlaka; kao korekcija predložena je metoda optimalnog tlaka, kojom se ILI računa uz analitički određen optimalni radni tlak umjesto zatečenoga (Dundović, 2017). Na sustavu Alexandra Township u Johannesburgu ILI se povećao s prosječno 4,06 na 4,30 unatoč tome što su optimalnim upravljanjem tlakom ulazni volumen, minimalni noćni protok, učestalost popravaka i trošak gubitaka istodobno značajno smanjeni (Mathye i sur., 2022). Na mreži norveške općine Oppegård hidrauličkim je modeliranjem pokazano da scenarij regulacije tlaka koji smanjuje volumetrijske gubitke za 13 % ostavlja ILI nepromijenjenim (6,93), dok daljnje smanjenje gubitaka za 10 % ILI čak blago povećava sa 6,27 na 6,32; autori zaključuju da je za regulatorne svrhe ILI bez hidrauličkog modela zavaravajuć (Berardi i sur., 2018). Tri neovisna nalaza upućuju na isti zaključak — pokazatelji učinka temeljeni na agregiranim godišnjim veličinama ne mogu zamijeniti eksplicitno poznavanje odnosa tlaka i istjecanja u konkretnoj zoni.

Taj odnos, međutim, nije univerzalan. Za velike sustave mješovitih cijevnih materijala ponderirani prosječni odnos odgovara približno linearnoj ovisnosti istjecanja o tlaku — istjecanje varira s tlakom na potenciju približno 1,15 (Winarni, 2009), a praktičari za velike mješovite sustave često pretpostavljaju linearan odnos (Thornton, 2003). Za pojedinačne mjerne zone vrijednosti eksponenta rasipaju se u znatno širem rasponu, ovisno o materijalu cjevovoda, tipu i stanju otvora istjecanja te pogonskim uvjetima (Thornton, 2003; Van Zyl i Clayton, 2007). Upravo zato što investicijske odluke o upravljanju tlakom padaju na razini pojedine zone, a ne sustava kao cjeline, poznavanje zonske vrijednosti eksponenta curenja $N1$ ima odlučujuću važnost — čime se otvara središnja tema sljedećega potpoglavlja.

2.2. Odnos tlaka i curenja

Odnos tlaka i istjecanja kvantitativni je temelj upravljanja tlakom i središnja teorijska podloga ove disertacije. U ovome se potpoglavlju najprije prikazuje koncept FAVAD kao suvremeni fizikalni okvir toga odnosa (pogl. 2.2.1), zatim se definira eksponent curenja $N1$ i raspravlja njegovo fizikalno značenje (pogl. 2.2.2) te se analizira utjecaj materijala cijevi i geometrije pukotine kao ključnih čimbenika njegove vrijednosti (pogl. 2.2.3).

2.2.1. Koncept FAVAD (Fixed and Variable Area Discharge)

Polazište opisa istjecanja iz cjevovoda klasična je hidraulika otvora. Za otvor nepromjenjive površine u stijenci cijevi protok slijedi Torricellijev zakon:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2.3)$$

gdje je Q protok kroz otvor, C_d koeficijent istjecanja, A površina otvora, g gravitacijsko ubrzanje, a h tlačna visina u cijevi; za koeficijent istjecanja uobičajeno se uzima vrijednost oko 0,65 (Marzola i sur., 2021). Prema jedn. (2.3) protok raste s korijenom tlaka, zbog čega bi relativna promjena istjecanja pri promjeni tlaka trebala odgovarati eksponentu 0,5. Terenska su ispitivanja, međutim, već od 1970-ih godina u Ujedinjenom Kraljevstvu i Japanu dosljedno pokazivala da je istjecanje u stvarnim distribucijskim mrežama znatno osjetljivije na promjenu tlaka od teorijskoga korijena te da se osjetljivost razlikuje od sustava do sustava (Van Zyl i Clayton, 2007; Schwaller i van Zyl, 2015). Kao empirijski odgovor na taj nesklad usvojena je potencijaska jednadžba:

$$Q = C \cdot h^{N1} \quad (2.4)$$

u kojoj je C koeficijent istjecanja sustava, a $N1$ eksponent curenja; ista se veza u praksi najčešće primjenjuje u omjernom obliku, koji eliminira koeficijent C :

$$L_1/L_0 = (P_1/P_0)^{N1} \quad (2.5)$$

gdje su L_0 i L_1 istjecanja pri tlakovima P_0 i P_1 . Potencijaska jednadžba, koju je usvojila i IWA metodologija, opisna je i računski jednostavna, ali je — za razliku od jednadžbe otvora — čisto empirijska jer ju promjenjivi eksponent odvaja od temelja mehanike fluida (Marzola i sur., 2021; Van Zyl i Malde, 2017).

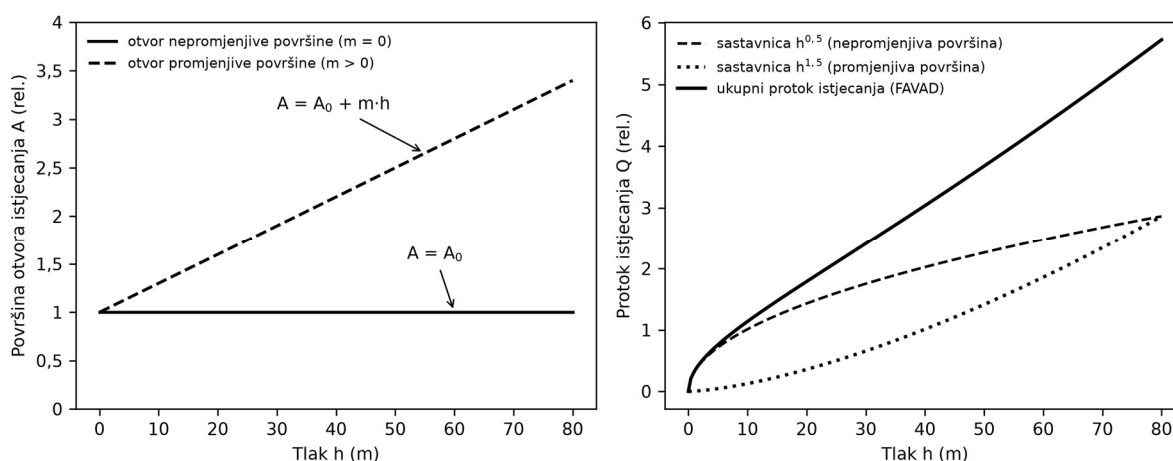
Fizikalno objašnjenje visokih eksponenata donio je koncept FAVAD, koji je 1994. godine u jednostraničnom članku uveo May (1994). Prema tom konceptu dio otvora istjecanja u distribucijskoj mreži ima nepromjenjivu površinu, dok se drugi dio — pukotine u savitljivim materijalima, zazori na spojevima — elastično širi s porastom tlaka, te se ukupno istjecanje sastoji od sastavnice nepromjenjive i sastavnice promjenjive površine. Koncept je u sljedeća dva desetljeća sustavno validiran i formaliziran istraživanjima van Zyla i suradnika (van Zyl i sur., 2017); srodnu je ideju, zanimljivo, za spojeve cjevovoda predlagao još Ledochowski 1956. godine (van Zyl i Cassa, 2014). Suvremena formulacija koncepta polazi od eksperimentalno i numerički potvrđenoga nalaza da površina otvora istjecanja — svih tipova otvora, u elastičnom i viskoelastičnom režimu deformacije — varira linearno s tlakom (Van Zyl i Malde, 2017):

$$A = A_0 + m \cdot h \quad (2.6)$$

gdje je A_0 početna površina otvora pri nultom tlaku, a m nagib odnosa tlaka i površine (engl. *head-area slope*, mm^2/m). Plastična deformacija i lom nisu linearni, ali su nepovratni, kratkotrajni i javljaju se samo pri porastu tlaka, stoga se u analizi zona s upravljanjem tlakom — u kojima se tlak u pravilu snižava — mogu zanemariti (Van Zyl i Malde, 2017; van Zyl i sur., 2017). Uvrštavanjem jedn. (2.6) u jedn. (2.3) dobiva se FAVAD jednadžba, u literaturi nazivana i modificiranom jednadžbom otvora:

$$Q = Cd \cdot \sqrt{(2g)} \cdot (A_0 \cdot h^{0,5} + m \cdot h^{1,5}) \quad (2.7)$$

Istjecanje se u jedn. (2.7) rastavlja na sastavnicu početne površine s eksponentom 0,5 i sastavnicu proširene površine s eksponentom 1,5. Za potrebe modeliranja intruzije onečišćenja jednadžba se poopćuje predznakom razlike unutarnjeg i vanjskog tlaka, čime jedinstveno opisuje i istjecanje i ulazak vode u cjevovod (van Zyl i sur., 2017). Koncept je shematski prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2. Shema FAVAD koncepta

Odnos dviju sastavnica FAVAD jednadžbe sažima bezdimenzijski broj curenja (LN, engl. *Leakage Number*), definiran kao omjer protoka kroz prošireni i početni dio otvora (Cassa i van Zyl, 2014):

$$LN = m \cdot h / A_0 \quad (2.8)$$

Izjednačavanjem potencijske i FAVAD jednadžbe te njihovih derivacija izvodi se egzaktna veza eksponenta $N1$ i broja curenja (Cassa i van Zyl, 2014; van Zyl i sur., 2017):

$$N1 = (1,5 \cdot LN + 0,5) / (LN + 1) \quad (2.9)$$

$$LN = (N1 - 0,5) / (1,5 - N1) \quad (2.10)$$

Iz samog oblika jedn. (2.9) slijedi da je veza $N1$ i broja curenja hiperbola s asimptotama $LN = -1$ i $N1 = 1,5$; za nju su utvrđena sljedeća orijentacijska svojstva: $N1 = 1$ pri $LN = 1$, $N1$ je praktički jednak 0,5 za $LN < 0,01$, a praktički jednak 1,5 za $LN > 100$ (Cassa i van Zyl, 2014). Iz nje slijedi ključna reinterpretacija FAVAD koncepta. Otvori istjecanja ne dijele se na fiksne i promjenjive — svi su otvori promjenjivi, a njihovo je ponašanje potpuno karakterizirano parom (A_0, m), dok su granice 0,5 i 1,5 granični slučajevi dominacije početne odnosno proširene površine (Cassa i van Zyl, 2014). Za matematičko modeliranje mreža s FAVAD jednadžbom dokazano je postojanje i jedinstvenost hidrauličkog rješenja preko energetske formulacije (Piller i Van Zyl, 2014), a praktična implementacija u standardne hidrauličke proračune svodi se na dva emitera po čvoru, s eksponentima 0,5 i 1,5 (Kabaasha i sur., 2016).

S FAVAD konceptom usko je povezano i pitanje kako se curenje prikazuje u hidrauličkim modelima distribucijskih mreža. Standardni alati poput EPANET-a curenje modeliraju emiterima — tlačno-ovisnim istjecanjima potencijuskog oblika u čvorovima — no takav prikaz ima poznata ograničenja. Emiteri daju pogrešne rezultate pri negativnim tlakovima (koje model može izračunati unatoč tome što se u praksi ne mogu pojaviti) i nemaju gornju granicu protoka (Muranho i sur., 2014). Napredniji pristupi curenje pridružuju cijevima umjesto čvorovima — dvokomponentni model po cijevi rastavlja istjecanje na pozadinsku sastavnicu, proporcionalnu duljini cijevi i tlaku na eksponent između 0,5 i 2,5 ovisno o tipu curenja, te na sastavnicu lomova opisanu klasičnom jednadžbom otvora, uz raspodjelu ukupnoga curenja cijevi na njezine krajnje čvorove (Muranho i sur., 2014). Difuzni prikaz istjecanja duž cijevi, u FAVAD obliku linearnom u kalibracijskim koeficijentima, pokazao se pogodnijim za kalibraciju i vjerniji stvarnom ponašanju od koncentriranja curenja u čvorove, koje onemogućuje i simulaciju učinka zamjene pojedine cijevi (Berardi i sur., 2018). Za potrebe ove disertacije bitno je da svi navedeni pristupi — od najjednostavnijeg emitera do difuznoga FAVAD prikaza — kao ulazni podatak trebaju upravo eksponent curenja, odnosno FAVAD parametre zone. Pouzdanost hidrauličkih simulacija upravljanja tlakom izravno je uvjetovana pouzdanošću određivanja tih veličina.

Za primjenu na razini mjerne zone presudna je linearnost odnosa (2.6) — budući da je zbroj linearnih funkcija ponovno linearna funkcija, FAVAD jednadžba vrijedi i za sustav s mnogo curenja, pri čemu su sustavska početna površina A_0S i sustavski nagib mS približno jednaki zbrojevima pojedinačnih vrijednosti (Schwaller i sur., 2015). Iz mjerenja istjecanja pri dvama stanjima tlaka — istih mjerenja koja se koriste za određivanje eksponenta $N1$ — mogu se stoga procijeniti oba sustavska parametra: A_0S kao mjera fizičkog integriteta zone i mS kao pokazatelj

dominantnog tipa prisutnih otvora (Schwaller i sur., 2015). Na istom se načelu temelji i praktičarska kalibracija zonske FAVAD jednadžbe iz podataka zonskoga noćnog testa (Lambert i sur., 2017):

$$L = a \cdot AZP^{0,5} + b \cdot AZP^{1,5} \quad (2.11)$$

gdje je AZP prosječni zonski tlak (engl. *Average Zone Pressure*), a koeficijenti a i b određuju se rješavanjem sustava dviju jednadžbi iz parova istjecanja i tlaka prije i poslije redukcije. Kalibrirana jednadžba omogućuje izvođenje 24-satnog profila istjecanja iz izmjerene dnevnog profila zonskog tlaka te izračun dnevnih i godišnjih volumena gubitaka, čime se zaobilaze pogreške pojednostavljenih pristupa s fiksnim faktorom pretvorbe noćnog protoka u dnevni volumen (Lambert i sur., 2017). Uz formulacijsku raznolikost veže se i terminološka napomena da praktičari nerijetko govore o „FAVAD analizi” i kada zapravo koriste potencijsku N1 jednadžbu — u literaturi se za tako određeni eksponent koristi i naziv ekvivalentni FAVAD N1 (Schwaller i sur., 2015). Pri trenutnom zonskom tlaku udio istjecanja kroz promjenjivu površinu iznosi $N1 - 0,5$, a kroz nepromjenjivu $1,5 - N1$ (Lambert i sur., 2017), što FAVAD parametrima daje izravnu dijagnostičku interpretaciju.

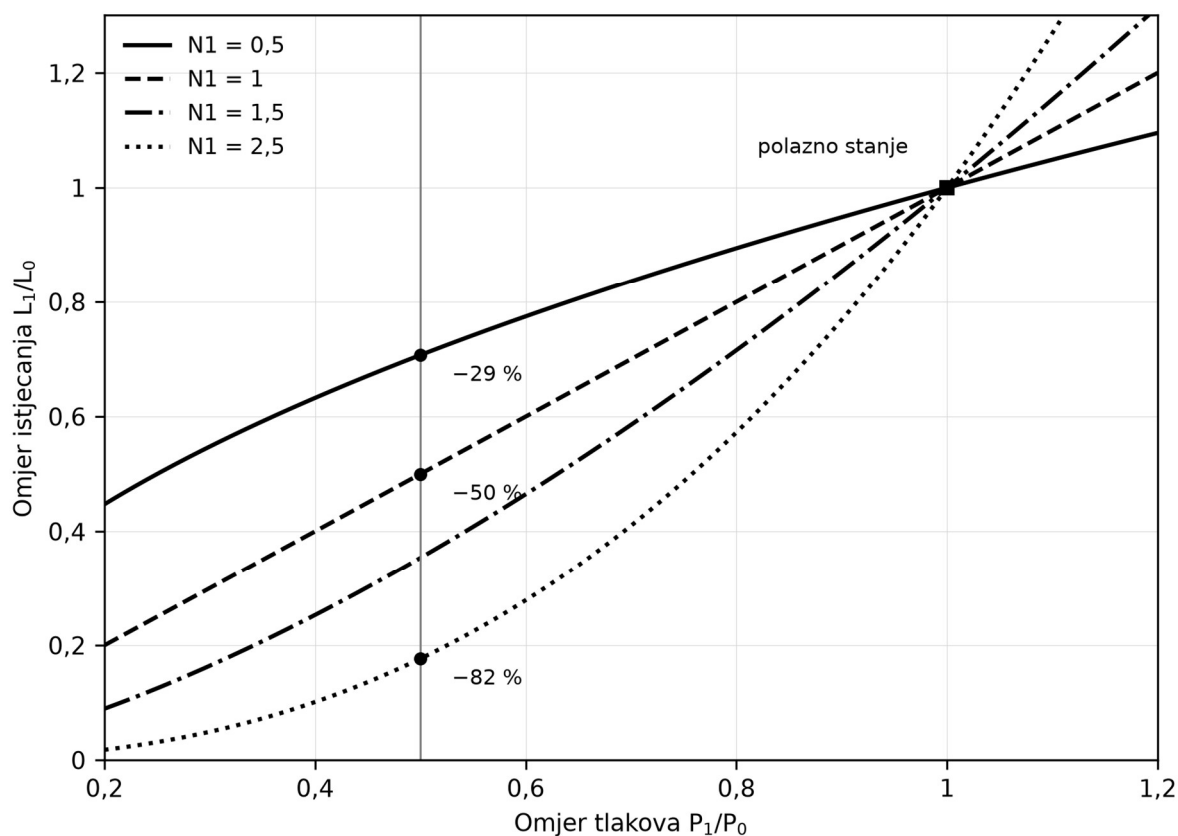
2.2.2. Eksponent curenja N1 — definicija i fizikalno značenje

Eksponent curenja N1 definiran je potencijskim odnosom istjecanja i tlaka prema jedn. (2.4) i (2.5). On je eksponent kojim, za promatranu mjernu zonu ili pojedinačni otvor, relativna promjena tlaka određuje relativnu promjenu istjecanja. Na razini mjerne zone, N1 sažima u jedan broj cjelokupnu osjetljivost stvarnih gubitaka na promjenu tlaka — agregirani učinak svih otvora istjecanja u zoni, njihovih materijala, geometrija i tlačnih uvjeta. Upravo ta agregirana narav čini eksponent operativno upotrebljivim jer se zona bez poznavanja pojedinačnih curenja jednim parametrom karakterizira s obzirom na očekivani učinak upravljanja tlakom.

Empirijski raspon eksponenta prikazan je već u uvodnom poglavlju — terenske studije bilježe vrijednosti tipično od 0,5 do 2,79 uz medijan oko 1,15 (Van Zyl i Clayton, 2007). Zbirka terenskih ispitivanja iz šest zemalja pokazuje i strukturu tog raspona. U najvećoj dokumentiranoj studiji, na 75 zona u Ujedinjenom Kraljevstvu 2003. godine, izmjerene su vrijednosti od 0,36 do 2,95 uz srednju vrijednost 1,01, pri čemu je 90 % vrijednosti ležalo između 0,5 i 1,5 (Schwaller i van Zyl, 2015). Zabilježene su, međutim, i vrijednosti izvan teorijskih granica pojedinačnoga elastičnog otvora, poput raspona od 0,18 do čak 3,33 iz terenske analize dvanaest zona upravljanja tlakom u južnoafričkom naselju KwaDabeka (Deyi i sur., 2014), a upozorenje da srednja vrijednost tako širokih razdioba nije reprezentativna za

pojedinu zonu — a ni često citirana praktična vrijednost 1,15, izvedena iz svega osam japanskih pokusa s rasponom od 0,65 do 2,1 — izneseno je i u teorijskoj literaturi (van Zyl i Cassa, 2014).

Praktično značenje eksponenta najzornije pokazuje osjetljivost ušteta na njegovu vrijednost, prikazana na slici 2.3 — prepolovljenje tlaka smanjuje istjecanje za 29 % pri $N1 = 0,5$, za 50 % pri $N1 = 1,0$, a za 82 % pri $N1 = 2,5$ (Van Zyl i Clayton, 2007). Za brze procjene praktičari koriste linearnu aproksimaciju prema kojoj je postotno smanjenje istjecanja približno jednako umnošku eksponenta i postotnog smanjenja prosječnog tlaka (Thornton, 2003). Ista promjena tlaka stoga u zoni s niskim eksponentom daje tek polovična, a u zoni s visokim eksponentom višestruka smanjenja gubitaka — o vrijednosti $N1$ izravno ovisi isplativost ulaganja u opremu za redukciju tlaka.



Slika 2.3. Osjetljivost smanjenja istjecanja na vrijednost eksponenta $N1$

Fizikalno objašnjenje opaženog raspona eksponenta sistematizirano je u okviru četiriju uzročnih čimbenika: hidraulike curenja, ponašanja materijala cijevi, hidraulike tla i potražnje vode (Van Zyl i Clayton, 2007). Prvi čimbenik, hidraulika curenja, obuhvaća režime tečenja kroz otvor. U prijelaznom režimu ekvivalentni eksponent može porasti iznad 0,5, prema granici 1,0 na prijelazu iz laminarnog režima, no potpuno laminarni protoci premali su da bi objasnili značajne gubitke. Najveći protok koji se u laminarnom i prijelaznom režimu uopće može održati

ne ovisi, naime, o površini otvora, nego samo o temperaturi fluida i o omočenom opsegu otvora — duljini ruba otvora u dodiru s vodom (Van Zyl i Clayton, 2007). Slijedom toga izdužene pukotine, čiji je omočeni opseg pri istoj površini znatno veći, održavaju veće laminarne i prijelazne protoke nego okrugle rupe; no čak i za vrlo dugačku i usku pukotinu (velikog omjera duljine i širine) najveći se laminarni protok mjeri tek u litrama na dan. Viskoznost vode od 0 do 30 °C približno se prepolovi, zbog čega se ti najveći protoci u istom rasponu udvostruče (Van Zyl i Clayton, 2007). Kasnija kvantifikacija potvrđuje da je malo vjerojatno da režim tečenja bitno utječe na eksponent sustava — pri tlaku od 50 m pukotina omjera duljine i širine 1000 održava maksimalni laminarni protok od svega 0,06 l/h (Van Zyl, 2014). Drugi čimbenik, ponašanje materijala cijevi — širenje površine otvora s tlakom prema jedn. (2.6) — danas je općeprihvaćen kao najvažniji uzrok opaženog raspona eksponenta (Van Zyl i Malde, 2017; Van Zyl, 2014); njemu je posvećeno pogl. 2.2.3. Treći čimbenik, hidraulika tla oko cjevovoda, teorijski uključuje mehanizme koji mogu podizati eksponent iznad 1 — hidraulički lom tla pri tlakovima vode koji premašuju najmanje totalno glavno naprezanje (za uobičajene dubine ukopa svega 20 do 30 kPa) te fluidizaciju tla oko otvora — no odnos tlaka i protoka kroz tlo ne može se korektno opisati jednostavnim spajanjem jednadžbe otvora i Darcyjeva zakona, a novija sinteza ocjenjuje da tlo vjerojatno ne može zadržati tlakove uobičajene u mrežama, te je njegov utjecaj na tlačni odziv curenja vjerojatno malen (Van Zyl i Clayton, 2007; Van Zyl, 2014). Četvrti čimbenik, potražnja vode, izvor je sustavne pristranosti mjerenja. Sadrži li minimalni noćni protok i legitimnu potrošnju, izmjereni eksponent vjerojatno podcjenjuje stvarni, jer je elastičnost potražnje na tlak niža od elastičnosti istjecanja — za unutarnju potrošnju procijenjena je na približno 0,2, a za vanjsku opremu do 0,5 (Van Zyl i Clayton, 2007). Empirijska potvrda dobivena je terenskim eksperimentom s kontrolnom skupinom kućanstava s vlastitim regulatorima tlaka — smanjenje mrežnoga tlaka za 36 % smanjilo je potrošnju kućanstava izloženih mrežnom tlaku za 7,8 do 9,3 %, što odgovara eksponentu potrošnje od 0,22 do 0,26 (Garmendia i sur., 2019; Tuhovcak i sur., 2018). Uz navedena četiri čimbenika, kao peti je naknadno dodana raspodjela pojedinačnih curenja unutar zone (Van Zyl, 2014).

Uz uzročne čimbenike, za ispravno tumačenje eksponenta bitna su i njegova matematička svojstva, ponajprije nekonstantnost s tlakom. Iz veze $N1$ i broja curenja, jedn. (2.9), slijedi da eksponent istoga otvora raste s tlakom između graničnih vrijednosti 0,5 ($h \rightarrow 0$) i 1,5 ($h \rightarrow \infty$). Numeričkim modeliranjem uzdužne pukotine duljine 60 mm u uPVC cijevi pokazano je da njezin eksponent raste s 0,67 pri tlaku od 10 m na 1,70 pri 100 m — porast veći od 150 % za

isti otvor (van Zyl i Cassa, 2014). Eksponent stoga nije svojstvo otvora, nego svojstvo para otvor–tlak, i strogo vrijedi samo u blizini tlaka pri kojem je kalibriran; par (A_0 , m), odnosno broj curenja LN , karakterizira tlačni odziv potpunije od samog eksponenta (Cassa i van Zyl, 2014; van Zyl i sur., 2017). Veza s brojem curenja ujedno daje i korektan postupak preračunavanja eksponenta na drugi tlak — izmjereni se eksponent jedn. (2.10) pretvori u broj curenja, broj curenja se prema jedn. (2.8) proporcionalno prilagodi novom tlaku te se jedn. (2.9) vrati u eksponent (van Zyl i sur., 2017). U literaturi se ista informacija prikazuje grafom ovisnosti eksponenta o prosječnom zonskom tlaku, s kojega se izravno očitava kako će se eksponent promijeniti smanjenjem tlaka, uz napomenu da su nagibi te ovisnosti najstrmiji upravo pri niskim tlakovima (Lambert i sur., 2017). Ista analiza pokazuje da asimptotsko ponašanje veze (2.9) pri $LN \rightarrow -1$ objašnjava i terenske vrijednosti eksponenta izvan raspona od 0,5 do 1,5 jer otvori koji se pri niskim tlakovima potpuno zatvaraju mogu formalno poprimiti proizvoljno visoke eksponente (van Zyl i sur., 2017). Praktične posljedice nekonstantnosti kvantificirane su simulacijskim studijama. Ekstrapolacija potencijske jednadžbe kalibrirane pri visokom tlaku na niže tlakove — što je upravo scenarij upravljanja tlakom — uzrokuje pogreške procjene istjecanja do 20 % na razini sustava i do 60 % na pojedinačnom čvoru (Kabaasha i sur., 2016), a razlika između FAVAD i potencijskog pristupa doseže 15 % čak i kad se potencijska jednadžba kalibrira zasebno za svako pojedinačno curenje (Boian i sur., 2019). Za preporuku fiksnoga, o tlaku neovisnog eksponenta u današnjim režimima upravljanja tlakom već je u uvodnom poglavlju navedena ocjena da je za opću upotrebu u osnovi nerealna (Lambert i sur., 2017).

Fizikalno značenje eksponenta upotpunjuju i empirijski obrasci njegove veze s razinom istjecanja u zoni. Kanadska mjerenja u 23 mjerne zone pokazala su karakterističnu asimetriju. Zone s velikim viškom curenja imaju stabilan eksponent blizu 0,5 — u njima dominira istjecanje kroz velike otvore, bliske protoku kroz otvor nepromjenjive površine — dok zone s malim istjecanjem daju eksponente od 0,9 do 3,2 uz znatnu varijabilnost, a korelacija eksponenta s materijalom cijevi na ograničenom uzorku nije utvrđena (Jenks i sur., 2023). Taj obrazac ima izravnu praktičnu posljedicu — upravo u „zdravim“ zonama, u kojima bi upravljanje tlakom po visokom eksponentu bilo najisplativije po jedinici smanjenja tlaka, terensko je mjerenje eksponenta najnepouzdanije jer se mala razlika istjecanja utapa u nesigurnosti procjene noćne potrošnje (Jenks i sur., 2023).

Cijenu pogrešno pretpostavljenog eksponenta dokumentiraju i terenske primjene. U pilot-zoni u Kayseriju teorijska FAVAD procjena s pretpostavljenim $N1 = 1,5$ za polietilensku i PVC

mrežu predviđala je smanjenje istjecanja sa 6,67 na 1,33 l/s, dok je terenski izmjereno smanjenje na 3,01 l/s — razlika od 1,70 l/s, pripisana novim curenjima nastalima zbog promjena tlaka, terenskim uvjetima i nepoznatim curenjima na priključcima (Özdemir i sur., 2021). Ista je studija zabilježila i povratnu spregu popravaka i tlaka — sanacijom curenja radni tlak raste, postojeće se pukotine u plastičnim cijevima šire i istjecanje ponovno raste, zbog čega je upravljanje tlakom ocijenjeno ključnim za održivost strategije smanjenja gubitaka (Özdemir i sur., 2021). U modelskim se studijama eksponent nerijetko jednostavno pretpostavlja — primjerice vrijednost 1,2 uz kalibraciju koeficijenta na poznati ukupni volumen curenja (Samir i sur., 2017) — čime cjelokupna analiza nasljeđuje nesigurnost te pretpostavke.

Na razini mjerne zone eksponent dodatno oblikuje kombinirani učinak mnogih curenja. Stohastičkim modeliranjem tipične zone s pojedinačnim elastičnim curenjima raspodijeljenima prema empirijskim distribucijama pokazano je da agregacija reproducira terenski opaženi raspon. Simulirani zonski eksponenti kretali su se od 0,46 do 1,67, a srednja vrijednost rasla je s brojem curenja — s 0,66 pri sto na 1,08 pri deset tisuća curenja — izuzetno blizu uobičajene terenske srednje vrijednosti (Schwaller i van Zyl, 2015). Ista je analiza osjetljivosti identificirala i najutjecajnije determinante zonskog eksponenta: srednji tlak sustava (porast eksponenta za približno 40 % između tlakova 20 i 65 m) i stanje sustava izraženo ukupnom početnom površinom otvora, uz značajan utjecaj raspona visinskih razlika u zoni (Schwaller i van Zyl, 2015). Visinske razlike djeluju i kao samostalan generator anomalija — pojedinačno utjecajno curenje na nadmorskoj visini bitno različitoj od točke prosječnoga zonskog tlaka može zonski eksponent pomaknuti i izvan raspona od 0,5 do 1,5 (Schwaller i sur., 2015; Beygi i van Zyl, 2024). Ta su dva nalaza od izravne važnosti za ovu disertaciju. Ako su srednji tlak i pokazatelji stanja sustava glavne fizikalne determinante zonskog eksponenta, upravo te veličine — koje vodoopskrbni operateri rutinski posjeduju — čine prirodni kandidatski prostor ulaznih varijabli za analitičko određivanje eksponenta N1 metodama strojnog učenja (pogl. 4). Konačno, ista studija upozorava da mjerni postupak utječe na rezultat time što veliko smanjenje tlaka tijekom ispitivanja daje niži izmjereni eksponent, približno jednak prosjeku eksponenata pri tlakovima prije i poslije smanjenja (Schwaller i van Zyl, 2015) — o čemu se detaljnije raspravlja u pogl. 2.3 i, u sklopu vlastitih rezultata o protokolu tlačnoga koraka, u pogl. 5.4.

2.2.3. Utjecaj materijala cijevi i geometrije pukotine

Budući da je širenje površine otvora s tlakom glavni uzrok opaženog raspona eksponenta N1, njegove su ključne fizikalne determinante materijal cijevi — koji preko modula elastičnosti i debljine stijenke određuje deformabilnost otvora — te tip i geometrija samog otvora, koji

određuju kako naprezanja u stijenci djeluju na njegovu površinu. Eksperimentalna i numerička istraživanja tih determinanti daju empirijsku podlogu za tablicu 2.2, koja sažima tipične vrijednosti eksponenta po materijalu i tipu otvora.

Temeljni laboratorijski uvid dala je studija na otkazalim cijevima iz vodoopskrbnog sustava Johannesburga i umjetno induciranim oštećenjima, koja je obuhvatila azbest-cementne, čelične i uPVC cijevi s okruglim rupama, korozijskim rupama te uzdužnim i obodnim pukotinama (Greyvenstein i Van Zyl, 2007). Rezultati su potvrdili da eksponent može biti znatno veći od teorijskih 0,5, ali i da je tip otvora bolji pokazatelj eksponenta nego sam materijal cijevi. Okrugle rupe u svim materijalima daju eksponente vrlo blizu 0,5 (0,518 za bušenu rupu u čeliku, 0,524 u uPVC-u). Uzdužne pukotine daju bitno više eksponente — u uPVC-u od 1,38 do 1,85, u azbest-cementu od 0,79 do 1,04 — jer ih obodna naprezanja, tipično dvostruko veća od uzdužnih, otvaraju s porastom tlaka. Obodne pukotine, na koje djeluju manja uzdužna naprezanja, mogu imati eksponent i ispod 0,5 (u uPVC-u od 0,41 do 0,53), jer se otvor s porastom tlaka može i sužavati. Najviši eksponenti izmjereni su, suprotno raširenoj percepciji o plastičnim cijevima, u korodiranim čeličnim cijevima — od 0,67 do 2,30 — jer korozija stanjuje nosivi materijal oko otvora i time drastično povećava njegovu deformabilnost (Greyvenstein i Van Zyl, 2007). Visoke terenske vrijednosti eksponenta (iznad 2,5) time su ocijenjene fizikalno realnima.

Mehanika naprezanja u stijenci objašnjava i karakteristične načine otkazivanja pojedinih materijala — azbest-cementne cijevi otkazuju pretežno uzdužnim pukotinama, čelične i lijevano-željezne korozijskim rupama, a lijevano-željezne cijevi malih promjera obodnim pukotinama od savijanja, koje se mogu otvarati i zatvarati s temperaturom vode (Van Zyl i Clayton, 2007). Pritom je za tlačni odziv bitna i okolnost da ukopane cijevi, za razliku od zatvorenih tlačnih posuda, uzdužne sile predaju uporišnim blokovima i okolnom tlu, stoga s tlakom variraju ponajprije obodna naprezanja — dodatni razlog zašto se uzdužne pukotine, na koje obodna naprezanja djeluju, s tlakom šire najizraženije; vanjska opterećenja tla, prometa i temperature neovisna su o tlaku vode te na varijaciju površine otvora s tlakom ne utječu (Van Zyl i Malde, 2017).

Sustavnu potvrdu i proširenje tih nalaza donijela je eksperimentalna studija na cijevima od uPVC-a, mPVC-a, HDPE-a i čelika s okruglim rupama te uzdužnim, spiralnim i obodnim prorezima, provedena uz strogu statističku obradu (Van Zyl i Malde, 2017). Okrugle rupe promjera 12 mm dale su nagib m' ispod $0,01 \text{ mm}^2/\text{m}$ i eksponent koji u svim materijalima iznosi 0,50 kada se izrazi na dvije značajne znamenke (izmjerene vrijednosti 0,497–0,501), zbog čega

su predložene kao referentni etalon točnosti eksperimentalnog postava. Čelične cijevi zadržale su eksponent približno 0,5 za sve tipove otvora, što podupire praktičarsku konvenciju $N1 \approx 0,5$ za mreže od čelika i lijevanog željeza — uz izričitu ogradu za jače korodirane cijevi. Uzdužni prerezi pokazali su najveće nagibe m' od svih tipova otvora (u uPVC-u duljine 100 mm eksponent 1,04 uz $m' = 2,51 \text{ mm}^2/\text{m}$), slijede spiralni, a zatim obodni prerezi, kod kojih su svi nagibi negativni; ekstremni je slučaj obodni prerez duljine 80 mm u HDPE-u s negativnim eksponentom $N1 = -0,262$, kod kojega protok s porastom tlaka pada (Van Zyl i Malde, 2017). Studija je dokumentirala i da ista pukotina ima znatno veći eksponent pri manjoj širini. Laboratorijski strojno izrezani prerezi širine 1 do 2 mm, izrađeni odvajanjem (uklanjanjem) materijala, stoga podcjenjuju eksponente ekvivalentnih uskih terenskih pukotina, pri čijem nastanku materijal nije uklonjen (Van Zyl i Malde, 2017; van Zyl i sur., 2017).

Deformabilnost otvora moguće je i računski predvidjeti. Numeričkim modeliranjem metodom konačnih elemenata izvedene su empirijske jednadžbe koje nagib m izražavaju iz promjera cijevi d , duljine pukotine L_c , debljine stijenke t i modula elastičnosti E ; za uzdužne pukotine jednadžba glasi (Cassa i van Zyl, 2014):

$$m = 2,93157 \cdot d^{0,3379} \cdot L_c^{4,80} \cdot 10^{(0,5997 \cdot (\log L_c)^2)} \cdot \rho_g / (E \cdot t^{1,746}) \quad (2.12)$$

uz izraze analogne jedn. (2.12) za spiralne i obodne pukotine. Kombinacija tih jednadžbi s vezom broja curenja i eksponenta, jedn. (2.8) i (2.9), omogućuje predviđanje eksponenta pojedinačne pukotine iz svojstava cijevi — ista uzdužna pukotina duljine 300 mm i širine 1 mm pri tlaku od 50 m daje $N1 = 1,5$ u uPVC cijevi, 0,9 u azbest-cementnoj i 0,6 u lijevano-željeznoj (Cassa i van Zyl, 2014). Provjera na 29 objavljenih eksperimenata pokazala je da model predviđa eksponent unutar 10 % za pukotine kraće od 100 mm u elastičnom režimu deformacije, dok za dulje pukotine u plastičnim materijalima eksponent sustavno podcjenjuje zbog plastične deformacije koju linearno-elastični model ne obuhvaća (van Zyl i Cassa, 2014). Na istim su jednadžbama utemeljene i simulacije istjecanja pri lomu cijevi po materijalu i tipu pukotine, koje su pokazale da pristup s literaturnim (fiksni) eksponentima znatno podcjenjuje istjecanje kroz uzdužne pukotine u lijevano-željeznim i azbest-cementnim magistralnim cjevovodima, dok je za obodne pukotine, čiji je nagib praktički nula, jednostavniji pristup prihvatljiv (Fuchs-Hanusch i sur., 2016).

Veza materijala i eksponenta na razini mjerne zone posredovana je, međutim, još jednim čimbenikom: razdiobom tipova kvarova karakterističnih za pojedini materijal. Stohastičko modeliranje zona s razdiobama tipova i dimenzija otvora svojstvenima svakomu materijalu,

izvedenima iz višegodišnjih terenskih zapisa kvarova, pokazalo je da PVC mreže imaju najviše zonske eksponente ne samo zbog niskoga modula elastičnosti nego i zato što u njima uzdužne pukotine čine 76 % kvarova; mreže od željeza i azbest-cementa zadržavaju eksponent blizu 0,5 praktički neovisno o razini gubitaka, jer u njima prevladavaju obodne pukotine i korozijske rupe s malim nagibima; polietilenske cijevi leže između, jer deblje stijenke i manji udio uzdužnih pukotina ublažavaju učinak niskoga modula elastičnosti (Beygi i van Zyl, 2024). Ista je studija pokazala da važeće smjernice koje eksponent vežu uz materijal i razinu gubitaka znatno odstupaju od simulacija — za čiste PVC mreže smjernice preporučuju $N1 = 1,5$ neovisno o ILI vrijednosti, dok simulirani medijan raste s razinom gubitaka, ali i pri $ILI = 8$ iznosi 1,27 — te da ih treba ažurirati (Beygi i van Zyl, 2024). Taj je nalaz od izravne važnosti za motivaciju ove disertacije — ni suvremene smjernice ne omogućuju pouzdano određivanje zonskog eksponenta iz materijala i pokazatelja gubitaka, nego je potreban postupak koji uvažava više parametara zone istodobno.

Konačno, laboratorijski utvrđeni odnosi materijala i eksponenta ne prenose se na teren bez ograda, jer rubni uvjeti ugradnje mogu mijenjati i sam smjer trenda. Za neukopane HDPE cijevi bez aksijalnog opterećenja izmjereno je da se prorezi s porastom tlaka zatvaraju, to jest eksponent pada prema 0,5 s porastom duljine proreza — suprotno trendu ukopanih i aksijalno opterećenih cijevi — te je za istu uzdužnu pukotinu duljine 15 mm izmjereno $N = 0,726$ u uPVC-u, 0,881 u pocinčanom čeliku i svega 0,504 u HDPE-u (Latchoomun i sur., 2015). Tlo oko cijevi utječe na istjecanje ponajprije kroz koeficijent, a ne kroz eksponent. Laboratorijska ispitivanja polietilenskih cijevi u deset različitih tala pokazala su da se protok mijenja sa svojstvima tla (najinformativnije su značajke srednji promjer zrna, granica plastičnosti i hidraulička propusnost), dok zajednički eksponent ostaje blizu vrijednosti u zraku — 0,5745 za okrugli otvor odnosno 0,4569 za propusnu spojnicu — te da mjerenja u zraku precjenjuju istjecanje u odnosu na ukopane uvjete (Latifi i sur., 2018). S druge strane, istjecanje u porozni medij može sniziti efektivni eksponent otvora s 0,5 na približno 0,3 (Mora-Rodríguez i sur., 2015). Ukupno, materijal cijevi jest teorijski središnji čimbenik eksponenta, ali njegova se vrijednost na razini zone oblikuje interakcijom materijala, razdiobe tipova kvarova, tlačnog režima, tla i stanja sustava — što fiksne, materijalu pripisane vrijednosti čini nepouzdanima i upućuje na mjerenje ili višeparametarsko predviđanje eksponenta.

Tablica 2.2. Pregled tipičnih vrijednosti eksponenta $N1$ po materijalu cijevi i tipu otvora istjecanja

Materijal cijevi	Tip otvora istjecanja	N1	Izvor
uPVC	okrugla (bušena) rupa 12 mm	0,524	Greyvenstein i Van Zyl (2007)
uPVC / mPVC / HDPE / čelik	okrugla rupa 12 mm	0,497–0,501	Van Zyl i Malde (2017)
uPVC	uzdužna pukotina	1,38–1,85	Greyvenstein i Van Zyl (2007)
uPVC	uzdužni prerez 50–100 mm	0,886–1,041	Van Zyl i Malde (2017)
uPVC	obodna pukotina	0,41–0,53	Greyvenstein i Van Zyl (2007)
uPVC	obodni prerez 50–100 mm	0,327–0,455	Van Zyl i Malde (2017)
uPVC	spiralni prerez 50–100 mm	0,657–0,797	Van Zyl i Malde (2017)
uPVC (neukopan, bez aksijalnog opterećenja)	uzdužna pukotina 15 mm	0,726	Latchoomun i sur. (2015)
mPVC	uzdužni prerez 50 mm	0,989	Van Zyl i Malde (2017)
mPVC	spiralni prerez 50 mm	0,798	Van Zyl i Malde (2017)
mPVC	obodni prerez 50 mm	0,433	Van Zyl i Malde (2017)
HDPE	uzdužni prerez 73–100 mm	0,798–0,835	Van Zyl i Malde (2017)
HDPE	spiralni prerez 50–78 mm	0,656–0,703	Van Zyl i Malde (2017)
HDPE	obodni prerez 54–80 mm	–0,262–0,185	Van Zyl i Malde (2017)
HDPE (neukopan, bez aksijalnog opterećenja)	uzdužna pukotina 15 mm	0,504	Latchoomun i sur. (2015)
PE	uzdužna pukotina	1,23–1,97	Fuchs-Hanusch i sur. (2016)
PE	obodna pukotina	0,5–0,55	Fuchs-Hanusch i sur. (2016)
Azbest-cement	uzdužna pukotina (terenska oštećenja)	0,79–1,04	Greyvenstein i Van Zyl (2007)
Azbest-cement	obodna pukotina	0,5–0,55	Fuchs-Hanusch i sur. (2016)
Čelik	okrugla (bušena) rupa 12 mm	0,518	Greyvenstein i Van Zyl (2007)
Čelik	korozijska rupa (terenska oštećenja)	0,67–2,30	Greyvenstein i Van Zyl (2007)
Čelik	uzdužni prerez 50–100 mm	0,500–0,529	Van Zyl i Malde (2017)
Čelik	obodni prerez 53 mm	0,499	Van Zyl i Malde (2017)
Pocinčani čelik (neukopan)	uzdužna pukotina 15 mm	0,881	Latchoomun i sur. (2015)
Lijeвано željezo	uzdužna pukotina	0,5–0,85	Fuchs-Hanusch i sur. (2016)
Lijeвано željezo	obodna pukotina	0,5–0,68	Fuchs-Hanusch i sur. (2016)
Više materijala	propusni spoj	0,61–1,26	Fuchs-Hanusch i sur. (2016)

Izvor: laboratorijska mjerenja Greyvenstein i Van Zyl (2007) i Van Zyl i Malde (2017, Table 2); pregled literaturnih vrijednosti Fuchs-Hanusch i sur. (2016, Table 1); Latchoomun i sur. (2015) — vrijednosti prema insights bazi (Serije 1 i 2).

2.3. Terensko određivanje eksponenta N1 (metoda koraka tlaka, PRV)

Određivanje eksponenta N1, utemeljeno na mjerenjima, provodi se noćnim testom tlačnih koraka. Načelo je testa jednostavno — u hidraulički omeđenoj zoni tlak se, u pravilu ventilom za redukciju tlaka, stupnjevito mijenja tijekom razdoblja minimalnoga noćnog protoka, a iz parova istjecanja i prosječnoga zonskog tlaka u najmanje dvama stanjima eksponent se računa logaritmiranjem omjernog oblika potencijske jednadžbe, jedn. (2.5):

$$N1 = \ln(L_1/L_0) / \ln(P_1/P_0) \quad (2.13)$$

Iza jednostavnoga načela stoji, međutim, zahtjevan mjerni postupak čija svaka sastavnica unosi vlastite izvore pogreške; upravo zahtjevnost i skupoća postupka, uz osjetljivost rezultata na protokol, čine motivaciju za analitičko određivanje eksponenta koje je predmet ove disertacije.

Provedba testa obuhvaća četiri sastavnice. Prvo, zona mora biti hidraulički izolirana, s mjerenim ulaznim protokom; integritet graničnih ventila nužno je provjeriti, jer propusni granični ventili iskrivljuju odnos tlaka i istjecanja i mogu proizvesti fizikalno nemoguće rezultate (Deyi i sur., 2014; Jenks i sur., 2023). Sustavna provjera integriteta obuhvaća ispitivanje nultoga tlaka po svakom graničnom ventilu te dodatni test pada tlaka u zoni zatvaranjem regulacijskog ventila (Jenks i sur., 2023). Uz zone, ista se logika izolacije primjenjuje i na pojedinačne magistralne cjevovode, gdje o brtvljenju postojećih izolacijskih ventila izravno ovisi izvedivost ispitivanja (Niebuhr i sur., 2019). Drugo, mjerenja se provode u razdoblju minimalnoga noćnog protoka, tipično između 2:00 i 4:00 sata (Marzola i sur., 2021), kada je udio legitimne potrošnje najmanji, a hidraulički gubici u mreži zanemarivi, zbog čega se tlakovi mogu smatrati statičkima. Treće, od izmjerenoga minimalnog protoka oduzima se procijenjena legitimna noćna potrošnja; ta se procjena u praksi oslanja na literaturne vrijednosti — primjerice, oko 6 % stanovništva aktivno je noću uz ispiranje WC-a od približno 10 litara, što u različitim zemljama daje od 0,4 do 5 litara na sat po korisniku odnosno priključku (Marzola i sur., 2021), dok analiza satnih očitavanja pametnih vodomjera u kanadskim zonama daje prosječno približno 4,5 litre na sat po priključku (Jenks i sur., 2023). Četvrto, tlak koji ulazi u jedn. (2.13) mora biti reprezentativan za zonu kao cjelinu — koristi se prosječni zonski tlak, određen ponderiranjem po duljinama cjevovoda i visinama čvorova (Deyi i sur., 2014; Dundović i Tadić, 2022).

Procjena legitimne noćne potrošnje zaslužuje posebnu pozornost, jer je u zonama s malim istjecanjem upravo ona dominantan izvor nesigurnosti rezultata. Uz preuzimanje literaturnih vrijednosti, razvijeni su i statistički pristupi koji potrošnju procjenjuju iz samih mjernih podataka. U vlastitoj je prethodnoj metodologiji minimalna noćna potrošnja stanovništva procijenjena percentilnim postupkom — kao 5 % raspona između 99,5 %-tnog i 5 %-tnog percentila izmjerenih protoka (Dundović, 2017). Srodan pristup na sustavu unutar sveučilišnog kampusa s pametnim vodomjerima stvarno noćno curenje aproksimira donjom granicom intervala pouzdanosti normalne razdiobe noćnih protoka ($\mu - \sigma$), uz obrazloženje da curenje postupno podiže minimalni noćni protok, iz čega slijedi da je ispravno uzeti nižu vrijednost razdiobe (Zhang i sur., 2024). Tamo gdje postoji napredna mjerna infrastruktura, noćna se potrošnja procjenjuje statističkom analizom satnih očitanja vodomjera, pri čemu varijabilnost procjene naglo pada s brojem priključaka i značajno se sužava za zone s približno 500 i više priključaka (Jenks i sur., 2023). Komplementaran alat predstavlja i normirano uspoređivanje minimalnih noćnih protoka među zonama. Referentne vrijednosti izvedene na skupini „zdravih” kanadskih zona — primjerice 6,4 litre na sat po priključku odnosno 2,2 litre na sat po stanovniku — omogućuju prepoznavanje zona s viškom curenja i prije provedbe tlačnoga testa, dok se normiranje po duljini mreže pokazalo znatno slabijim (Jenks i sur., 2023).

Dokumentirani terenski protokoli razlikuju se u trajanju, broju koraka i načinu stvaranja tlačne razlike. U južnoafričkoj studiji KwaDabeka podaci su logirani sedam punih dana u 15-minutnim intervalima po zoni, a eksponent je određen usporedbom stanja prije i poslije uvođenja upravljanja tlakom (Deyi i sur., 2014). U turskom Kayseriju pilot-zona integrirana u sustav daljinskog nadzora i upravljanja (SCADA, engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*) pratila je učinak sniženja radnoga tlaka s 9,1 na 3,1 bar, ostvarenoga ugradnjom daljinski upravljani og ventila za redukciju tlaka, uz komponentnu analizu noćnoga protoka ( zdemir i sur., 2021). U talijanskoj zoni Santa Colomba tromjesečna mjerna kampanja s vremenskim upravljanjem ventilom (noćni tlak mijenjan između 40 i 60 m) omogućila je prilagodbu potencijske jednadžbe na velikom broju radnih točaka. Za mrežu s 85 % duktilnog lijeva dobiven je eksponent oko 0,7, pri čemu su detaljni čvorni model i pojednostavljeni pristup preko prosječnoga zonskog tlaka dali praktički jednake vrijednosti (0,72 odnosno 0,75), neovisne o razini tlaka — stoga autori vrijednosti nešto veće od eksponenta otvora preporučuju za mreže s malim udjelom plastičnih cijevi (Fontana i sur., 2017). U vlastitom terenskom pokusu u maloj hrvatskoj zoni s isključivo PVC mrežom tlak je na pilotski upravljani om ventilu sni avan u tri koraka (4,0, 3,0 i 2,0 bara) tijekom triju uzastopnih dana, uz mjerenje protoka i

tlaka u minutnim intervalima; iz izmjerenih parova istjecanja i ponderiranoga srednjeg tlaka dobiveno je $N1 = 1,76$, a metodologija je validirana kalibriranim hidrauličkim modelom koji je reproducirao mjerene noćne protoke s prosječnom razlikom od 4 % (Dundović i Tadić, 2022). Suvremeni pristupi idu prema mobilnosti i automatizaciji. Mobilna mjerna jedinica s protokomjerima i ventilom u dostavnom vozilu omogućuje privremeno konfiguriranje mjernih zona bez trajne opreme, a tehnika cikliranja tlaka — izmjena punoga i sniženoga tlaka u približno 30-minutnim intervalima unutar iste noći — uklanja utjecaj razlika u potrošnji među različitim noćima (Jenks i sur., 2023). Za magistralne cjevovode razvijena je srodna tlačna metoda s mobilnom crpnom opremom, kojom se izolirana dionica održava na nizu zadanih tlakova, a iz prilagodbe FAVAD jednadžbe procjenjuju površina i nagib otvora te vjerojatni tip i lokacija curenja (Niebuhr i sur., 2019). Važnost samoga protokola sažima analogija s mjerenjem krvnoga tlaka — rezultat je upotrebljiv samo ako je mjerenje provedeno propisanim postupkom, na reprezentativnoj točki prosječnoga zonskog tlaka i pri stabilnom minimalnom noćnom protoku (Lambert i sur., 2017).

S testom tlačnih koraka povezana je i pretvorba noćnoga istjecanja u dnevne i godišnje volumene, o kojima u konačnici ovise ekonomske ocjene. Pretvorba se provodi množenjem noćne stope istjecanja faktorom noć–dan (NDF, engl. *Night-Day Factor*), izraženim u satima na dan, koji uzima u obzir dnevni profil zonskoga tlaka. Budući da istjecanje danju, pri nižim tlakovima zbog veće potrošnje, pada ispod noćne razine, NDF u pravilu odstupa od 24 — u gravitacijskim sustavima tipično iznosi 18 do 23 sata na dan, a uz regulaciju tlaka može premašiti 24 (Özdemir i sur., 2021). Ovisno o dnevnom profilu tlaka NDF može varirati od manje od 10 do više od 40 sati na dan, zbog čega je pogrešan odabir toga faktora jedan od najvećih izvora pogreške u procjeni dnevnog i godišnjeg istjecanja iz noćnih mjerenja; posebno, smanjenje noćnoga tlaka povećava NDF, što znači da procjene ušteda računane umnoškom smanjenja noćnoga protoka i NDF-a utvrđenoga prije snižavanja tlaka sustavno precjenjuju stvarne uštede (Lambert i sur., 2017). Kalibracija zonske FAVAD jednadžbe, jedn. (2.11), iz podataka tlačnoga testa te pogreške zaobilazi, jer 24-satni profil istjecanja izvodi izravno iz izmjerenoga profila zonskoga tlaka (Lambert i sur., 2017).

Zahtjevnost postupka proizlazi iz njegovih praktičnih preduvjeta. Test traži noćni terenski rad, privremenu ili trajnu ugradnju regulacijske opreme, pouzdana mjerila protoka s niskim mjernim pragom te pažljivu pripremu koja uključuje i simulaciju pokusa na hidrauličkom modelu; manipulacije tlakom mogu utjecati na potrošače i uzrokovati smetnje u vodoopskrbi, stoga se opseg i trajanje testa moraju ograničiti (Dundović i Tadić, 2022). Tamo gdje granice zona nisu

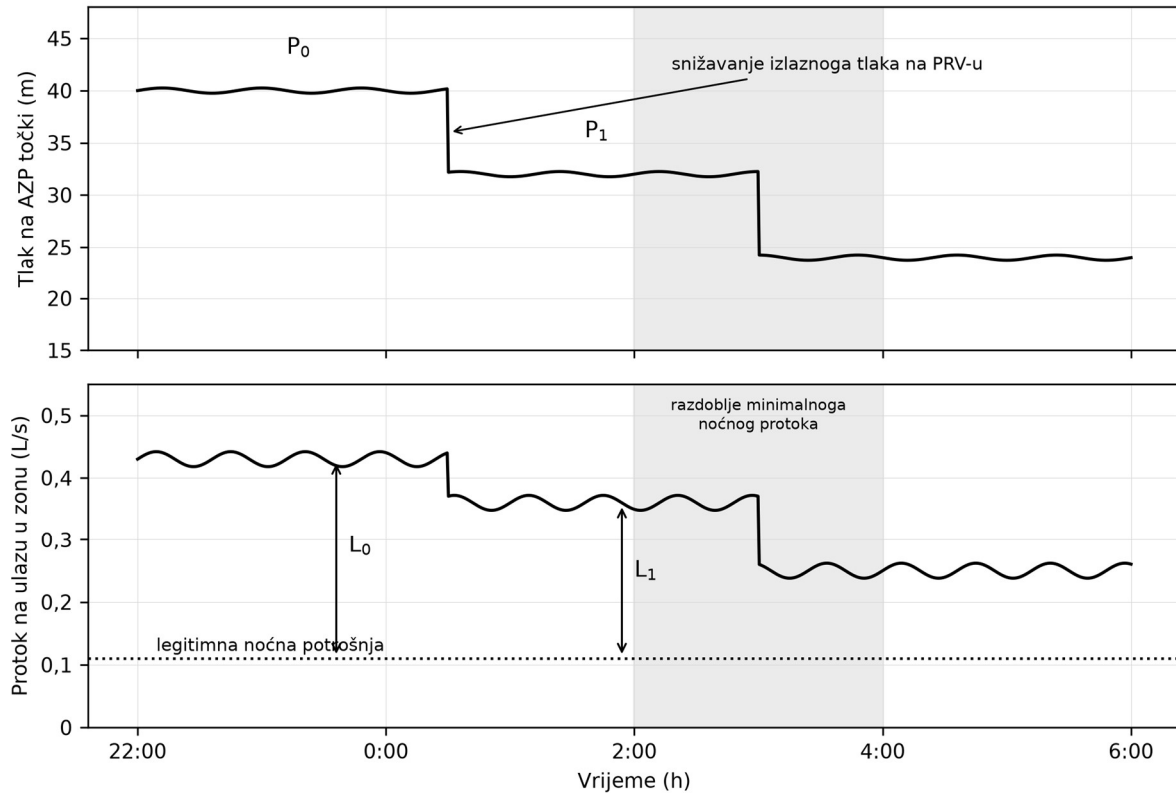
opremljene, zatvaranje i provjera ventila mogu biti dugotrajni — ventili pod asfaltom i nepotpune evidencije o tome koji ventil napaja koju cijev produljuju terenski rad i povećavaju troškove (Özdemir i sur., 2021). U zonama s isprekidanom opskrbom i kućnim spremnicima stabilna razdoblja minimalnoga protoka rijetka su, zbog čega se termin testa mora pažljivo birati (Lambert i sur., 2017).

Uz praktičnu zahtjevnost, terenski određeni eksponent opterećuju i sustavni izvori pogreške, koje je za ispravnu interpretaciju rezultata nužno poznavati. Prvo, pogreška prosječnoga zonskog tlaka prenosi se približno proporcionalno na pogrešku eksponenta — pogreška tlaka od 10 % uzrokuje pogrešku eksponenta od približno 10 % (Schwaller i van Zyl, 2015). Drugo, procjena iz samo dvaju stanja tlaka statistički je nestabilna. Usporedba metoda procjene na potpuno nadziranoj zoni s pametnim vodomjerima pokazala je da parametri određeni iz pojedinačnih parova radnih točaka variraju ekstremno, sve do fizikalno besmislenih vrijednosti, dok stabilne procjene daju tek prilagodbe na duljim vremenskim serijama kakve vodovodima obično nisu dostupne; ohrabrujuće je, s druge strane, da parovi eksponenta i broja curenja procijenjeni svim metodama padaju na teorijsku konverzijsku krivulju iz jedn. (2.9) — što potvrđuje unutarnju konzistentnost FAVAD okvira i na razini stvarne zone (Marzola i sur., 2021). Treće, rezultat je osjetljiv na procjenu legitimne noćne potrošnje, osobito u zonama s malim istjecanjem — u kanadskim mjerenjima zone s velikim viškom curenja imale su stabilan eksponent blizu 0,5, dok su zone s malim istjecanjem davale vrijednosti od 0,9 do 3,2 uz veliku varijabilnost, a dva su rezultata (6,1 i 4,6) odbačena kao nerealna uz sumnju na propusne granične ventile ili pogrešno procijenjenu noćnu potrošnju (Jenks i sur., 2023). Četvrto, sadrži li noćni protok tlačno-ovisnu potrošnju, izmjereni eksponent sustavno podcjenjuje stvarni (Van Zyl i Clayton, 2007; Garmendia i sur., 2019). Peto, sama dubina tlačnoga koraka utječe na rezultat — veliko smanjenje tlaka daje niži izmjereni eksponent, približno jednak prosjeku eksponenata pri tlakovima prije i poslije koraka (Schwaller i van Zyl, 2015). Kvantifikacija toga učinka na vlastitoj međunarodnoj bazi terenskih testova, s izvedenim preporučenim pojasom relativne dubine koraka, izložena je u pogl. 5.4. Konačno, budući da eksponent varira s tlakom (pogl. 2.2.2), uz svaku je izmjerenu vrijednost preporuka navesti i prosječni zonski tlak pri kojem je određena (Jenks i sur., 2023).

Ista mjerenja koja daju eksponent omogućuju i dublju dijagnostiku zone. Na razini zone mnoštvo pojedinačnih otvora ponaša se približno kao jedan zamjenski otvor. Zbrajanjem linearnih odnosa površine i tlaka svih otvora dobivaju se sustavska (zonska) početna površina i sustavski nagib, iskazani prema tlaku na mjerodavnoj AZP točki (pogl. 2.2.1), a procjenjuju se

iz dvaju stanja tlaka. Budući da otvori na različitim nadmorskim visinama osjećaju različite lokalne tlakove, točnost te zamjene ovisi ponajprije o rasponu visinskih razlika u zoni — u ravničarskim zonama, gdje svi otvori osjećaju praktički isti tlak, pogreška procijenjene početne površine pada ispod 1 %, dok za zone tipične topografije iznosi reda 10 %. Pritom se preporučuje rad s efektivnim veličinama — umnoškom koeficijenta istjecanja i površine otvora — čime otpada potreba za pretpostavljanjem samoga koeficijenta istjecanja (Schwaller i sur., 2015). Predznak i iznos nagiba upućuju na dominantni tip otvora. Vrijednosti između $-0,02$ i $+0,02$ mm²/m odgovaraju okruglim rupama, vrijednosti između $-0,5$ i $+0,5$ mm²/m obodnim pukotinama, a vrijednosti veće od $0,3$ mm²/m uzdužnim pukotinama (Niebuhr i sur., 2019). Fizikalno nemoguće vrijednosti — primjerice negativna ukupna površina otvora, kakva je u terenskoj studiji KwaDabeka dobivena upravo za sve zone s $N1 > 1,5$ — imaju dijagnostičku vrijednost jer upućuju na pogreške mjerenja, propusne granične ventile ili deformacijske mehanizme izvan elastičnoga modela (Deyi i sur., 2014; van Zyl i sur., 2017).

Ekonomsku vrijednost mjerenjem utemeljene ocjene zone zorno pokazuje dokumentirani kanadski slučaj. Mjerenjima u privremeno konfiguriranoj zoni otkriven je višak istjecanja od približno 5 l/s, lociran na privatnom posjedu s otjecanjem u oborinsku kanalizaciju, a ponovljenim je mjerenjem nakon popravka verificirano smanjenje od 4,4 l/s — što odgovara godišnjoj uštedi od 139.000 m³ vode, 426.000 kanadskih dolara i 102 MWh energije (Jenks i sur., 2023). Isti mjerni okvir koji omogućuje takve nalaze daje i eksponent $N1$; trošak i organizacijska zahtjevnost, međutim, ograničavaju njegovu primjenu na manji broj zona, dok investicijske odluke o upravljanju tlakom treba donositi za sve. Tijek testa po metodi koraka tlaka shematski je prikazan na slici 2.4.



Slika 2.4. Shema noćnog testa tlačnih koraka

Kao alternativa terenskom mjerenju u literaturi postoje i teorijski izrazi koji eksponent procjenjuju iz infrastrukturnog indeksa curenja i udjela krutih cijevi p_{kr} u mreži (Dundović i Tadić, 2022; Beygi i van Zyl, 2024):

$$N1 = 1,5 - (1 - 0,65/ILI) \cdot p_{kr}/100 \quad (2.14)$$

$$N1 = 1,5 - (1 - 0,667 \cdot ICF/ILI) \cdot p_{kr}/100 \quad (2.15)$$

pri čemu se jedn. (2.14) odnosi na zone s malim pozadinskim istjecanjem, a jedn. (2.15), s faktorom stanja infrastrukture ICF, na zone s većim; za mrežu u cijelosti od plastičnih cijevi ($p_{kr} = 0$) obje daju $N1 = 1,5$ (Dundović i Tadić, 2022). Upravo je usporedba te teorijske vrijednosti s terenski izmjerenom (1,76 prema 1,5) bila predmet vlastite prethodne verifikacije (Dundović i Tadić, 2022). Suvremeno stohastičko modeliranje pokazalo je, međutim, da ovi izrazi znatno odstupaju od simuliranih razdioba eksponenta po materijalima i razinama gubitaka te da ih treba ažurirati (Beygi i van Zyl, 2024). Time se zatvara argumentacijski krug ovoga potpoglavlja. Terensko je mjerenje eksponenta skupo, organizacijski zahtjevno i opterećeno protokolskim pogreškama, a raspoloživi teorijski nadomjesci nepouzđani su — stoga određivanje eksponenta iz rutinski dostupnih podataka zone metodama strojnog učenja, čiji su

osnovni pojmovi predmet sljedećega potpoglavlja, predstavlja metodološki logičan sljedeći korak.

2.4. Strojno učenje — osnovni pojmovi relevantni za rad

Strojno učenje obuhvaća metode kojima se matematički modeli ne zadaju unaprijed u potpunosti, nego se njihovi parametri — a dijelom i struktura — uče iz podataka. Primjene tih metoda u vodoopskrbnim sustavima pregledane su u literaturi, od upravljanja vodoopskrbnim mrežama u cjelini (Robles-Velasco i sur., 2021a) do ocjene kvalitete vode (Oğuz i Ertuğrul, 2023), a metode umjetne inteligencije i ekspertnih sustava istražuju se i u domaćem građevinskom i komunalnom kontekstu (Obradović i sur., 2019; Grčić i Šperac, 2024); sadržajni pregled tih primjena dan je u pogl. 3.3. Ovo potpoglavlje uvodi osnovne pojmove potrebne za razumijevanje metodološkog okvira disertacije (pogl. 4): regresijski zadatak i linearne metode, stabla odlučivanja i metode ansambla, unakrsnu validaciju te mjere pogreške.

Disertacija pripada području nadziranog učenja. Raspolaze se skupom za učenje u kojem je za svaki primjer — ovdje za svaki terenski test tlačnih koraka u mjernoj zoni — poznata i vrijednost ciljne veličine (terenski izmjereni eksponent $N1$) i vektor ulaznih značajki (parametri zone dostupni bez testa). Zadaća je algoritma naučiti preslikavanje značajki u ciljnu veličinu koje se prenosi na primjere izvan skupa za učenje. Budući da je ciljna veličina kontinuirana, riječ je o regresijskom zadatku, za razliku od klasifikacije kod koje je cilj razvrstavanje u diskretne razrede (Hastie i sur., 2009). Terminološki se razlikuju varijable — sirove ulazne veličine — i značajke, veličine konstruirane iz varijabli za potrebe modeliranja (Guyon i Elisseeff, 2003); u nastavku se, gdje razlika nije bitna, koristi zajednički naziv značajke.

Regresijske metode. Polazna je metoda linearna regresija, u kojoj se ciljna veličina modelira linearnom kombinacijom značajki, a koeficijenti se određuju metodom običnih najmanjih kvadrata (OLS, engl. *Ordinary Least Squares*) — minimizacijom sume kvadrata reziduala. Klasična pretpostavka OLS-a jest da su pogreške opažanja međusobno nekorelirane i jednakih varijanci; za opažanja nejednake pouzdanosti ili korelirane pogreške ispravan je okvir poopćenje najmanjih kvadrata koje minimizira sumu kvadrata ponderiranu inverzom kovarijacijske matrice pogrešaka, formulirano još u klasičnom radu Aitkena (Aitken, 1936). Poseban slučaj toga poopćenja s dijagonalnom kovarijacijskom matricom — ponderirani najmanji kvadrati (WLS, engl. *Weighted Least Squares*), u kojima svako opažanje ulazi u prilagodbu s vlastitom težinom — ima središnju ulogu u ovoj disertaciji, jer terenski izmjereni eksponenti $N1$ dolaze s vrlo nejednakom mjernom pouzdanošću (pogl. 4.3.5).

Kad su značajke međusobno korelirane, OLS procjene postaju nestabilne — koeficijenti poprimaju velike apsolutne vrijednosti i snažno reagiraju na male promjene podataka. Rješenje nudi regularizacija — svjesno unošenje pristranosti radi bitnog smanjenja varijance procjene. Ridge regresija dodaje kvadratnu (L2) kaznu na veličinu koeficijenata; za nju je dokazano da uvijek postoji stupanj regularizacije uz koji je srednja kvadratna pogreška procjene manja nego kod OLS-a — to je klasična formulacija kompromisa pristranosti i varijance (Hoerl i Kennard, 1970). Lasso regresija (engl. *least absolute shrinkage and selection operator*) kaznu zadaje sumom apsolutnih vrijednosti koeficijenata (L1). Geometrija te kazne uzrokuje da pri dovoljno jakoj regularizaciji pojedini koeficijenti postaju točno jednaki nuli, zbog čega lasso istodobno regularizira i odabire značajke, dajući rijetke i interpretabilne modele (Tibshirani, 1996). Odabir diskretnim uključivanjem i isključivanjem značajki (engl. *subset selection*) tome je nasuprot vrlo varijabilan — male promjene podataka daju bitno različite modele — dok su regularizacijske metode kontinuirane i stabilnije (Tibshirani, 1996; Hastie i sur., 2009). Nijedna od metoda pritom ne dominira univerzalno — uz mali broj velikih efekata najbolji je diskretni odabir, uz umjeren broj umjerenih efekata lasso, a uz velik broj malih efekata ridge (Tibshirani, 1996).

Stabla odlučivanja i metode ansambla. Regresijska stabla, formalizirana metodologijom CART (engl. *Classification and Regression Trees*), grade model rekurzivnom binarnom podjelom prostora značajki. U svakom se čvoru bira značajka i prag podjele koji najviše smanjuju sumu kvadrata reziduala, a predikcija u listu je prosjek ciljnih vrijednosti pripadajućih primjera (Breiman i sur., 1984). Metodologija je izvorno razvijena upravo za velike, nehomogene skupove podataka na kojima klasične statističke metode, koje pretpostavljaju homogenost i standardnu strukturu, zakazuju — snaga je stabala u tome što dopuštaju različite veze u različitim dijelovima prostora značajki te što uz predikciju daju i uvid u prediktivnu strukturu podataka, a kontrola složenosti provodi se orezivanjem stabla uz odabir stupnja složenosti unakrsnom validacijom (Breiman i sur., 1984). Ta je fleksibilnost relevantna i za problem ove disertacije. Veza eksponenta N1 sa značajkama zone mogla bi se razlikovati između, primjerice, zona s velikim i malim gubicima — što je upravo tip strukture koji stabla mogu uhvatiti, a globalni linearni model ne može. Pojedinačno stablo je, međutim, procjenitelj visoke varijance, stoga suvremenu praksu čine metode ansambla koje kombiniraju mnogo stabala.

Slučajne šume kombiniraju uzorkovanje s ponavljanjem (engl. *bootstrap*) i slučajni odabir podskupa značajki u svakom čvoru, čime se stabla međusobno dekoreliraju, a predikcija je

prosjek predikcija svih stabala (Breiman, 2001). Za regresiju vrijedi da je generalizacijska pogreška šume omeđena umnoškom prosječne korelacije reziduala stabala i pogreške pojedinačnog stabla — ansambl je utoliko bolji ukoliko su stabla pojedinačno točnija i međusobno manje korelirana — a povećanjem broja stabala pogreška konvergira, te šuma dodavanjem stabala ne prenaučuje (Breiman, 2001). Metoda usput daje i dva praktična alata: procjenu pogreške na izostavljenim (engl. *out-of-bag*) uzorcima, koja je približno jednaka procjeni unakrsnom validacijom s izostavljanjem po jednoga primjera, zbog čega se šuma može učiti i vrednovati u jednom prolazu, te permutacijsku mjeru važnosti značajki — pogoršanje točnosti nakon slučajnog permutiranja vrijednosti pojedine značajke (Breiman, 2001; Hastie i sur., 2009). Uobičajene početne postavke za regresiju — trećina značajki kao kandidati po čvoru i minimalna veličina lista od pet primjera — u praksi daju dobre rezultate, ali ih je ispravno tretirati kao parametre za ugađanje, jer optimalne vrijednosti ovise o problemu (Hastie i sur., 2009). Gradijentno pojačavanje gradi ansambl postupno. Svaki se novi, namjerno mali član ansambla prilagođava negativnom gradijentu funkcije gubitka postojećeg modela — za kvadratni gubitak upravo rezidualima — stoga se model iterativno popravljaju tamo gdje najviše griješi; složenost se kontrolira brojem članova i stopom učenja, pri čemu male stope učenja uz više članova daju sustavno bolje rezultate (Friedman, 2001). Izbor funkcije gubitka (kvadratna, apsolutna, Huberova) određuje robusnost postupka na stršće vrijednosti (Friedman, 2001). U izravnim usporedbama slučajne šume postižu vrlo dobre rezultate uz malo ugađanja, dok pojačavanje uz pažljivo ugađanje često postiže nešto bolju točnost (Hastie i sur., 2009). Usporedba ovih obitelji algoritama na problemu određivanja eksponenta N1 provedena je u pogl. 4.4.

Odabir značajki. Odabir značajki slijedi trostruki cilj: poboljšati prediktivnu točnost, dobiti brže i podatkovno jeftinije značajke te bolje razumjeti proces koji je podatke generirao (Guyon i Elisseeff, 2003); u kontekstu ove disertacije treći je cilj ravnopravan prvim, jer identifikacija parametara koji nose informaciju o eksponentu N1 čini sadržaj hipoteze H1. Metode odabira značajki dijele se u tri klase (Guyon i Elisseeff, 2003): filtarske (engl. *filter*), koje značajke rangiraju statističkim kriterijem neovisno o bilo kojem modelu; ugrađene (engl. *embedded*), kod kojih se odabir odvija unutar samog treniranja modela — primjerice Lasso, koji koeficijente neinformativnih značajki stiže na nulu; te omotačke (engl. *wrapper*), koje postupak odabira omataju oko modela opetovanim treniranjem i vrednovanjem na podskupovima značajki — po naravi općenitije, ali računski skupe i sklonije prenaučanju. Pojedinačno rangiranje računski je i statistički najrobusnije, ali načelno ne može otkriti značajke koje su korisne tek u kombinaciji

— dvije značajke pojedinačno beskorisne mogu zajedno davati potpunu separaciju (Guyon i Elisseeff, 2003). Kao objektivan prag relevantnosti služi i metoda sonde — u skup značajki uvedu se umjetne slučajne varijable, a odbacuje se sve što je rangirano ispod njih, čime se ograničava udio lažno relevantnih značajki u odabranom podskupu (Guyon i Elisseeff, 2003). Uz odabir je vezan i oprez pri tumačenju važnosti značajki. Kad više različitih modela postiže gotovo jednaku točnost — što je pravilo na malim uzorcima — važnost pojedine značajke može se bitno razlikovati od modela do modela — pojava u statistici nazvana Rashomonovim efektom, prema terminu koji je skovao Breiman — zbog čega je važnost ispravnije iskazivati rasponom preko svih približno jednako uspješnih modela nego točkom iz jednoga (Fisher i sur., 2019). Iz tih razloga metodološki okvir disertacije kombinira sve tri klase odabira i permutacijsku važnost te zahtijeva njihovu suglasnost (pogl. 4.3.4).

Unakrsna validacija. Ključno pitanje svakoga naučenog modela jest njegova točnost na podacima koje tijekom učenja nije vidio. Model prevelike složenosti prilagodit će se šumu u podacima za učenje — pojava prenaučenosti — te će na novim podacima biti lošiji od jednostavnijeg modela, zbog čega se točnost nikada ne smije ocjenjivati na podacima korištenima za učenje jer je takva procjena (resupstitucija) sustavno preoptimistična (Breiman i sur., 1984; Hastie i sur., 2009). Standardni je odgovor unakrsna validacija, formalizirana u klasičnom radu Stonea. Skup se podataka podijeli na dijelove, model se uzastopce uči na svim dijelovima osim jednoga i vrednuje na izostavljenome, a postupak istodobno služi i za izbor modela (hiperparametara) i za ocjenu njegove točnosti (Stone, 1974). Rubni slučaj s izostavljanjem po jednoga primjera daje približno nepristranu, ali visoko varijabilnu i računski skupu procjenu, stoga se u praksi najčešće koristi podjela na pet ili deset dijelova kao kompromis pristranosti i varijance procjene, uz pravilo jedne standardne pogreške za izbor najštedljivijeg modela čija je pogreška unutar jedne standardne pogreške od najboljega (Hastie i sur., 2009). Postupak pritom istodobno rješava dva zadatka koja su prije njega bila razdvojena — izbor modela i ocjenu njegove kvalitete — što ga čini prirodnim okvirom i za ugađanje hiperparametara regularizacije i ansambala (Stone, 1974). Dva su uvjeta valjanosti postupka presudna, a oba su u primijenjenoj literaturi često narušena. Prvi je uvjet da se svaki korak koji koristi ciljnu veličinu — uključujući probir značajki — provodi unutar validacijske petlje — probir na svim podacima prije podjele daje drastično podcijenjenju pogrešku, u ilustrativnom primjeru 3 % umjesto stvarnih 50 % (Hastie i sur., 2009). Općenitije, svako uvođenje informacije koja u trenutku primjene modela ne bi bila legitimno dostupna — u podatke, značajke ili projektantske odluke — naziva se curenjem informacija i vodi precijenjenim

performansama koje se u primjeni ne ostvaruju; neobično dobre performanse modela stoga su prvi signal za sumnju na curenje (Kaufman i sur., 2012). Sustavna obrana od curenja jest stroga podjela učenja i predviđanja. Svakoj se veličini pridružuje oznaka legitimnosti — u prediktivnim zadacima ponajprije vremenska, prema načelu da značajka smije prethoditi cilju — a modelu se tijekom učenja uskraćuje sve što u trenutku primjene ne bi bilo dostupno (Kaufman i sur., 2012). U kontekstu ove disertacije to načelo ima konkretan oblik — veličine izvedene iz samog testa tlačnih koraka ne smiju biti ulazne značajke modela koji taj test treba nadomjestiti, jer bi model time postao cirkularan (pogl. 4.3.2). Drugi je uvjet neovisnost primjera. Kad podaci imaju unutarnju strukturu zavisnosti — prostornu, vremensku ili hijerarhijsku, poput više mjerenja u istoj mjernoj zoni — nasumična podjela razdvaja zavisne primjere u skup za učenje i skup za provjeru, zbog čega procjena pogreške ozbiljno podcjenjuje stvarnu; ispravan je postupak blok-validacija, u kojoj se dijelovi formiraju po cijelim blokovima zavisnih primjera, čime se procjene približavaju stvarnim vrijednostima (Roberts i sur., 2017). Upravo je to razlog zašto se sva vrednovanja modela u ovoj disertaciji provode unakrsnom validacijom grupiranom po mjernim zonama (pogl. 4.3.1).

Mjere pogreške. Za regresijske modele točnost se iskazuje mjerama pogreške na neviđenim podacima. Srednja apsolutna pogreška MAE definirana je u pogl. 4.3.6, jedn. (4.2). Ona daje jednaku težinu svim pogreškama i izražena je u jedinicama ciljne veličine. Korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE, engl. *Root Mean Square Error*) kažnjava velike pogreške kvadratno. O izboru između tih mjera u metodološkoj se literaturi vodi dokumentirana rasprava. S jedne je strane pokazano da RMSE ovisi o tri karakteristike skupa pogrešaka — prosječnoj pogrešci, varijanci njihovih iznosa i broju uzoraka — te kao mjera prosječne pogreške nije jednoznačan, iz čega slijedi preporuka da se prosječna točnost iskazuje MAE mjerom (Willmott i Matsuura, 2005); s druge je strane pokazano da je RMSE matematički korektna metrika, prikladnija od MAE kad su pogreške približno normalno raspodijeljene i kad je kažnjavanje velikih pogrešaka poželjno — a praktična joj je prednost i izbjegavanje apsolutne vrijednosti u optimizacijskim postupcima temeljenima na gradijentima — uz zaključak da nijedna mjera nije univerzalno superiorna te da je uputno izvještavati kombinaciju mjera (Chai i Draxler, 2014). Dvije su mjere međusobno omeđene odnosom $MAE \leq RMSE \leq \sqrt{n} \cdot MAE$ — jednake su kad su svi iznosi pogrešaka jednaki, a razmiču se s porastom varijance iznosa pogrešaka (Willmott i Matsuura, 2005). Uz mjere pogreške uobičajeno se navodi i koeficijent determinacije R^2 , jedn. (4.4), no njegova upotreba traži oprez jer u literaturi kruži više neekvivalentnih definicija koje se podudaraju samo za linearni model s odsječkom, usporedbe R^2 preko različitih transformacija

ciljne veličine nisu valjane, a visoka vrijednost R^2 sama po sebi ne dokazuje adekvatnost modela — nužna je i analiza reziduala (Kvålseth, 1985). U ovoj se disertaciji stoga dosljedno koristi definicija prema jedn. (4.4), a kao primarna mjera uspješnosti odabrana je MAE; potpuno obrazloženje toga izbora, uključujući i specifičnosti šumovitih terenskih mjerenja ciljne veličine, dano je u pogl. 4.3.6.

Prikazani pojmovi — regresijske metode od najmanjih kvadrata do ansambala, discipline valjane validacije na strukturiranim podacima te promišljen izbor mjera pogreške — čine konceptualni alat kojim se u nastavku disertacije gradi i vrednuje model za analitičko određivanje eksponenta curenja N1. Njihova konkretna operacionalizacija na međunarodnoj bazi terenskih testova tlačnih koraka predmet je 4. poglavlja.

3. Pregled dosadašnjih istraživanja

3.1. Terenska istraživanja eksponenta N1

Dok su u pogl. 2.2 i 2.3 dosadašnja istraživanja korištena za izgradnju fizikalne slike odnosa tlaka i istjecanja, ovo potpoglavlje ista i dodatna istraživanja pregledava kao znanstvene studije — prikazuju se mjesta i uvjeti provedbe, primijenjene metode, dobivene vrijednosti eksponenta N1 i pouke koje iz njih proizlaze za disertaciju. Pregled obuhvaća laboratorijska ispitivanja na pojedinačnim otvorima, terenska ispitivanja na razini mjernih zona i magistralnih cjevovoda te studije u kojima se eksponent pojavljuje kao kalibracijski parametar hidrauličkog modela, a za svaku se studiju prate tri pitanja: kojim je postupkom i uz koje pretpostavke eksponent određen, koje su vrijednosti dobivene i s kojom pouzdanošću te što studija govori o izvedivosti i cijeni terenskog određivanja. Zajednički empirijski okvir svih studija čini raspon terenski izmjerenih vrijednosti od 0,5 do 2,79 uz medijan oko 1,15 (Van Zyl i Clayton, 2007), no pojedinačne studije, kako će pregled pokazati, bilježe i vrijednosti izvan tog raspona u oba smjera. Pregledna tablica 3.1 sažima autore, područja, opsege i rezultate razmatranih istraživanja.

Tablica 3.1. Pregled terenskih i laboratorijskih istraživanja eksponenta N1

Autori (godina)	Država	Opseg	Materijal	Metoda određivanja	N1	Ključni nalaz
Greyvenstein i Van Zyl (2007)	Južnoafrička Republika	14 uzoraka cijevi (laboratorij)	azbest-cement, čelik, uPVC	laboratorijski postav, prilagodba potencijske krivulje	0,42–2,30	tip otvora bolji pokazatelj eksponenta od materijala; najviši eksponenti u korodiranom čeliku
Latchoomun i sur. (2015)	Mauricijus	3 cijevi × više prereza (laboratorij)	HDPE, uPVC, pocinčani čelik	neukopane cijevi, linearizacija potencijske jednadžbe	0,504–0,881	kod neopterećenog HDPE-a otvor se zatvara s tlakom te N1 pada prema 0,5 — trend suprotan uPVC-u i čeliku
Latifi i sur. (2018)	Iran	10 tala × 2 tipa otvora (laboratorij)	polietilen	cijev u kutiji s tlom, vaganje istekle vode (15–55 m)	0,4569–0,5745	tlo mijenja koeficijent, a ne eksponent jednadžbe curenja; mjerenja u zraku precjenjuju istjecanje
Deyi i sur. (2014)	Južnoafrička Republika	12 zona upravljanja tlakom	pretežno plastika, azbest-cement	tjedno logiranje, FAVAD parametri iz stanja prije/poslije upravljanja tlakom	0,18–3,33	najširi zabilježeni raspon u jednoj studiji; zone s N1 > 1,5 imaju fizikalno nemoguć negativan zbroj početnih površina otvora
Marzola i sur. (2021)	Italija	1 zona, 294 korisnika, 45 dana	—	usporedba 5 metoda procjene na referentno	—	procjena iz samo dva para tlak–curenje ekstremno varijabilna;

Autori (godina)	Država	Opseg	Materijal	Metoda određivanja	N1	Ključni nalaz
				poznatoj seriji curenja		pouzdanе tek prilagodbe na cijelim vremenskim serijama
Fontana i sur. (2017)	Italija	1 zona, 82 dana	85 % duktilni lijev	noćna regulacija tlaka PRV-om, čvorni model pozadinskog istjecanja	0,72–0,75	za mreže s malim udjelom plastike preporučene stabilne vrijednosti oko 0,7, neovisne o razini tlaka
Özdemir i sur. (2021)	Turska	1 pilot-zona (32,23 km, 931 priključak)	PE, PVC	dvofazno: aktivna kontrola curenja, zatim upravljanje tlakom; BABE i NDF	1,5 (pretpostavljen)	FAVAD proračun s pretpostavljenim N1 = 1,5 precijenio smanjenje istjecanja (predviđeno 1,33, izmjereno 3,01 l/s)
Niebuhr i sur. (2019)	Južnoafrička Republika	15 dionica magistralnih vodova (10 uspješno)	razni (promjeri 50–600 mm)	izolacija dionice mobilnom opremom, modificirana jednadžba otvora	npr. 1,31 (studija slučaja)	promjena površine otvora linearna s tlakom u svim slučajevima; iz nagiba se dijagnosticira tip i lokacija curenja
Jenks i sur. (2023)	Kanada	25 skupova rezultata u 23 zone	razni	cikliranje tlaka unutar jedne noći, mobilna jedinica s PRV-om	0,5–3,2	zone s velikim viškom curenja stabilno N1 ≈ 0,5; zone s malim istjecanjem promjenjivo 0,9–3,2; bez korelacije s materijalom
Amoatey i sur. (2022)	Gana	1 mreža (~150 km, ~5700 priključaka)	70 % plastika	MNF metoda prilagođena uvjetima zemalja u razvoju	2,4	terenski eksponent višestruko premašuje teorijski očekivanu vrijednost ~1,0; utjecaj procjene noćne populacije dvostruko veći od utjecaja N1
Dundović (2017)	Hrvatska	1 zona (278 priključaka) + 23 zone iz prakse	100 % PVC	stupnjevito snižavanje tlaka na regulacijskom ventilu, percentilni izračun gubitaka, hidraulički model	1,76 (mjereno)	uvarena metoda optimalnog tlaka za korekciju ILI pokazatelja; ILI na 23 zone 0,0–44,2
Dundović i Tadić (2022)	Hrvatska	1 zona (278 priključaka, 7,4 km)	100 % PVC	trodnevni test tlačnih koraka (4,0 → 3,0 → 2,0 bara), kalibrirani hidraulički model	1,76	izmjerena vrijednost iznad teorijske 1,5 za čisti PVC; model reproducira mjereni MNF unutar 4 %
Nasirian i Ahrari (2022)	Iran	mreža s 1140 čvorova	—	kalibracija hidrauličkog modela (SSR-LF optimizacija)	0,9–1,2 (usvojeno 1,15)	dobra vrijednost funkcije cilja ne jamči točnu lokalizaciju curenja (ekvifinalnost); pouzdanost iz

Autori (godina)	Država	Opseg	Materijal	Metoda određivanja	N1	Ključni nalaz
						suglasja više rješenja
Sebbagh i sur. (2018)	Alžir	sektor od 87 km	—	genetski algoritam, N1 kao jedinstveni mrežni kalibracijski parametar	1,1	pred-locirano 36 stvarnih neprijavljenih curenja ukupno ~57 m ³ /h; eksponent slobodni parametar bez neovisne terenske provjere

Izvor: insights baza, Serija 1 (terenska i laboratorijska istraživanja N1); vrijednosti prema izvornim studijama navedenima u retcima.

Laboratorijska ispitivanja povijesno prethode zonskim kampanjama i daju im interpretacijski okvir — tek kad je poznato kako se pojedini tipovi otvora ponašaju u kontroliranim uvjetima, terenske zonske vrijednosti dobivaju fizikalno značenje. Temeljno takvo istraživanje provedeno je na Sveučilištu u Johannesburgu na četrnaest uzoraka cijevi — kombinaciji cijevi s terenskim oštećenjima izvađenih iz vodoopskrbnog sustava Johannesburga i umjetno induciranih oštećenja (Greyvenstein i Van Zyl, 2007). Postav je bio jednostavan i ponovljiv — sekcija oštećene cijevi s demontabilnim završecima napajana iz gradske mreže, tlak bilježen svakih pola sekunde, protok impulsno, radne točke mijenjane u koracima od najmanje 30 sekundi uz trostruko ponavljanje postupka, a na prosjeke stabilnih dijelova zapisa prilagođena je potencijaska krivulja. Uzorak je obuhvatio tri azbest-cementne cijevi s terenskim uzdužnim pukotinama duljina 256 do 324 mm, tri čelične cijevi s terenskim korozijskim rupama te novu uPVC cijev s umjetno izvedenom okruglom rupom, trima obodnim i trima uzdužnim pukotinama — jer otkazale uPVC cijevi nije bilo moguće nabaviti (Greyvenstein i Van Zyl, 2007). Rezultati su dali prvu sustavnu empirijsku razdiobu eksponenta po tipu otvora i materijalu. Bušene okrugle rupe promjera 12 mm dale su vrijednosti 0,518 u čeliku i 0,524 u uPVC-u, uzdužne pukotine u azbest-cementu 0,79 do 1,04, uzdužne pukotine u uPVC-u prema preglednoj tablici izvora 1,38 do 1,85, obodne pukotine u uPVC-u 0,41 do 0,53, a korozijske rupe u čeliku 0,67 do 2,30, uz ukupni raspon svih ispitanih eksponenata od 0,42 do 2,30 (Greyvenstein i Van Zyl, 2007). Kvaliteta prilagodbe potencijске krivulje bila je pritom visoka — za okrugle rupe koeficijent determinacije premašuje 0,999 — što pokazuje da potencijски oblik dobro opisuje pojedinačne otvore u ispitanom rasponu tlakova, a da raspon eksponenata odražava stvarne fizikalne razlike među otvorima, ne mjerni šum (Greyvenstein i Van Zyl, 2007). Uz fizikalne zaključke prikazane u pogl. 2.2.3, studija je za kasnija istraživanja postavila i dva metodološka standarda: okruglu rupu kao kontrolni slučaj bliskosti teorijskoj vrijednosti 0,5 te tip otvora, a ne materijal, kao primarnu klasifikacijsku os eksperimentalnih programa.

Njezina su ograničenja jednako poučna. Za dva najpropusnija uzorka tlak u pokusu jedva je prelazio 2 m zbog vrlo velikih protoka, a eksperimentalni okvir preuzimao je uzdužna naprezanja, zbog čega su ona bila niža od teorijskih — okolnost kojoj autori pripisuju eksponente obodnih pukotina ispod 0,5 (Greyvenstein i Van Zyl, 2007).

Laboratorijska slika, međutim, bitno ovisi o rubnim uvjetima ispitivanja, što pokazuje istraživanje provedeno na Mauricijusu na neukopanim cijevima od HDPE-a, uPVC-a i pocinčanog čelika jednakih dimenzija (promjer 40 mm, stijenka 2 mm, duljina 3,5 m), s pravokutnim prorezima širine 2 mm i tlakovima do 3,5 bara mijenjanima u koracima od 0,2 bara (Latchoomun i sur., 2015). Kod neopterećenog HDPE-a deformacija stijenke uzrokuje zatvaranje otvora s porastom tlaka. Eksponent pada prema 0,5 s porastom duljine i uzdužnih i obodnih proreza — trend suprotan onome kod uPVC-a i čelika, kod kojih eksponent s duljinom pukotine raste. Za istu uzdužnu pukotinu duljine 15 mm izmjereno je 0,726 za uPVC, 0,881 za pocinčani čelik i svega 0,504 za HDPE, s praktičnom posljedicom da porast tlaka od 50 % povećava istjecanje za 42,93 % kod čelika i 34,23 % kod uPVC-a, ali samo 22,67 % kod HDPE-a (Latchoomun i sur., 2015). Metodološki je zanimljivo da su autori FAVAD jednadžbu ocijenili neprikladnom za viskoelastični HDPE — ona pretpostavlja elastično ponašanje materijala — stoga su eksponent određivali linearizacijom potencijske jednadžbe u logaritamskom obliku, uz zanemarivanje histereze; deformacija stijenke oko proreza pritom je praćena i mjernim trakama, čime je zatvaranje otvora izravno dokumentirano, a ne samo izvedeno iz protoka (Latchoomun i sur., 2015). Autori izrijeком upozoravaju da rezultati vrijede za neukopane cijevi bez aksijalnog opterećenja te da su pod opterećenjem utvrđeni suprotni trendovi — upozorenje koje objašnjava zašto se laboratorijski eksponenti ne smiju izravno prenositi na ukopane terenske uvjete; kao nastavak istraživanja najavljen je pilot-projekt usporedbe ukopanog i neukopanog HDPE cjevovoda duljine približno 2 km na Mauricijusu (Latchoomun i sur., 2015).

Utjecaj okolnog tla na istjecanje sustavno je kvantificiran laboratorijskim istraživanjem na Sveučilištu u Teheranu — polietilenska cijev provedena je kroz kutiju s tlom dimenzija $700 \times 500 \times 500$ mm, a istjecanje je mjereno vaganjem istekle vode pri tlakovima od 15 do 55 m, za bušeni otvor promjera 1 mm i za propusnu spojnicu s oštećenom brtvom, u pet različitih tala po seriji te u zraku kao kontrolnom slučaju (Latifi i sur., 2018). Ispitano je deset tala širokog raspona granulometrijskih i plastičnih svojstava, zbijanih u slojevima uz kontroliranu vlažnost, a jednadžba curenja proširena je članom svojstva tla u obliku (Latifi i sur., 2018):

$$Q = C_0 \cdot S^{n2} \cdot P^{n1} \quad (3.1)$$

Ključni je nalaz da svojstva tla mijenjaju koeficijent C_0 , a ne eksponent tlaka n_1 u jednadžbi curenja, jedn. (3.1), u kojoj je S svojstvo tla s pripadnim eksponentom n_2 . Zajednički eksponent iznosio je 0,5745 za otvor (pojedinačno 0,53 do 0,61) i 0,4569 za spojnicu (pojedinačno 0,41 do 0,48, ispod 0,5 jer se brtva porastom tlaka stišće), dok se s granulometrijskim i hidrauličkim svojstvima tla mijenjao koeficijent — najbolju povezanost pokazali su srednji promjer zrna d_{50} , s koeficijentom determinacije 0,87 za otvor i 0,74 za spojnicu, te plastična granica i hidraulička propusnost, dok koeficijenti jednolikosti i zakrivljenosti granulometrijske krivulje nisu pokazali smislenu vezu (Latifi i sur., 2018). Pod istim je tlakom curenje najveće bez tla, veće u krupnozrnatim nego u sitnozrnatim tlima, a niže kod tala s višim plastičnim granicama koje pružaju veći otpor dreniranju (Latifi i sur., 2018). Za modeliranje iz toga slijedi da jednadžbe curenja izvedene mjerenjem u zraku precjenjuju istjecanje u odnosu na ukopane uvjete, a za ovu disertaciju da su svojstva okoline cjevovoda legitimni kandidati za ulazne varijable modela, iako u praksi rijetko dostupna na razini mjerne zone.

Prijelaz s pojedinačnih otvora na stvarne mreže donose terenske studije na razini zona, čiji je zajednički metodološki nazivnik mjerenje minimalnoga noćnog protoka pri dvama ili više stanja tlaka i svođenje tlaka na prosječni zonski tlak. Najširu dokumentiranu terensku primjenu FAVAD analize na stvarnim zonama upravljanja tlakom proveli su Deyi i sur. (2014) u naselju KwaDabeka u Južnoafričkoj Republici — u dvanaest zona s pretežno plastičnim cjevovodima i azbest-cementom protok i tlakovi logirani su sedam punih dana u 15-minutnim intervalima, a iz stanja prije i poslije upravljanja tlakom određeni su i konvencionalni parametri (C , N_1) i sustavski FAVAD parametri (AoS , mS) s pripadnim brojem curenja. Zone su pokrivale širok raspon veličina — od 40 do 403 priključka i od 0,47 do 7,67 km mreže — u socioekonomski heterogenom okruženju urbanih hostela, neformalnih naselja i planiranih predgrađa (Deyi i sur., 2014). Dobiveni raspon eksponenta od 0,18 do 3,33 najširi je zabilježen u jednoj studiji, a analiza je otkrila i sustavnu anomaliju. Za zone s N_1 manjim od 1,5 parovi eksponenta i broja curenja leže na teorijskoj krivulji izvedenoj za pojedinačna curenja, dok sve zone s N_1 većim od 1,5 — primjerice 1,89; 2,10; 2,34 i 3,33 — imaju negativan zbroj početnih površina otvora, što je fizikalno nemoguće, uz moguće uzroke u pogreškama mjerenja, plastičnim deformacijama ili propuštanjem graničnih ventila zone (Deyi i sur., 2014). Autori izrijeком konstatiraju da je uzrok anomalije u vrijeme objave bio nepoznat te da recenzirana literatura sadrži vrlo malo terenskih studija s detaljno dokumentiranim visokim eksponentima (Deyi i sur., 2014). Studija time istodobno potvrđuje primjenjivost FAVAD koncepta na cijele zone i

upozorava da vrijednosti izvan teorijskih granica traže dijagnostičku interpretaciju, a ne mehaničko prihvaćanje.

Pouzdanost samog postupka procjene parametara najtemeljitije je ispitana na talijanskoj zoni Gorino Ferrarese — prirodnoj mjernoj zoni s jednim ulazom u kojoj su svi od 294 korisnika opremljeni pametnim brojilima, te je gubitak bilo moguće referentno odrediti bilancom vode u 5-minutnom koraku tijekom 45 dana (Marzola i sur., 2021). Nadzor svih korisnika omogućio je ono što standardnim kampanjama nije dostupno: usporedbu pet metoda procjene parametara na istoj, referentno poznatoj vremenskoj seriji curenja — od procjene iz para vrijednosti prije i poslije večernje redukcije tlaka za svaki dan zasebno, preko prosjeka i najmanjih kvadrata na svim parovima, do prilagodbi najmanjim kvadratima na cijeloj vremenskoj seriji odnosno samo na noćnim podacima (Marzola i sur., 2021). Studija usput dokumentira i raspon literaturnih vrijednosti legitimne noćne potrošnje o kojima procjena kritično ovisi: od 0,4 l/h po osobi u Njemačkoj i 1,7 l/h po priključku u Ujedinjenom Kraljevstvu do 3 l/h u Kanadi i 5 l/h u Maleziji, uz višestruko veće vrijednosti za pojedine komercijalne djelatnosti (Marzola i sur., 2021). Usporedba metoda dala je dva nalaza od izravne važnosti za terensku praksu. Prvo, MNF metoda s literaturnim vrijednostima noćne potrošnje može gubitak procijeniti i trostruko većim od stvarnoga ako u zoni postoje korisnici s nepravilnom noćnom potrošnjom — u konkretnom slučaju kućna curenja, noćno zalijevanje i nogometno igralište (Marzola i sur., 2021). Drugo, procjena parametara iz samo dva para tlaka i curenja — upravo postupak koji prevladava u praksi — daje ekstremno varijabilne rezultate, uključujući fizikalno besmislene negativne nagibe i, u prikazu preko broja curenja, točke rasute do rubnih, nefizikalnih vrijednosti, dok stabilne i fizikalno smislene koeficijente, neovisne o vremenskom koraku agregacije, daju tek prilagodbe najmanjim kvadratima na cijelim vremenskim serijama ili na noćnim podacima, kakve vodovodima u pravilu nisu dostupne (Marzola i sur., 2021). Parovi eksponenta i broja curenja svih metoda pritom padaju na teorijsku konverzijsku krivulju, čime je na terenskim podacima potvrđena veza izvedena u pogl. 2.2.1.

Da metalne mreže daju bitno niže i stabilnije eksponente, dokumentirala je kampanja od 82 dana u zoni Santa Colomba u Beneventu (Italija), mreži s 85,0 % duktilnog lijeva u kojoj su prije kampanje otkrivena i popravljena dva veća loma, stoga su preostali gubici tretirani kao pozadinsko istjecanje. Uz noćnu regulaciju tlaka PRV-om između 40 i 60 m i pretpostavku hidrostatskog noćnog tlaka, potvrđenu hidrauličkim modelom, detaljni čvorni model pozadinskog istjecanja dao je eksponent 0,72, a pojednostavljeni pristup preko prosječnoga zonskog tlaka 0,75 — tehnički zanemariva razlika, zbog čega autori za mreže s malim udjelom

plastike preporučuju vrijednosti oko 0,7, neovisne o razini tlaka i protoku (Fontana i sur., 2017). Studija je usto pokazala da se eksponent zone može pouzdano odrediti i minimizacijom razlika mjerenih i modeliranih gubitaka po čvorovima, uz koeficijente proporcionalne opsluženom stanovništvu i materijalu cijevi — postupak koji zaobilazi izravnu procjenu iz dvaju stanja tlaka, ali zahtijeva kalibrirani hidraulički model. Vrijednost te studije za pregled dodatno povećava njezin sažetak ranijih terenskih kampanja, koje pojedinačno nisu dostupne u recenziranom obliku: za stare lijevano-željezne cijevi u iranskom Sanandaju eksponenti 1,10 do 1,18 uz korelacije iznad 0,90, za pretežno plastičnu mrežu brazilskog Capinzala 1,2 do 1,7, za azbest-cementnu mrežu Meke 0,50 uz 1,16 za mješoviti sastav te vrijednosti ispod 0,6 za PVC cijevi promjera 25 do 150 mm (Fontana i sur., 2017). Zajedno s vlastitim rezultatom oko 0,7, taj sažetak ocrtava konzistentan obrazac — metalne i azbest-cementne mreže grupiraju se između 0,5 i 1,2, a plastične i mješovite pokrivaju znatno širi i viši raspon.

Cijenu oslanjanja na pretpostavljeni teorijski eksponent umjesto na mjerenje kvantificirala je dvofazna studija u pilot-zoni Kayserija (Turska), integriranoj u SCADA sustav — zoni s 32,23 km glavnih cjevovoda, 931 priključkom i visokim ulaznim tlakom, u kojoj je legalna noćna potrošnja procijenjena BABE komponentnom analizom, a pretvorba noćnih protoka u dnevne volumene provedena NDF faktorom izračunanim iz tlačnih zapisa za stanje prije i poslije upravljanja tlakom (Özdemir i sur., 2021). U prvoj je fazi aktivna kontrola curenja postupnim zatvaranjem ventila po dionicama (engl. *step-test*) i zemljanim mikrofonom otkrila i sanirala pet neprijavljenih curenja, čime je minimalni noćni protok smanjen s 12,5 na 6,95 l/s, uz procijenjenu uštedu od 441 m³ dnevno; u drugoj je fazi daljinski upravljani ventil smanjio tlak s 9,10 na 3,1 do 3,2 bara, a minimalni noćni protok s 6,95 na 3,29 l/s (Özdemir i sur., 2021). Metodološki je vrijedan i naglasak studije na NDF faktoru. Curenje izraženo u litrama u sekundi ne smije se pretvarati u dnevni volumen množenjem s 24 sata, nego s faktorom izračunanim iz dnevnog profila tlaka — u promatranoj zoni 22,5 sata dnevno prije upravljanja tlakom — jer se tlačni režim, a s njime i istjecanje, kroz dan mijenja (Özdemir i sur., 2021). Ukupno je istjecanje smanjeno sa 6,67 na terenski izmjerenih 3,01 l/s, odnosno za 54,9 %, dok je FAVAD proračun s pretpostavljenim $N1 = 1,5$ za polietilensku i PVC mrežu predviđao smanjenje na 1,33 l/s — razlika od 1,70 l/s prema terenu, pripisana novim curenjima nastalima zbog promjena tlaka, terenskim uvjetima i nepoznatim curenjima na priključcima (Özdemir i sur., 2021). Studija se uklapa u širu terensku evidenciju učinaka upravljanja tlakom koju sažima njezin uvodni pregled — od 9 milijuna m³ godišnjih ušteda programa Khayelitsha u Južnoafričkoj Republici do smanjenja gubitaka za 38 % uz 41 % manje puknuća u ciparskom Lemesosu (Özdemir i sur.,

2021) — ali je njezina posebna vrijednost upravo u dokumentiranom raskoraku između teorijskog predviđanja s pretpostavljenim eksponentom i stvarnoga terenskog ishoda. Studija je dokumentirala i povratnu spregu sanacija i tlaka opisanu u pogl. 2.2.2 — popravkom curenja radni tlak raste i postojeće se pukotine u plastičnim cijevima šire, zbog čega je upravljanje tlakom ocijenjeno ključnim za održivost cjelokupne strategije.

Terenska karakterizacija proširena je i na magistralne cjevovode, segment mreže koji se u zonskim analizama u pravilu preskače. Mobilnom opremom na prikolici — spremnikom, crpkom s promjenjivom brzinom, elektromagnetskim mjerilom protoka i tlačnim pretvaračem — ispitano je petnaest dionica magistralnih vodova u Južnoafričkoj Republici promjera 50 do 600 mm. Izolirana dionica drži se na nizu zadanih tlakova, ulazni protok tada je jednak curenju, a podaci se interpretiraju modificiranom jednadžbom otvora uz svođenje tlaka na lokalne vrijednosti duž cijevi (Niebuhr i sur., 2019). Od petnaest dionica deset je uspješno karakterizirano — od pet neuspjelih, dvije zbog nebrtvljenja izolacijskih ventila, jedna zbog nedostatka pristupne točke dovoljnog kapaciteta i dvije zbog nemogućnosti punjenja cijevi — uz tipično trajanje testa od približno 75 minuta s prekidom rada cjevovoda od svega približno 30 minuta i preliminarne rezultate dostupne još na terenu (Niebuhr i sur., 2019). Pokazano je da je promjena površine otvora linearna s tlakom u svim slučajevima te da parovi eksponenta i broja curenja potvrđuju teorijsku vezu iz pogl. 2.2.1; dijagnostika se oslanja na tipične raspone nagiba po tipu otvora — praktički nula za okrugle rupe ($-0,02$ do $+0,02$ mm²/m), pretežno negativne vrijednosti za obodne pukotine ($-0,5$ do $+0,5$ mm²/m) i vrijednosti veće od 0,3 mm²/m za uzdužne pukotine — stoga se iz predznaka i veličine nagiba zaključuje vjerojatni tip i lokacija curenja, od korozijskih rupa na studiji slučaja s eksponentom 1,31 na mjerodavnom čvoru do velikog loma s početnom površinom od 188,9 mm² (Niebuhr i sur., 2019). Rangiranjem dionica po curenju svedenom na tlak od 50 m — s pragovima od 0,1 l/s za malo, 0,5 do 1,0 l/s za značajno i više od 1 l/s za prekomjerno curenje — većina je ispitanih vodova pokazala značajno ili prekomjerno curenje, što upućuje na važnost redovite procjene magistralnih cjevovoda, segmenta koji zonske analize u pravilu ne obuhvaćaju (Niebuhr i sur., 2019). Za disertaciju je studija dvostruko poučna jer potvrđuje FAVAD okvir na dotad neispitanoj kategoriji cjevovoda i pokazuje da se cijena terenske karakterizacije može bitno smanjiti namjenskom opremom — no i dalje uz fizičku intervenciju na svakoj ispitivanoj dionici.

Metodološki najrazrađeniji sustav zonskih mjerenja u novije vrijeme razvijen je u Ontariju (Kanada), gdje je mobilna mjerna jedinica s protokomjerima niskog mjernog praga i vlastitim

PRV-om korištena za mjerenja u privremeno konfiguriranim mjernim zonama — ukupno 25 skupova rezultata u 23 zone kroz osam općina (Jenks i sur., 2023). Protokol je razrađen do provjere integriteta granica — prije svakog mjerenja svaki se granični ventil provjerava testom nultog tlaka, a mjerenja se provode od ponoći do šest sati ujutro kroz dvije do četiri noći, izvan sezone zalijevanja i bez vikenda, kako bi legitimna noćna potrošnja bila što stabilnija (Jenks i sur., 2023). Odziv tlak–curenje mjeren je cikliranjem tlaka u približno 30-minutnim intervalima unutar iste noći, čime se uklanja stohastičnost potrošnje među različitim noćima, a legitimna noćna potrošnja procijenjena je postupkom ponovljenog uzorkovanja s vraćanjem (engl. *bootstrap*) nad satnim zapisima napredne mjerne infrastrukture (AMI, engl. *Advanced Metering Infrastructure*) na približno 4,5 l/h po priključku (Jenks i sur., 2023). Iz devetnaest zona ocijenjenih „zdravima“ izvedene su i referentne vrijednosti minimalnoga noćnog protoka za kanadske sustave — 6,4 l/h po priključku, 2,2 l/h po stanovniku odnosno 24 % prosječne fakturirane potrošnje, uz slabu povezanost s duljinom mreže — kao podloga za brzu ocjenu je li izmjereni noćni protok zone očekivan ili povišen (Jenks i sur., 2023). Ekonomsku vrijednost takvih mjerenja ilustrira studija slučaja u kojoj je otkriveno pojedinačno curenje od približno 5 l/s koje je otjecalo u oborinsku kanalizaciju. Nakon popravka izmjereno je smanjenje od 4,4 l/s, što odgovara godišnjoj uštedi od 139.000 m³ vode i 426.000 kanadskih dolara (Jenks i sur., 2023). Od 25 skupova rezultata devetnaest je zona ocijenjeno „zdravima“, četiri odstupajućima, a dva neuvjerljivima; u dvjema je zonama minimalni noćni protok pao ispod procijenjene legitimne potrošnje, što upućuje na praktički nepostojeće curenje (Jenks i sur., 2023). Uz karakterističnu asimetriju raspodjele eksponenta prikazanu u pogl. 2.2.2 — stabilne vrijednosti blizu 0,5 u zonama s velikim viškom curenja, promjenjive vrijednosti 0,9 do 3,2 u zonama s malim istjecanjem — studija je dvije zone s nerealno visokim vrijednostima (6,1 i 4,6) izrijekom odbacila uz sumnju na propuštanje graničnih ventila ili pogrešnu procjenu noćne potrošnje, a na ograničenom uzorku nije utvrđena korelacija eksponenta s materijalom cijevi (Jenks i sur., 2023). Ista je analiza pokazala i da varijabilnost procjene noćne potrošnje naglo pada s veličinom zone, sa značajnim suženjem za zone od približno 500 priključaka naviše — kvantitativna potvrda poznatoga praktičarskog pravila o minimalnoj veličini mjerne zone (Jenks i sur., 2023). Autori pritom izrijekom upozoravaju da je izračunati eksponent vrlo osjetljiv na procijenjenu noćnu potrošnju te da vrijedi za sniženi tlak konkretnog testa — dvije sustavne nesigurnosti svakoga terenskog određivanja.

Koliko pogrešne pretpostavke parametara kvare procjenu istjecanja, sustavno je kvantificirano analizom osjetljivosti na mreži Baifikrom u Gani — sustavu od približno 150 km cjevovoda sa

70 % plastičnih cijevi i oko 5700 priključaka, u kojem je terenskim mjerenjima utvrđen eksponent 2,4, nasuprot teorijski očekivanoj vrijednosti oko 1,0 (Amoatey i sur., 2022). Studija je MNF metodu prilagodila uvjetima zemalja u razvoju razdvajanjem noćnih korisnika na kućanstva s WC ispiranjem i bez njega — u promatranoj mreži samo 10 % kućanstava koristi WC s ispiranjem — jer standardne literaturne vrijednosti noćne potrošnje, izvedene za drukčije obrasce korištenja vode, u takvim uvjetima sustavno griješe (Amoatey i sur., 2022). Analiza relativne pogreške pokazala je da promjena aktivne noćne populacije (ANP, engl. *Active Night Population*) za jedan postotni bod mijenja procjenu istjecanja za približno 8 %, a svaki korak eksponenta od 0,5 za do 4 % — utjecaj pretpostavljene noćne potrošnje približno je dvostruko veći od utjecaja eksponenta, no oba su dovoljno velika da autori zaključe kako vodovodi moraju uspostaviti lokalizirane vrijednosti obaju parametara umjesto preuzimanja vrijednosti utvrđenih drugdje (Amoatey i sur., 2022). Nalaz da stvarni eksponent plastične mreže višestruko premašuje literaturno iskustveno pravilo izravno podupire središnju motivaciju ove disertacije.

U isti se niz ubrajaju i vlastita prethodna istraživanja provedena na hrvatskom vodoopskrbnom sustavu. U specijalističkom radu (Dundović, 2017) razvijena je metodologija koja povezuje stupnjevito snižavanje tlaka na regulacijskom ventilu, percentilni izračun stvarnih gubitaka iz minutnih zapisa protoka te kalibrirani hidraulički model, uz uvođenje metode optimalnog tlaka za korekciju ILI pokazatelja. Isti je rad dokumentirao i širinu problema na primjerima iz hrvatske prakse. Na 23 mjerne zone diljem Hrvatske vrijednosti ILI pokazatelja protezale su se od 0,0 do 44,2, uz radne tlakove koji mjestimično dosežu 7,5 bara, a FAVAD proračun za mješovitu zonu u jadranskom priobalju — s gubicima od 13,5 l/s na 31 km mreže — dao je eksponent 0,8, nasuprot vrijednostima do 2,5 pridruženima drugim zonama prema udjelu materijala (Dundović, 2017). Recenzirana terenska verifikacija (Dundović i Tadić, 2022) na istoj je zoni — naselju s 278 priključaka i 7,4 km mreže u cijelosti od PVC-a — kroz tri uzastopna dana snižavala izlazni tlak s 4,0 na 3,0, a zatim na 2,0 bara, uz mjerenje protoka ultrazvučnim mjerilom i tlaka na dvjema lokacijama u minutnom intervalu. Iz gubitaka od 0,209 odnosno 0,139 l/s pri srednjim tlakovima od 39,7 odnosno 31,5 m određen je $N1 = 1,76$, dok teorijski izračun preko ILI jednadžbi za čisti PVC daje 1,5; kalibrirani hidraulički model reproducirao je mjereni minimalni noćni protok s prosječnom razlikom od 0,01 l/s odnosno 4 %, čime je metodologija ocijenjena valjanom (Dundović i Tadić, 2022). Dobivena vrijednost leži unutar raspona 1,38 do 1,85 utvrđenog za uzdužne pukotine u uPVC-u (Greyvenstein i Van Zyl, 2007) i iznad vrijednosti 1,2 izmjerene u potpuno plastičnoj zoni DV3197 u KwaDabeki (Deyi i sur., 2014; Dundović i Tadić, 2022). Prednost primijenjene metode jest u tome što se

razlika noćnih protoka stvara izravnim snižavanjem tlaka na ventilu, bez čekanja na sanacije; njezino je ograničenje, zajedničko svim testovima tlačnih koraka, u opsežnim manipulacijama tlakom koje mogu utjecati na potrošače i zahtijevaju temeljitu pripremu, uključujući prethodnu simulaciju pokusa na hidrauličkom modelu i provjeru stanja opreme (Dundović i Tadić, 2022).

Posebnu skupinu čine studije u kojima se eksponent ne mjeri izravno, nego se pojavljuje kao kalibracijski parametar hidrauličkog modela, određen optimizacijom prema mjerenim tlakovima i protocima. Na mreži Birjanda (Iran), s 1140 čvorova podijeljenih u zone, eksponent je preko dijagrama omjera otvora fiksne i promjenjive površine procijenjen u rasponu 0,9 do 1,2 te je za kalibracijsku detekciju curenja usvojena vrijednost 1,15; sama je studija pritom dokumentirala i ekvifinalnost kalibracije — dobra vrijednost funkcije cilja ne jamči točnu lokalizaciju curenja, zbog čega se pouzdanost provjerava suglasjem više dobrih rješenja umjesto jednoga najboljeg (Nasirian i Ahrari, 2022). Na sektoru K117 u Alžiru, mreži od 87 km s razinom neprihodovane vode od 47 % i osam tlačnih senzora, genetski je algoritam, uz koeficijente istjecanja po čvorovima, kao jedinstveni mrežni parametar optimizacijom dao $N1 = 1,1$, čime je pred-locirano 36 stvarnih neprijavljenih curenja ukupnog iznosa približno 57 m³/h (Sebbagh i sur., 2018). Obje studije potvrđuju operativnu vrijednost poznavanja eksponenta i izvan konteksta upravljanja tlakom — za detekciju curenja kalibracijom modela — ali ujedno ilustriraju i praksu svođenja heterogene mreže na jedan globalni eksponent, čija se vrijednost bira unutar literaturnog raspona ili prepušta optimizacijskom algoritmu bez neovisne terenske provjere.

Pregled u cjelini vodi na tri zaključka. Prvo, empirijska građa je konzistentna u tome da eksponent varira u širokom rasponu — od 0,18 do 3,33 na razini zona (Deyi i sur., 2014), uz laboratorijske vrijednosti od 0,41 do 2,30 po tipu otvora (Greyvenstein i Van Zyl, 2007) — te da jednostavna pravila pridruživanja eksponenta materijalu sustavno zakazuju. Plastične mreže daju i 1,0 i 1,76 i 2,4, metalne pretežno oko 0,5 do 0,7, ali korodirani čelik i preko 2, a korelacija s materijalom na zonskoj razini nije utvrđena ni u studijama koje su ju izravno tražile (Jenks i sur., 2023). Vlastita terenska vrijednost 1,76 u toj se građi pozicionira dosljedno: unutar laboratorijskog raspona uzdužnih pukotina u uPVC-u, iznad teorijske vrijednosti 1,5 izvedene iz praktičarskih smjernica za čisti PVC i iznad vrijednosti 1,2 usporedive plastične zone u KwaDabeki — što je čini upravo tipom opažanja koje jednostavna pravila ne mogu reproducirati, a koje disertacija nastoji učiniti predvidivim (Dundović i Tadić, 2022). Drugo, sve prikazane metode terenskog određivanja — test tlačnih koraka s višednevnim snižavanjem tlaka, cikliranje tlaka unutar jedne noći, izolacija magistralnih dionica mobilnom opremom —

zahtijevaju fizičku intervenciju u mrežu, mjernu opremu i pouzdanu procjenu noćne potrošnje, a njihovi su rezultati osjetljivi na broj stanja tlaka (Marzola i sur., 2021), procjenu legitimne potrošnje (Jenks i sur., 2023; Amoatey i sur., 2022) i integritet granica zone (Deyi i sur., 2014). Metodološki zajednički nazivnik — mjerenje minimalnoga noćnog protoka pri najmanje dva stanja tlaka uz svođenje na prosječni zonski tlak ponderiran duljinama cjevovoda i visinama — ujedno definira i minimalni sadržaj svakoga budućeg zapisa u objedinjenoj bazi terenskih mjerenja. Bez dokumentiranih tlakova, protoka i procjene noćne potrošnje zonska vrijednost eksponenta nije ni provjerljiva ni usporediva. Treće — i za ovu disertaciju presudno — nijedna od prikazanih studija ne nudi postupak kojim bi se eksponent zone procijenio bez terenskog mjerenja, iz podataka koje vodoopskrbni operater već posjeduje; najbliže tome su optimizacijske kalibracije, koje eksponent tretiraju kao slobodni parametar, a ne kao veličinu predvidivu iz značajki sustava. Upravo tu prazninu, formalno artikuliranu u pogl. 3.4, disertacija popunjava.

3.2. Modeliranje i primjena eksponenta N1 / FAVAD

Uz terenska određivanja, drugi tok literature čine istraživanja koja eksponent N1 i FAVAD okvir modeliraju, ugrađuju u računalne alate i primjenjuju u inženjerskim odlukama. Ovaj tok odgovara na tri pitanja: kako se ponašanje pojedinačnih otvora prenosi na razinu cijelog sustava, kako se tlačno-ovisno istjecanje korektno ugrađuje u hidrauličke modele te kako se — i s kojim posljedicama — eksponent bira u praktičnim primjenama. Redoslijed prikaza slijedi upravo taj lanac: od stohastičkog modeliranja sustava, preko implementacijskih studija, do primjena u kojima je eksponent ulazna pretpostavka.

Ključni korak od pojedinačnog otvora prema mjernoj zoni napravljen je stohastičkim modelom tipične zone Ujedinjenog Kraljevstva s 40 km cjevovoda i 2500 priključaka, u kojem su pojedinačna elastična curenja s parametrima izvučenima iz empirijskih distribucija agregirana u sustavni odziv (Schwaller i van Zyl, 2015). Uz nalaze o rasponu i determinantama zonskog eksponenta prikazane u pogl. 2.2.2, studija je za terensku praksu izvela još dva kvantitativna zaključka. Pogreška procjene prosječnoga zonskog tlaka prenosi se približno proporcionalno na pogrešku eksponenta, a veliko smanjenje tlaka tijekom ispitivanja daje niži izmjereni eksponent — u baznom sustavu 0,92 pri smanjenju tlaka za 35 m nasuprot 1,12 pri infinitezimalnom koraku — približno jednak prosjeku eksponenata pri tlakovima prije i poslije smanjenja (Schwaller i van Zyl, 2015). Ista studija donosi i najpotpuniju zbirku dotadašnjih terenskih kampanja: sedamnaest zona u Ujedinjenom Kraljevstvu 1977. sa srednjom

vrijednošću 1,13 i rasponom 0,70 do 1,68; osam japanskih pokusa 1979. s 1,15 i rasponom 0,63 do 2,12; trinaest brazilskih zona 1998. s 1,15 i rasponom 0,52 do 2,79; sedamdeset pet zona u Ujedinjenom Kraljevstvu 2003. s 1,01 i rasponom 0,36 do 2,95; petnaest ciparskih zona 2005. s 1,47 i rasponom 0,64 do 2,83 te sedamnaest malezijskih zona s 0,92 i rasponom 0,49 do 1,50 (Schwaller i van Zyl, 2015) — zbirka koja pokazuje da su široki rasponi i nestabilne srednje vrijednosti pravilo, a ne iznimka. Model je razjasnio i zagonetku visokih eksponenata pozadinskog istjecanja, za koje praktičarske smjernice preporučuju vrijednost 1,5. Prijelazni režim tečenja, iako obuhvaća 89 % pozadinskih curenja, podiže sustavni eksponent tek s 0,50 na 0,60, dok već 3 % curenja s vrlo visokim brojem curenja — poput fleksibilnih gumenih brtvi ili pukotina koje se pri nultom tlaku potpuno zatvaraju — podiže sustavni eksponent na 1,2, a 15 % takvih na 1,48 (Schwaller i van Zyl, 2015). Time je pokazano da i mali udio specifičnih tipova otvora može dominirati zonskim odzivom — dodatni razlog zašto se eksponent ne može izvesti iz prosječnih svojstava mreže jednostavnim pravilima. Analiza osjetljivosti izdvojila je i treći značajan čimbenik uz srednji tlak i stanje sustava: raspon statičkih tlakova zbog visinskih razlika, čije uklanjanje — horizontalni sustav — spušta bazni eksponent s 1,12 na 0,96 (Schwaller i van Zyl, 2015).

Prateća studija istih autora s trećim suradnikom formalizirala je sustavne FAVAD parametre — iz curenja i prosječnoga zonskog tlaka prije i poslije redukcije tlaka mogu se procijeniti sustavska početna površina i sustavski nagib, pri čemu je na 335 simuliranih mrežnih modela pokazano da procjene odgovaraju zbrojevima pojedinačnih vrijednosti (Schwaller i sur., 2015). Točnost procjene kritično ovisi o rasponu visinskih razlika u zoni. Za tipični sustav pogreška početne površine iznosi 16 %, za horizontalni sustav približno 1 %, a za ekstremni raspon visina od 90 m raste na približno 100 %; pogreška nagiba značajna je samo za male nagibe (Schwaller i sur., 2015). Za terensku primjenu bitno je da postupak ne traži nikakve dodatne podatke u odnosu na postojeća ispitivanja eksponenta — ista dva mjerenja daju fizikalno smisleniju karakterizaciju zone, uz preporuku korištenja efektivnih veličina kojom se izbjegava pretpostavka koeficijenta istjecanja (Schwaller i sur., 2015). Sustavski parametri imaju i dijagnostičku funkciju. Fizikalno nerealne vrijednosti — poput negativnih površina zabilježenih u KwaDabeki — upućuju na pogreške mjerenja ili propusne granične ventile zone, stoga sama procjena služi i kao provjera kvalitete terenskog ispitivanja (van Zyl i sur., 2017).

Najnoviji razvoj stohastičkog modeliranja ugradio je statističke podloge svojstvene pojedinom materijalu — razdiobe tipova i dimenzija otvora po materijalu izvedene su iz približno šestogodišnjih fotografskih zapisa kvarova velikog izvođača u Aucklandu te udjela tipova

kvarova iz američke PIPEiD baze, čime su dobivene distribucije zonskog eksponenta za četiri materijala kroz raspon vrijednosti ILI pokazatelja (Beygi i van Zyl, 2024). Rezultati kvantitativno razdvajaju materijale, i to preko strukture kvarova. Među zapisima kvarova PVC-a čak su 76 % uzdužne pukotine — tip otvora s najvećim nagibom površine — dok kod željeza i azbest-cementa prevladavaju obodne pukotine i okrugle rupe, a polietilen unatoč nižem modulu elastičnosti od PVC-a ima tek 12 % uzdužnih pukotina i deblje stijenke (Beygi i van Zyl, 2024). Posljedično, željezo i azbest-cement drže medijan zonskog eksponenta blizu 0,5 neovisno o razini gubitaka, PVC ima najviši eksponent, s medijanom koji raste od 0,66 pri ILI = 0,6 preko 0,72 pri ILI = 1 i 0,85 pri ILI = 3 do 1,27 pri ILI = 8 — s gornjim rubom raspona od 1,82 — a polietilen leži između (Beygi i van Zyl, 2024). Ovisnost o razini gubitaka pritom nije nuspojava, nego bit nalaza. Isti materijal daje bitno različite eksponente ovisno o stanju sustava, što znači da je eksponent zajednička funkcija materijala i razine gubitaka — dviju veličina koje operateri rutinski evidentiraju, što ih čini prirodnim kandidatima za ulazne varijable prediktivnog modela ove disertacije. Komplementarne simulacije s fiksnim brojem curenja pokazuju istu hijerarhiju iz drugog kuta — za čista pozadinska curenja medijani su 0,51 za željezo i azbest-cement, 0,52 za polietilen i 0,72 za PVC, dok s uključenim potencijalno detektabilnim curenjima pri tisuću curenja medijan za PVC raste na 1,49, uz gotovo polovicu simuliranih PVC mreža iznad 1,5, a za željezo i azbest-cement zabilježene su i vrijednosti ispod 0,5 (Beygi i van Zyl, 2024). Iz usporedbe s važećim praktičarskim smjernicama proizlazi nalaz od izravne važnosti za ovu disertaciju. Smjernice koje za čiste PVC i polietilenske mreže preporučuju vrijednost 1,5 neovisno o stanju sustava, a za metalne mreže rast s 0,59 pri ILI = 8 na 1,18 pri ILI = 1, znatno odstupaju od simulacija — medijan za PVC tek pri najvišim razinama gubitaka prelazi 1, a za željezo i azbest-cement ostaje oko 0,5 za sve razine — slijedom toga autori zaključuju da smjernice treba ažurirati (Beygi i van Zyl, 2024). Upravo su te smjernice ugrađene u jednadžbe kojima je u vlastitom prethodnom istraživanju izračunan teorijski eksponent 1,5 za čistu PVC mrežu (Dundović i Tadić, 2022), što zastarjelost postojećih pravila pretvara u neposrednu motivaciju za razvoj pouzdanijeg postupka procjene.

Drugu skupinu čine implementacijske studije, koje FAVAD okvir prevode u standardne alate hidrauličkog modeliranja. Formalno-matematički temelj postavljen je energetsom formulacijom. Rješavanje mrežnih jednadžbi s FAVAD curenjem ekvivalentno je minimizaciji konveksne funkcije, čime su dokazane egzistencija i jedinstvenost hidrauličkog rješenja i izveden globalno konvergentan algoritam prigušene Newtonove metode — uz konstataciju autora da FAVAD model u to vrijeme još nije bio ugrađen ni u jedan programski paket (Piller

i Van Zyl, 2014). Praktičnu implementaciju demonstrirala je studija koja je FAVAD ugradila u standardni algoritam EPANET-a preko dvaju emitera po čvoru, s eksponentima 0,5 i 1,5, te na 200 stohastički generiranih sustava s razinom gubitaka $ILI = 16$ kvantificirala pogrešku konvencionalnog pristupa — potencijaska jednadžba, kalibrirana pri visokom tlaku, potom ekstrapolirana na niže tlakove upravljanja tlakom, procjenjuje ukupno sustavno curenje s pogreškom do 20 %, a curenje pojedinačnog čvora s pogreškom do 60 % (Kabaasha i sur., 2016). Struktura pogreške pritom je asimetrična i operativno nepovoljna. U približno 30 % simuliranih sustava potencijaski pristup podcjenjuje sustavno curenje za 9,6 do 11,2 %, a na kritičnom čvoru — mjerodavnom za odluke o razini redukcije tlaka — približno 56 % sustava ima pogrešku između 33,75 i 46,25 %, s ekstremima od podcjenjivanja za 60 % do precjenjivanja za 56 % (Kabaasha i sur., 2016). Simulirana razina gubitaka pritom je namjerno postavljena na $ILI = 16$ kao realističnu vrijednost za tipičan slabije održavan sustav, a upravljanje tlakom simulirano je spuštanjem razine izvora — scenarij koji vjerno reproducira uvjete u kojima se potencijaska jednadžba u praksi i koristi (Kabaasha i sur., 2016). Neovisna brazilska studija istu je usporedbu provela faktorskim planom na modelu stvarne PVC mreže od 30,7 km. Čak i kad se potencijaska jednadžba kalibrira zasebno za svako pojedinačno curenje — što je povoljniji slučaj od uobičajene zonske kalibracije — razlika prema FAVAD proračunu doseže približno 15 %, a statistički značajnim pokazali su se površina potencijalno detektabilnih curenja, njezina interakcija s tlakom te površina nevidljivih curenja, dok broj curenja i koeficijent istjecanja nemaju značajan učinak (Boian i sur., 2019). Analitičko objašnjenje tog nalaza ima opću vrijednost. Naime, za tlakove od 10 do 80 m sastavnica početne površine dominira istjecanjem za otvore manje od približno 4,5 do 13,5 mm², sastavnica proširene površine za otvore veće od približno 560 do 1700 mm², a oba su člana istog reda veličine upravo u rasponu od 50 do 150 mm² — u koji padaju tipična potencijalno detektabilna curenja, zbog čega nijedna jednočlana aproksimacija u tom području ne može biti točna (Boian i sur., 2019).

Na razini prikaza curenja u modelu, proširenje EPANET-a WaterNetGen uvelo je dvokomponentni model po cijevi — pozadinsko istjecanje proporcionalno duljini i tlaku na eksponent između 0,5 i 2,5 te lomove po klasičnoj jednadžbi otvora, s raspodjelom curenja cijevi na njezine krajnje čvorove — čime se zaobilaze poznata ograničenja emitera u čvorovima, koji daju pogrešne rezultate pri negativnim tlakovima i nemaju gornju granicu protoka (Muranho i sur., 2014). Isti alat objedinjuje analizu vođenu potražnjom i analizu vođenu tlakom u istom mrežnom modelu — s raspoloživom potrošnjom kao funkcijom tlaka između minimalnoga i referentnog praga — te solver proširuje izvještavanjem svih tlačno-deficitarnih

događaja između standardnih koraka ispisa, jer uobičajeni način izvještavanja može sakriti neprihvatljiva stanja mreže (Muranho i sur., 2014). Uz implementacijsku, ostaje i formalna razlika koju ističe energetska analiza — za razliku od tlačno-ovisne potrošnje, koja je odozgo ograničena traženom potražnjom, FAVAD curenje nema gornje granice, stoga formulacije tlačno-ovisnih modela nisu izravno prenosive nego traže prilagodbu (Piller i Van Zyl, 2014). Za istjecanje pri lomu cijevi austrijska je studija na 158 km bečkih magistralnih vodova usporedila jednostavni pristup s literaturnim eksponentima i iterativni pristup koji eksponent izvodi iz FAVAD okvira preko numerički modeliranih nagiba. Za uzdužne pukotine jednostavni pristup znatno podcjenjuje istjecanje — procjene stvarnih lomova od približno 1000 do 3000 m³/h bile su bliže iterativnim proračunima — dok su za obodne pukotine razlike male jer je pripadni nagib praktički nula, a nesigurnost ulaznih parametara prikazana je Monte Carlo simulacijama kao prosjek sa standardnom devijacijom po cijevi (Fuchs-Hanusch i sur., 2016). Studija usput donosi i najbogatiji zbirni pregled literaturnih eksponenata po materijalu i tipu kvara — primjerice 1,23 do 1,97 za uzdužne pukotine u polietilenu, 0,5 do 0,85 u lijevanom željezu te 0,61 do 1,26 za propusne spojeve svih materijala — korišten kao podloga tablice 2.2 i kao izvor granica pretrage eksponenta u kasnijim kalibracijskim studijama (Fuchs-Hanusch i sur., 2016; Leinaes i sur., 2024). Dokumentirano je i praktično ograničenje standardnog alata — solver vođen potražnjom ne može simulirati smanjenje potrošnje pri padu tlaka, zbog čega je dio dionica morao biti isključen iz analize (Fuchs-Hanusch i sur., 2016).

Treću skupinu čine primjene u kojima je eksponent ulazni podatak inženjerske analize — i upravo se u njima najjasnije vidi jaz između razvijenosti teorije i stanja prakse. U scenarijskoj analizi razmještaja ventila za redukciju tlaka u aleksandrijskoj mjernoj zoni — sustavu koji je s vrijednošću ILI od 44,8 pripadao najlošijoj kategoriji matrice Svjetske banke, i to nakon što je zamjena 44 neispravna vodomjera prividne gubitke već smanjila s 54 na 23 % ulaznog volumena — curenje je modelirano po cijevi kao funkcija tlaka i duljine, eksponent je pretpostavljen na 1,2, a koeficijent kalibriran na jedini poznati ukupni volumen curenja (Samir i sur., 2017). Analiza je pokazala da je lokacija ventila presudna — najbolji od pet scenarija smanjuje curenje s 230 na 142 m³/dan, odnosno za 37 %, dok tri scenarija ne daju praktički nikakav učinak (Samir i sur., 2017). U planiranju mjernih zona u indonezijskom sustavu Palangka Raya — mreži od približno 715 km s razinom neprihodovane vode od 51,84 % — učinak formiranja 27 zona na fizičke gubitke izračunan je FAVAD jednadžbom s pretpostavljenim $N1 = 1,5$, bez terenske verifikacije. Sniženje prosječnog tlaka s 9,421 na 8,953 m dalo je procijenjeno smanjenje fizičkih gubitaka od 7 % i neprihodovane vode za 6,06 %, a

prioritet uspostave zona određen je višekriterijskim vrednovanjem s potencijalom fizičkih gubitaka kao dominantnim kriterijem (Nanda i sur., 2023). Autori pritom upozoravaju da konsolidacija zona na jedan ulaz mjestimično traži pojačan rad crpki, što povisuje tlak i može povećati pozadinska curenja — zbog čega preporučuju faznu provedbu uz aktivnu detekciju (Nanda i sur., 2023). U optimizaciji upravljanja posljedicama ulaska onečišćenja u teheransku mrežu istjecanje je u model uneseno MNF procjenom i raspodijeljeno FAVAD odnosom s eksponentom $N = 1$, odabranim iz sredine literaturnog raspona 0,5 do 1,5; studija je pokazala da zanemarivanje istjecanja i promjena potrošnje mijenja optimalne konfiguracije ventila i hidranata, odnosno vodi pogrešnim operativnim odlukama — ukupna izloženost onečišćenju bez ijedne intervencije u scenariju s oba čimbenika iznosi 124,44 kg, za 32 % manje nego u baznom scenariju, jer dio onečišćenja napušta mrežu kroz otvore curenja, a smanjena potrošnja mijenja hidrauliku širenja (Razavi i sur., 2023). Istjecanje je pritom procijenjeno na približno 20 % ukupne potražnje — MNF mjerenjem od 55,23 l/s uz legitimnu noćnu potrošnju od svega 1,1 l/s (Razavi i sur., 2023). U kalibraciji modela sustava s isprekidanom opskrbom u Lusaki — problemu koji se globalno tiče približno 1,3 milijarde ljudi na isprekidanoj opskrbi — eksponent istjecanja tretiran je kao globalna odlučujuća varijabla genetskog algoritma unutar granica 0,36 do 2,5 preuzetih iz literature; optimizacija je vratila vrijednost 0,364 — na samoj donjoj granici pretrage — što autori povezuju s dominacijom azbest-cementa i čelika u mreži, ali i priznaju da točnost tako određenih parametara nije utvrđena jer validacija zbog oskudnosti podataka nije provedena, a jedinstveni mrežni eksponent unosi pogrešku jer dominantni tip kvara varira po zonama (Leinaes i sur., 2024). Analiza osjetljivosti pritom je upravo koeficijente i eksponent emitira istjecanja identificirala kao najutjecajnije parametre cijelog modela — dok na hrapavost cijevi model gotovo i nije bio osjetljiv — što kvantitativno potvrđuje da je vjerodostojnost eksponenta usko grlo kalibracije modela s istjecanjem (Leinaes i sur., 2024).

Iste se obrasce nalazi i u širim okvirima upravljanja imovinom, u kojima odnos tlaka i istjecanja više nije predmet analize, nego ugrađena sastavnica alata za planiranje — te kvaliteta ugrađenog eksponenta neprimjetno određuje kvalitetu svih izvedenih odluka. Suvremena strategija „digitalne vode“, demonstrirana na talijanskim sustavima Modugno i Bari, pozadinska istjecanja modelira na razini cijevi Germanopoulosovim ili FAVAD pristupom unutar digitalnog blizanca mreže te uvodi dijagnostički omjer linearnog indeksa istjecanja i prosječnog tlaka kojim se razlučuje je li istjecanje vođeno deterioracijom infrastrukture ili visokim tlakovima — s izravnom posljedicom za izbor između rehabilitacije i upravljanja tlakom; dizajn mjernih zona s upravljanjem tlakom u tim je sustavima procijenjen na smanjenja volumetrijskih

gubitaka od 18,71 % odnosno 19,95 % (Laucelli i sur., 2023). Dijagnostički omjer pritom izravno usmjerava ulaganja. Za Modugno, s vrijednošću 5,74, gubici su pretežno posljedica deterioracije, stoga rehabilitacija donosi više od upravljanja tlakom, dok se šest pod mreža Barija proteže od 0,84 — pod mreže u kojoj intervencije uopće nisu potrebne — do 5,23, s najvećim učinkom dizajna zona upravo tamo gdje je omjer najniži (Laucelli i sur., 2023). Simulacija dvadesetogodišnjega životnog ciklusa referentne mreže s emitterskim modelom istjecanja pokazala je da mreža bez održavanja već od devete godine ne zadovoljava potražnju te da je popravak curenja hidraulički najučinkovitija mjera — smanjuje pogonske troškove za približno 16 % godišnje i specifičnu potrošnju energije do 42 % — ali zbog visokih ulaganja završava s negativnom neto sadašnjom vrijednošću, dok skromnije čišćenje cijevi, s upola manjim hidrauličkim učinkom, ostaje ekonomski isplativo (Evangelista i sur., 2023); autori pritom ocjenjuju da upravljanje tlakom problem odgađa, a ne rješava, jer otvori curenja ostaju u mreži (Evangelista i sur., 2023). U višeciljnom dizajnu mjernih zona crpljenih mreža prosječni se tlak koristi kao surogat smanjenja istjecanja upravo pozivom na odnos tlaka i curenja. Mreža se najprije klasterira uz tlak kao težinu grananja, a zatim se evolucijskim algoritmom istovremeno optimira pet ciljeva — broj mjerila protoka, pogonski trošak crpljenja, indeks otpornosti, prosječni tlak i starost vode — pri čemu je tlačno bazirana particija dala niže prosječne tlakove i bolju starost vode od ranijih pristupa (Sharma i sur., 2023). U optimizacijskom rješenju referentnog natjecateljskog problema pozadinsko je curenje kao trošak učinilo ventile za redukciju tlaka isplativima u velikom broju — konačno rješenje sadrži 44 ventila uz svega 78 paralelnih cijevi zanemariva troška, s ventilima na ograncima glavnih trasa i ciljanim zatvaranjem cijevi kojim se prstenasta područja otvaraju za učinkovitiju redukciju tlaka jednim ventilom (Price i Ostfeld, 2014). Konačno, kao alternativa cijeloj paradigmi modeliranja odnosa istjecanja i tlaka predložen je signalni pristup. Ograničena analiza nezavisnih komponenti razdvaja protok istjecanja od ukupnoga dobavnog protoka statistikom višeg reda, bez hidrauličkog modela i bez parametara odnosa tlak–curenje, s koeficijentima sličnosti iznad 0,88 i prosječnim pogreškama do 4,9 % na laboratorijskim, simulacijskim i stvarnim podacima — ali uz ograničenje na sustave s jednim ulazom (Zheng i sur., 2016). Isti rad donosi i korisnu taksonomiju šest razreda „globalnih” modela procjene istjecanja — od konvencionalnih i modela s jedinstvenim koeficijentom, preko MNF razvrstavanja i proporcionalnih pristupa, do komponentne BABE analize i ekvivalentnoga jednog curenja pri prosječnom zonskom tlaku — uz formalni argument da je idealni globalni model, s poznatim parametrima svakoga pojedinačnog curenja, načelno nerješiv jer broj nepoznanica najmanje dvostruko premašuje broj curenja (Zheng i sur., 2016).

Sažme li se ovaj tok literature, slika je dvoslojna. Na teorijsko-implementacijskoj razini FAVAD okvir je zaokružen. Sustavni parametri imaju dokazanu fizikalnu interpretaciju i poznatu točnost procjene (Schwaller i sur., 2015), ugradnja u standardne alate je riješena i matematički utemeljena (Piller i Van Zyl, 2014; Kabaasha i sur., 2016), a pogreška zamjene FAVAD opisa potencijском aproksimacijom kvantificirana je neovisnim studijama na 15 do 20 % na razini sustava i do 60 % na razini čvora (Boian i sur., 2019; Kabaasha i sur., 2016). Na primijenjenoj razini, međutim, vrijednost eksponenta i dalje se rutinski pretpostavlja iz literaturnih pravila — 1,2 (Samir i sur., 2017), 1,5 (Nanda i sur., 2023), 1,0 (Razavi i sur., 2023) — ili prepušta optimizacijskom algoritmu bez neovisne provjere (Leinaes i sur., 2024; Sebbagh i sur., 2018; Nasirian i Ahrari, 2022), premda je upravo za ta pravila pokazano da su zastarjela i da sustavno odstupaju od simuliranih distribucija utemeljenih na stvarnim zapisima kvarova (Beygi i van Zyl, 2024). Gradacija je pritom indikativna. Što je studija bliža operativnoj odluci — dimenzioniranju ventila, planiranju zona, upravljanju incidentom — to je izbor eksponenta paušalniji, jer se discipliniran izbor jednostavno nema na što osloniti. Nedostaje, dakle, karika između dostupnih podataka o sustavu i vjerodostojne zonske vrijednosti eksponenta — karika koju terensko mjerenje popunjava uz visoku cijenu (pogl. 3.1), a koju nijedna od prikazanih studija ne popunjava prediktivno. Može li tu ulogu preuzeti strojno učenje, pitanje je kojem se okreće sljedeće potpoglavlje.

Pregled modelskih pristupa i primjena prikazanih u ovom potpoglavlju — s opsegom primjene i ključnim rezultatom svakoga izvora — sažima tablica 3.2.

Tablica 3.2. Pregled modeliranja i primjena eksponenta N1 / FAVAD

Autori (godina)	Pristup/model	Opseg primjene	Ključni rezultat
Schwaller i van Zyl (2015)	stohastička agregacija pojedinačnih elastičnih curenja u zonski odziv	tipična zona Ujedinjenog Kraljevstva: 40 km cjevovoda, 2500 priključaka	zonski eksponent ovisi o stanju sustava i rasponu statičkih tlakova (horizontalni sustav: 1,12 → 0,96); veliko smanjenje tlaka snižava izmjereni eksponent (0,92 pri –35 m naspram 1,12); već 3 % otvora s vrlo visokim brojem curenja podiže sustavni eksponent na 1,2
Schwaller i sur. (2015)	sustavski FAVAD parametri (početna površina i nagib) iz dvaju mjerenja curenja i tlaka	335 simuliranih mrežnih modela	procjene odgovaraju zbrojevima pojedinačnih vrijednosti; pogreška

Autori (godina)	Pristup/model	Opseg primjene	Ključni rezultat
			početne površine 16 % (tipični sustav), ≈ 1 % (horizontalni), ≈ 100 % (raspon visina 90 m); bez dodatnih podataka u odnosu na postojeća ispitivanja
van Zyl i sur. (2017)	dijagnostička primjena sustavskih FAVAD parametara	terenska ispitivanja (KwaDabeka)	fizikalno nerealne vrijednosti (negativne površine) otkrivaju pogreške mjerenja ili propusne granične ventile zone — procjena parametara kao provjera kvalitete ispitivanja
Beygi i van Zyl (2024)	stohastički model s razdiobama otvora svojstvenima pojedinom materijalu (fotografski zapisi kvarova, baza PIPEiD)	četiri cijevna materijala kroz raspon vrijednosti ILI	eksponent je zajednička funkcija materijala i razine gubitaka: željezo $\approx 0,5$ neovisno o ILI; PVC 0,66 (ILI = 0,6) $\rightarrow$ 1,27 (ILI = 8); važeće smjernice (1,5 za plastične mreže) znatno odstupaju i traže ažuriranje
Dundović i Tadić (2022)	primjena praktičarskih smjernica za teorijski eksponent u terenskoj studiji	hrvatska mjerna zona sa 100 % PVC cijevi	teorijski eksponent 1,5 izračunan prema smjernicama za koje je naknadno pokazano da su zastarjele (Beygi i van Zyl, 2024) — neposredna motivacija za pouzdaniji postupak procjene
Piller i Van Zyl (2014)	energetska formulacija mrežnih jednadžbi s FAVAD curenjem	formalno-matematički dokaz	dokazane egzistencija i jedinstvenost hidrauličkog rješenja; globalno konvergentan algoritam; FAVAD curenje nema gornje granice, zbog čega formulacije tlačno-ovisne potrošnje nisu izravno prenosive
Kabaasha i sur. (2016)	FAVAD u EPANET-u preko dvaju emitera po čvoru (eksponenti 0,5 i 1,5)	200 stohastički generiranih sustava, ILI = 16	potencijska jednadžba kalibrirana pri visokom tlaku griješi do 20 % (sustav) i do 60 % (čvor); na kritičnom čvoru ≈ 56 % sustava s

Autori (godina)	Pristup/model	Opseg primjene	Ključni rezultat
			pogreškom 33,75 do 46,25 %
Boian i sur. (2019)	faktorska usporedba FAVAD i potencijske jednadžbe	model stvarne PVC mreže od 30,7 km	razlika do ≈ 15 % čak i uz kalibraciju po pojedinačnom curenju; oba člana FAVAD jednadžbe istog su reda veličine za otvore 50 do 150 mm ² — jednočlana aproksimacija ondje ne može biti točna
Muranho i sur. (2014)	dvokomponentni model curenja po cijevi (WaterNetGen proširenje EPANET-a)	mrežni modeli (analiza vođena potražnjom i tlakom)	pozadinsko istjecanje proporcionalno duljini i tlaku na eksponent 0,5 do 2,5 te lomovi po jednadžbi otvora; zaobidjena ograničenja emitera u čvorovima
Fuchs-Hanusch i sur. (2016)	iterativni FAVAD proračun istjecanja pri lomu naspram literaturnih eksponenata	158 km bečkih magistralnih vodova	jednostavni pristup znatno podcjenjuje istjecanje za uzdužne pukotine (stvarni lomovi ≈ 1000 do 3000 m ³ /h); zbirni pregled eksponenata po materijalu i tipu kvara (npr. 1,23 do 1,97 za uzdužne pukotine u polietilenu)
Samir i sur. (2017)	scenarijska analiza razmještaja PRV; curenje po cijevi, eksponent pretpostavljen na 1,2	aleksandrijska mjerna zona (ILI = 44,8)	lokacija ventila presudna: najbolji od pet scenarija smanjuje curenje s 230 na 142 m ³ /dan (37 %), tri scenarija bez praktičnog učinka
Nanda i sur. (2023)	FAVAD proračun učinka formiranja mjernih zona, N1 = 1,5 pretpostavljen bez terenske verifikacije	Palangka Raya (Indonezija): ≈ 715 km mreže, 27 zona	sniženje prosječnog tlaka s 9,421 na 8,953 m → procijenjeno smanjenje fizičkih gubitaka 7 % i neprihodovane vode 6,06 %
Razavi i sur. (2023)	FAVAD raspodjela istjecanja u optimizaciji upravljanja ulaskom onečišćenja, N = 1 iz sredine literaturnog raspona	teheranska mreža; istjecanje ≈ 20 % potražnje (MNF 55,23 l/s)	zanemarivanje istjecanja i promjena potrošnje mijenja optimalne konfiguracije ventila i hidranata; izloženost onečišćenju 124,44 kg, 32 % manje

Autori (godina)	Pristup/model	Opseg primjene	Ključni rezultat
			nego u baznom scenariju
Leinaes i sur. (2024)	eksponent kao globalna odlučujuća varijabla genetskog algoritma (granice 0,36 do 2,5)	kalibracija sustava s isprekidanom opskrbom (Lusaka)	optimizacija vratila 0,364 na donjoj granici pretrage, bez validacije; eksponent i koeficijenti emitera najutjecajniji parametri modela — usko grlo kalibracije
Laucelli i sur. (2023)	digitalni blizanac; pozadinsko istjecanje Germanopoulosovim ili FAVAD pristupom po cijevi; dijagnostički omjer	talijanski sustavi Modugno i Bari	dijagnostički omjer usmjerava izbor između rehabilitacije i upravljanja tlakom (Modugno 5,74; pod mreže Barija 0,84 do 5,23); dizajn zona smanjuje gubitke 18,71 % odnosno 19,95 %
Evangelista i sur. (2023)	emitterski model istjecanja u simulaciji dvadesetogodišnjega životnog ciklusa	referentna mreža	popravlak curenja hidraulički najučinkovitiji (−16 % pogonskih troškova godišnje, do −42 % specifične energije), ali s negativnom neto sadašnjom vrijednošću; upravljanje tlakom problem odgađa
Sharma i sur. (2023)	prosječni tlak kao surogat smanjenja istjecanja u višeciljnom dizajnu mjernih zona	crpljene mreže; pet istovremenih ciljeva	tlačno bazirana particija daje niže prosječne tlakove i bolju starost vode od ranijih pristupa
Price i Ostfeld (2014)	pozadinsko curenje kao trošak u optimizaciji referentnog problema	referentni natjecateljski problem	ventili za redukciju tlaka isplativi u velikom broju: 44 ventila uz svega 78 paralelnih cijevi zanemariva troška; ciljano zatvaranje cijevi za redukciju jednim ventilom
Zheng i sur. (2016)	ograničena analiza nezavisnih komponenti — razdvajanje protoka istjecanja bez hidrauličkog modela i parametara odnosa tlak–curenje	laboratorijski, simulacijski i stvarni podaci (sustavi s jednim ulazom)	koeficijenti sličnosti iznad 0,88, prosječne pogreške do 4,9 %; taksonomija šest razreda globalnih modela; idealni globalni model načelno nerješiv
Sebbagh i sur. (2018)	jedinstveni mrežni eksponent kao varijabla genetskog algoritma (granice 0,5 do 2,5) uz	sektor K117 (Alžir): 87 km mreže, 47 % neprihodovane vode	optimizacija vratila N1 = 1,1; s osam mjerenja tlaka pred-locirano 36

Autori (godina)	Pristup/model	Opseg primjene	Ključni rezultat
	koeficijente istjecanja po čvorovima		stvarnih curenja ukupne stope $\approx 57 \text{ m}^3/\text{h}$
Nasirian i Ahrari (2022)	kalibracijska detekcija curenja emitterskim koeficijentima uz redukciju prostora pretrage; eksponent usvojen FAVAD teorijom	zona mreže Birjanda (Iran): 1140 čvorova, šest zona	usvojeni eksponent 1,15 (raspon 0,9 do 1,2); dobra funkcija cilja ne jamči točnu lokalizaciju — preporučeno promatranje više dobrih rješenja

Izvor: pogl. 3.2 i insights baza (Serije 2–4); vrijednosti prema izvornim studijama navedenima u retcima.

3.3. Strojno učenje u vodoopskrbnim sustavima

Strojno učenje u posljednjem je desetljeću postalo standardni dio istraživačkog repertoara u upravljanju vodoopskrbnim sustavima. Pregledni radovi dokumentiraju i širinu i strukturu tog razvoja. Pregled trendova primjene u upravljanju vodoopskrbnim mrežama sistematizirao je faze nadziranog učenja — obradu podataka, treniranje, validaciju i predikciju — na podlozi trinaest studija sa stvarnim mrežama iz cijeloga svijeta, uz tri poruke koje se provlače kroz cijelo područje. Podaci vodoopskrbnih mreža tipično su neuravnoteženi po klasama, zbog čega klasifikacijski zadaci traže tehnike uzorkovanja, unakrsna validacija postala je gotovo uvjet pouzdanih rezultata, a izbor modela odražava kompromis između točnosti crnih kutija i interpretabilnosti statistički utemeljenih metoda (Robles-Velasco i sur., 2021a). Najnoviji sustavni pregled primjena umjetne inteligencije u detekciji curenja, proveden po PRISMA protokolu (engl. *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) na 53 studije iz razdoblja 2018. do 2025., utvrdio je da je tlak najčešća i najosjetljivija ulazna varijabla za hidrauličke anomalije — nalaz koji izravno korespondira s FAVAD fizikom iz pogl. 2.2 — te da većina skupova podataka potječe iz EPANET simulacija, dok su laboratorijske i terenske implementacije rijetke zbog cijene i složenosti (Zuñiga-Uribe i sur., 2026). Isti pregled sažima i razinu performansi po obiteljima metoda. Klasično strojno učenje — osobito metoda potpunih vektora — postiže točnosti od 94 do 100 % uz stabilnost na šum i niske računske zahtjeve, konvolucijske arhitekture dubokog učenja 95 do 99 % u višeklasnoj klasifikaciji i lokalizaciji, a hibridni pristupi s automatskom ekstrakcijom značajki i klasičnim klasifikatorom više od 97 % uz pogreške lokalizacije manje od 0,2 m — no uz kritičku ogradu da mnoge studije izvještavaju samo najbolje rezultate, bez procjene nesigurnosti, i da prevlast simuliranih skupova ograničava svaku tvrdnju o generalizaciji na stvarne sustave (Zuñiga-Uribe i sur., 2026). Kao sintezu najboljih praksi isti pregled predlaže i referentni hibridni model —

automatsku ekstrakciju značajki konvolucijskom mrežom spregnutu s klasičnim klasifikatorom, u zatvorenoj petlji akvizicije, fuzije i dijagnoze (Zuñiga-Urbe i sur., 2026). U hrvatskom kontekstu, pregledni radovi o primjeni ekspertnih sustava u građevinarstvu (Grčić i Šperac, 2024) i ekspertnih metoda u održavanju sustava odvodnje (Obradović i sur., 2019) dokumentiraju istu tendenciju u domaćoj literaturi. Metode umjetne inteligencije prisutne su u svim sektorima građevinarstva — od procjene rizika pucanja cijevi do optimizacije održavanja — ali njihova praktična primjena zaostaje za mogućnostima, a radovi s jasno prikazanim konkretnim rezultatima u manjini su (Grčić i Šperac, 2024). Za hrvatski vodoopskrbni sektor taj raskorak nije akademsko pitanje. Sustavi s dokumentiranim gubicima blizu polovice ulaznog volumena i mjernim zonama u kojima radni tlakovi mjestimično dosežu 7,5 bara (Dundović, 2017) upravo su okruženje u kojem bi analitički alati za potporu odlučivanju — o prioritetima zona, isplativosti upravljanja tlakom, planiranju obnove — donijeli najviše, a domaći pregledi pokazuju da za njih postoji i metodološka podloga i akademska zajednica. Dokumentirane primjene sežu od ekspertnih sustava za procjenu rizika pucanja cijevi i prioritizaciju održavanja do sustava koji su u vodoopskrbnom pogonu ostvarili mjerljive uštede energije (Grčić i Šperac, 2024). Prepreka koju oba pregleda izdvajaju — općenitost postojećih sustava zbog oskudnih podataka komunalnih poduzeća i slaba prisutnost radova s provjerljivim rezultatima (Obradović i sur., 2019; Grčić i Šperac, 2024) — istovjetna je onoj koju ovo istraživanje rješava izravno jer bez kvalitetno kontroliranih terenskih podataka i transparentno validiranih modela metode umjetne inteligencije u vodoopskrbi ostaju demonstracije. Disertacija stoga hrvatskom sektoru ne nudi samo model, nego i obrazac discipliniranog puta od terenskih mjerenja do provjerljivog alata. Pregled koji slijedi organiziran je po trima glavnim primjenskim područjima — detekciji curenja i predviđanju puknuća (pogl. 3.3.1), prognozi potrošnje i potražnje (pogl. 3.3.2) te otkrivanju anomalija i kvaliteti vode (pogl. 3.3.3) — sa sažetkom u tablici 3.3. Kroz sva tri područja pregled sustavno prati četiri metodološka pitanja prenosiva na problem ove disertacije — kako se tretiraju mali i neuravnoteženi skupovi, kako se validira nad strukturiranim podacima, kako se biraju značajke i kako se izvještava nesigurnost — jer je zadaća disertacije upravo regresijsko predviđanje iz malog broja terenskih opažanja.

Tablica 3.3. Pregled primjena strojnog učenja u vodoopskrbnim sustavima po području primjene

Područje primjene	Reprezentativne studije	Tip ulaznih podataka	Algoritmi	Razina validacije	Tipične performanse
Detekcija i lokalizacija curenja	Sousa i sur. (2023); Chatterjee i sur. (2026); Liu i sur. (2019); Yussif i sur. (2023); Taghlabi i sur. (2020);	tlakovi i protoci (SCADA, pametna brojila), akustični i vibracijski signali, EPANET simulacije	prototipni klasifikatori, ansambli (slučajne šume, XGBoost), SVM,	pretežno simulacija; laboratorij; rjeđe teren	točnost 94–100 % (klasično strojno učenje), 95–99 % (duboko učenje); terenske točnosti 70–80 % naspram

Područje primjene	Reprezentativne studije	Tip ulaznih podataka	Algoritmi	Razina validacije	Tipične performanse
	Canivete i sur. (2026); Zuñiga-Urbe i sur. (2026)		konvolucijske i rekurentne mreže		laboratorijskih 99 %; pad „sim-to-real“ 3–30 postotnih bodova
Predviđanje puknuća	Robles-Velasco i sur. (2021b); Wang i sur. (2023)	registri kvarova (promjer, starost, duljina, prethodni kvarovi), tlačni senzori sa SCADA očitanjima	umjetne neuronske mreže, klasifikatori s domenskom adaptacijom	stvarni zapisi kvarova (teren)	81,7 % predviđenih kvarova uz ukupnu točnost 78,3 % (uz nisku preciznost zbog neuravnoteženosti); identifikacija particije s puknućem 96,46 %, lokalizacija 0,57–0,94 km
Proгноza potrošnje i potražnje	Antunes i sur. (2018); De Souza Groppo i sur. (2019); Liu i sur. (2022)	vremenski nizovi potrošnje, meteorološki i socioekonomski podaci	neuronske mreže, SVM, k-najbliži susjedi, slučajne šume, SARIMA + LASSO hibridi	stvarne mreže (teren)	strojno učenje bolje od ARIMA-e za ~18 % (RMSE) odnosno ~8 % (MAPE); hibridni pristupi sustavno nadmašuju pojedinačne; ušteda pogona 18–55 %
Otkrivanje anomalija	Vries i sur. (2016); Fang i sur. (2019); Meleshko i sur. (2020)	senzorski tokovi (protok, tlak, razina), dnevni zapisi količina	regresija potpornih vektora, jednoklasni SVM, k-najbliži susjedi, praćenje skrivenih varijabli	stvarna mreža; laboratorijski prototip	na stvarnoj mreži nijedan pristup nije uvjerljivo nadmašio jednostavne referentne modele; prototip 83–87 % točnosti; nenadzirane metode bez referentnih oznaka ostaju deskriptivne
Kvaliteta vode	Lu i sur. (2023); Oğuz i Ertuğrul (2023)	mrežni uzorci kvalitete (klor kao surogat), javni skupovi podataka	regresija potpornih vektora, neuro-neizrastiti sustavi, ansambli, mreže ekstremnog učenja	teren (280 lokacija, prijenos među postrojenjima); javni skupovi	$R^2 \approx 0,68$ (trening) i 0,64 (validacija) za surogatni klor; jednostavniji modeli uz pažljivu pripremu ravnopravni ili bolji od složenih

Izvor: insights baza, Serije 5–6 (strojno učenje u vodoopskrbnim sustavima); vrijednosti prema izvornim studijama navedenima u retcima.

3.3.1. Predviđanje puknuća i otkrivanje curenja

Detekcija i lokalizacija curenja najrazvijenija je grana primjene strojnog učenja u vodoopskrbi, s više paralelnih metodoloških struja koje se razlikuju po vrsti ulaznog signala. Prvu struju čine pristupi nad hidrauličkim veličinama — tlakovima i protocima. Na stvarnim podacima četiriju crpnih stanica stokholmske mjerne zone sa 70.250 stanovnika razvijena je detekcija niske računske složenosti. Dnevni profili tlaka projicirani su kanoničkom diskriminantnom funkcijom u četverodimenzionalni prostor značajki, broj prototipova određen je klusterskom validacijom, a klasifikacija provedena obitelji interpretabilnih prototipnih algoritama, s najvišom točnošću od 93,98 % — bez hidrauličkog modela i bez poznavanja topologije mreže (Sousa i sur., 2023). Klusterska je validacija pritom dosljedno pokazala da su dovoljna svega dva prototipa po klasi, što detekciju čini računski trivijalnom, a varijante s učenjem težina

relevantnosti dale su i interpretabilan uvid u to koja crpna stanica nosi najviše informacije o curenju (Sousa i sur., 2023). Ista je studija sustavno tretirala neuravnoteženost klasa (54 dana s curenjem naspram 394 normalna) preuzorkovanjem uz svjesni kompromis s kvalitetom signala te izvještavala varijabilnost rezultata kroz 100 neovisnih ponavljanja — obje prakse izravno poučne za rad s malim terenskim uzorcima. Na razini mjernih zona, okvir razvijen na danskim podacima sa 6679 pametnih vodomjera u 21 zoni uči kauzalnu dinamiku potrošnje i opskrbe ansamblom četiriju regresijskih modela — slučajne šume, metode potpornih vektora (SVM, engl. *Support Vector Machine*), gradijentnog pojačavanja XGBoost i višeslojne neuronske mreže — stoga nova curenja detektira kao statistička odstupanja predviđene od opažene opskrbe, bez potrebe za označenim primjerima curenja. Detekcija slijedi unutar 8 do 12 sati od nastanka, s točnošću od 98 % na potvrđenim stvarnim curenjima pri srednjem pragu odlučivanja (Chatterjee i sur., 2026). Poučna je sama po sebi i interna usporedba regresijskih komponenti ansambla, u kojoj je XGBoost postigao najnižu srednju apsolutnu postotnu pogrešku od 6,25 %, višeslojna mreža 7,52 %, slučajna šuma 13,66 %, a regresija potpornih vektora bez podešavanja hiperparametara čak 27,79 % — no upravo je potonja, nakon podešavanja, u četirima zonama nadmašila XGBoost, što je autorima poslužilo kao argument za ansambl umjesto jednog modela (Chatterjee i sur., 2026). Jednako je indikativno da je jedinstveni model s kodiranom oznakom zone postigao točnost praktički jednaku 84 zasebna zonska modela uz višestruko manji trošak, dok detekcija najslabijih curenja — s gubitkom od 5 do 8 % opskrbe — ostaje inherentno teška i pada s pooštavanjem praga odlučivanja (Chatterjee i sur., 2026). Konceptualno je važan i postupak automatske kalibracije trening-podataka koji pozadinsko istjecanje zadržava kao „normalno“ stanje, a uklanja samo nova curenja — ista dekompozicija ukupnog istjecanja na kojoj počiva i MNF analiza iz pogl. 2.3; sam okvir autori interpretiraju dvojako, kao statistički nadzor inovacija u Kalmanovu smislu i kao ručno izgrađenu mješavinu eksperata s pouzdanošću modela kao težinom (Chatterjee i sur., 2026).

Problem rijetkosti kvarova — u stvarnim zapisima puknuća čine postotak ili manje opažanja — sustavno je riješen metodom domenske adaptacije. Uzorci puknuća generiraju se EPANET simulacijama na virtualnoj mreži proizvoljne topologije, a zatim se projekcijom u zatvorenom obliku prenose u prostor stvarne mreže, čime se klasifikatoru osigurava uravnotežen trening bez skupe kalibracije virtualnog modela; na stvarnoj kineskoj mreži s 2924 čvora i 10.976 cijevi, nadziranoj s 29 tlačnih senzora sa satnim SCADA očitanjima i sa 106 zabilježenih puknuća u 91 danu, najbolji je klasifikator postigao prosječnu točnost identifikacije particije s puknućem od 96,46 %, uz lokalizaciju točke puknuća s prosječnom pogreškom od 0,57 do 0,94

km (Wang i sur., 2023). U kontroliranim virtualnim scenarijima metoda je nadmašila izravno učenje na neuravnoteženim podacima za 7 do 30 postotnih bodova, a klasični Kalmanov filter i znatnije, a ključni je nalaz da topološka sličnost virtualne i stvarne mreže malo utječe na uspješnost prijenosa — puknuće u bilo kojoj mreži uzrokuje srodan obrazac promjena tlaka u svojoj okolini, stoga i proizvoljna virtualna topologija značajno poboljšava prepoznavanje (Wang i sur., 2023). Studija ujedno ilustrira „sim-to-real“ paradigmu — hidraulički model kao generator sintetičkih podataka za učenje — koja se u literaturi pokazuje i kao snaga i kao slabost jer pad performansi pri prijelazu sa sintetičkih na stvarne podatke iznosi približno 3 do 30 postotnih bodova (Canivete i sur., 2026).

Drugu struju čine akustične i vibracijske metode. Laboratorijski sustav s bežičnom senzorskom mrežom kombinirao je empirijsku modalnu dekompoziciju signala, aproksimativnu entropiju i analizu glavnih komponenti kao značajke te SVM kao klasifikator, postigavši točnost identifikacije curenja od 98 % — spektar signala curenja koncentriran je oko 1,6 kHz, za razliku od raspršenog spektra normalnog rada, a nijedna pojedinačna značajka nije bila dovoljna (sama aproksimativna entropija daje 83 %) — no uz izraženu degradaciju u šumu, s padom na 85 % pri omjeru signala i šuma od 0 dB (Liu i sur., 2019). Uz samu detekciju, rad je obradio i energetske održivosti senzorske mreže — predloženo umrežavanje aktivirano događajem curenja drži terminalne čvorove naizmjenice u stanju mirovanja i budi ih tek pri detekciji, uz zanemarivo produljenje vremena umrežavanja (Liu i sur., 2019). Terenska primjena iste metodološke obitelji u mreži Hong Konga pokazala je da je lokalizacija izvediva i jednim akustičnim loggerom. Nakon selekcije značajki analizom glavnih komponenti regresijski SVM procjenjuje udaljenost curenja s točnošću od 82,50 % po kriteriju pogreške unutar jednog metra, a klasifikator smjera postiže 97,50 % (Yussif i sur., 2023). Ta je studija ujedno paradigmatski primjer važnosti selekcije značajki na malim uzorcima budući da sa svih 17 značajki umjesto odabranih šest validacijska točnost pada s 82,50 na 37,50 % — model s viškom značajki uči napamet umjesto da generalizira (Yussif i sur., 2023). Autori su jednako otvoreni o dosegu rezultata. Mjerenja pokrivaju samo metalne cijevi velikog promjera do udaljenosti od 25 m, neovisni validacijski skup obuhvaća tek tri mjesta curenja na kratkim udaljenostima, a metoda ne razlučuje više istovremenih curenja na istoj dionici (Yussif i sur., 2023) — ograničenja tipična za terenske skupove skromne veličine, kakva zahtijevaju i primjeren oprez u interpretaciji.

Treću struju čine modelski pristupi u kojima algoritam uči nad simulacijama kalibriranoga hidrauličkog modela — i upravo je u njoj veza s FAVAD okvirom najizravnija. U pilot-sektoru

Casablance s 493 čvora i 42 km cjevovoda curenje je modelirano emiterima po FAVAD konceptu, a slučajna šuma trenirana na 1972 EPANET simulacije umjetnih curenja — po četiri emitera koeficijenta, ekvivalentna protocima od približno 5 do 20 l/s, na svakom čvoru — uz sedam referentnih tlačnih profila po senzoru s pojasom od 0,6 m kao obranu od lažnih detekcija; metoda je terenski provjerena stvarnim umjetnim curenjima otvaranjem hidranata te pred-locira curenja unutar radijusa od 100 m, ali pouzdano tek za protoke veće od približno 10 l/s, koji izazivaju dovoljan pad tlaka na standardnim senzorima — terensko curenje od 6 l/s izazvalo je pad tlaka od svega 0,3 m, na granici ukupne mjerne i modelske nesigurnosti procijenjene na 0,5 m (Taghlabi i sur., 2020). Terenska je provjera otkrila i tipične izvore lažnih detekcija — algoritam je dva dana pogrešno klasificirao kao curenje jer su na mreži zatvarani ventili zbog radova, a detekcija se pokazala najslabijom u petljastim dijelovima mreže, gdje se pad tlaka raspodjeljuje po više paralelnih putova (Taghlabi i sur., 2020). Uz optimizacijske kalibracije prikazane u pogl. 3.1 (Nasirian i Ahrari, 2022; Sebbagh i sur., 2018), ta studija čini najbliži dodir strojnog učenja i FAVAD okvira u pregledanom korpusu — slučajna šuma, isti algoritam koji je među kandidatima i u ovoj disertaciji, uči nad FAVAD simulacijama — no smjer je sprege suprotan. Eksponent je i u njoj ulazna pretpostavka hidrauličkog modela iz literaturnih vrijednosti, a ne veličina koju bi model predviđao iz značajki sustava (Taghlabi i sur., 2020).

Uz detekciju postojećih curenja, strojno se učenje primjenjuje i na predviđanje budućih kvarova za potrebe planiranja obnove. Na sedmogodišnjoj bazi kvarova sevilske mreže s 89.595 dionica klasifikacijska neuronska mreža (ANN, engl. *Artificial Neural Network*) razvrstava cijevi prema sklonosti kvaru. Bez uravnoteženja klasa model praktički ne predviđa kvarove unatoč prividnoj točnosti od 0,993, dok najbolja konfiguracija — s uravnoteženim treningom i svega četiri ulazne varijable (promjer, starost, duljina i broj prethodnih kvarova) — predviđa 81,7 % kvarova uz ukupnu točnost od 78,3 % (Robles-Velasco i sur., 2021b). Studija je transparentna i o granicama takvih modela, priznajući da je preciznost zbog ekstremne neuravnoteženosti vrlo niska — od stotinu cijevi predviđenih za kvar otkáže ih približno dvije — što autori brane ekonomikom problema, jer je neočekivani kvar skuplji od preventivne inspekcije, a dublje mreže s 50 ili 100 skrivenih slojeva pogoršale su rezultate jer podataka za toliko parametara jednostavno nema (Robles-Velasco i sur., 2021b). Dva su nalaza šire poučna — manji, dobro odabran skup varijabli nadmašio je potpuni skup, a fluktuacija tlaka kao dodatna varijabla pogoršala je predikciju, što autori pripisuju kvaliteti podataka o tlaku u trenutku kvara (Robles-Velasco i sur., 2021b). U rubnu literaturu ove struje spada i rad o kontroli istjecanja kineskih

urbanih mreža koji, unatoč naslovnoj referenci na strojno učenje, primjenu svodi na IWA bilancu vode i statističku analizu ponašanja potrošnje (Liang i Kong, 2023).

Preko svih struja protežu se zajedničke metodološke pouke, najsustavnije artikulirane u kritičkom pregledu primjena dubokog učenja provedenom po PRISMA okviru na 72 studije (Canivete i sur., 2026). Prvo, arhitekture se specijaliziraju po vrsti podataka — konvolucijske mreže za akustične signale i slikovne reprezentacije, rekurentne mreže za hidrauličke vremenske nizove — s objavljenim točnostima koje redovito prelaze 95 %. Drugo, te su brojke sustavno napuhane validacijskim izborima — slučajna podjela vremenskih nizova, umjesto kronološke, može točnost napuhati i do četiri puta, a dio studija strategiju podjele uopće ne navodi (Canivete i sur., 2026). Treće, jaz između kontroliranih i stvarnih uvjeta je trajan. Stvarne terenske točnosti kreću se oko 70 do 80 % nasuprot laboratorijskih 99 %, smanjenje broja senzora s 21 na 8 spušta točnost detekcije s 99,6 na 96,4 % uz naglu degradaciju lokalizacije za curenja udaljenija od 15 m od senzora, a svega 13 % studija objavljuje programski kod (Canivete i sur., 2026). Preporuke pregleda — kronološka validacija kliznim prozorom, izvještavanje stope lažnih alarma i topološke pogreške lokalizacije uz točnost, hibridni trening na sintetičkim i stvarnim podacima i objašnjive metode za povjerenje operatera (Canivete i sur., 2026) — čitaju se kao program sazrijevanja cijelog područja od demonstracija prema primjeni. Za ovu disertaciju te pouke imaju izravnu metodološku vrijednost — validacijski protokol mora poštovati strukturu podataka (pogl. 4.3.1), performanse se moraju izvještavati transparentno i s mjerom nesigurnosti, a svaka tvrdnja o primjenjivosti mora biti utemeljena na stvarnim terenskim podacima, ne na simulacijama.

3.3.2. Predviđanje potrošnje i potražnje

Prognoza potrošnje i potražnje vode druga je velika grana primjene strojnog učenja u vodoopskrbi, metodološki zrelija od detekcije curenja jer se oslanja na dulje i kvalitetnije vremenske nizove. Krovni pregled metoda prognoze urbane potražnje — od klasičnih statističkih tehnika do pristupa računalne inteligencije — donosi tri zaključka koja nadilaze samu prognozu potražnje (De Souza Groppo i sur., 2019). Prvo, ne postoji model koji nadmašuje sve ostale u svim slučajevima — svaku regiju i svaki skup podataka treba proučiti zasebno i vrednovati više modela ili njihovih kombinacija. Drugo, hibridni pristupi — osobito s valičnom dekompozicijom nestacionarnih nizova i tehnikama ponovljenog uzorkovanja za ocjenu pouzdanosti — sustavno nadmašuju pojedinačne metode, no kombiniranje prognoza ima smisla samo ako komponente griješe na različite načine; kombiniranje modela s istim obrascima pogrešaka ne donosi ništa osim troška. Treće, selekcija ulaznih varijabli nužna je

obrana od prokletstva dimenzionalnosti, pri čemu pregled sistematizira poznatu taksonomiju filtarskih, omotačkih i ugrađenih postupaka s njihovim kompromisima brzine, preciznosti i sklonosti prenaučivosti (De Souza Groppo i sur., 2019) — taksonomiju koja se u ovoj disertaciji operacionalizira u pogl. 4.3.4. Pregled ujedno dokumentira i granice dosega područja. Istraživanja su pretežno usmjerena na kratkoročnu operativnu prognozu, dok su srednjoročni i dugoročni horizonti — podloge razvojnih planova — slabo pokriveni, a rekurentne i konvolucijske arhitekture dubokog učenja u prognozi urbane potražnje vode u vrijeme pregleda uopće nisu bile zabilježene (De Souza Groppo i sur., 2019). Ekonomski ulog pritom nije zanemariv — optimizacija pogona na temelju pouzdane prognoze procjenjuje se na uštedu od 25 do 30 % operativnih troškova (De Souza Groppo i sur., 2019).

Empirijsku razradu tih načela na stvarnim mrežama pruža sustavna usporedba 99 konfiguracija modela — umjetnih neuronskih mreža, metode potpornih vektora, k-najbližih susjeda i slučajnih šuma — na podacima dviju portugalskih vodovodnih tvrtki i tri referentna skupa (Antunes i sur., 2018). Metode strojnog učenja u pravilu su nadmašile klasični ARIMA model (engl. *AutoRegressive Integrated Moving Average*) — u prosjeku za približno 18 % po korijenu srednje kvadratne pogreške i 8 % po srednjoj apsolutnoj postotnoj pogrešci — no s nalazima koji upozoravaju na oprez pri svakoj usporedbi modela. Na jednoj od triju stvarnih mjernih točaka ARIMA je ipak imala najniži korijen srednje kvadratne pogreške, rangiranje tehnika mijenja se s izborom mjere pogreške, meteorološke značajke nisu jednoznačno poboljšale prognozu, a jednostavno klasteriranje dana pogoršalo je rezultate jer je smanjilo broj primjera za učenje (Antunes i sur., 2018). Na stvarnim su se podacima najboljima pokazale male neuronske mreže s kvazi-Newtonovim algoritmom učenja, dok je kombinacija stohastičkoga gradijentnog spusta i logističke aktivacije bila dosljedno najgora — podsjetnik da unutar iste obitelji modela konfiguracija znači koliko i izbor obitelji (Antunes i sur., 2018). Kao praktični optimum utvrđeno je približno dva tjedna prethodnih opažanja s prognostičkim prozorom od 24 sata, a predložena ponderirana paralelna strategija — ponderirani prosjek prognoza modela s pozitivnim i negativnim predznakom srednje pogreške — poboljšala je pristranost prognoze na validaciji u svim slučajevima, ali na testu ne uvijek, jer jedan loš model s odgovarajućim predznakom može pokvariti cijelu kombinaciju (Antunes i sur., 2018). Metodološki je za ovu disertaciju najvažnija eksplicitna odluka autora da standardnu unakrsnu validaciju ne koriste, jer bi slučajno miješanje vremenski osjetljivih podataka narušilo integritet procjene — isti argument koji, poopćen na sve strukturirane podatke, utemeljuje validacijski protokol u pogl. 4.3.1. Na strateškoj vremenskoj skali, sprega ansambla slučajnih šuma za prepoznavanje

osjetljivih značajki i samoprilagodljivoga regresijskog modela sa SARIMA komponentom (sezonski ARIMA) i LASSO regresijom (engl. *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*) s ugrađenom unakrsnom validacijom primijenjena je na desetogodišnju prognozu vodoopskrbe i potražnje megagrada Shenzhena. Ansambl je ispravno izdvojio pet osjetljivih značajki tamo gdje su pojedinačno stablo odlučivanja i obična slučajna šuma uključivali i pogrešnu, a LASSO s unakrsnom validacijom dao je koeficijente dosljednije fizikalnoj logici od konkurentskih regresijskih pristupa u uvjetima izražene multikolinearnosti (Liu i sur., 2022). Praktični je ulog takve prognoze strateški — projekcija potražnje od 2,2 milijarde m³ u 2025. i 2,35 milijardi m³ u 2030. premašuje maksimalni kapacitet dovođenja vode u grad od približno 1,9 milijardi m³ godišnje, te je na temelju modela odabran novi projekt dovođenja vode kao optimalni scenarij uravnoteženja (Liu i sur., 2022). Ista studija koristi permutacijski pristup ocjeni važnosti značajki — miješanje vrijednosti pojedine značajke i mjerenje pada uspješnosti modela — koji se, s formalnim utemeljenjem prikazanim u pogl. 2.4, primjenjuje i u analizi značajki modela ove disertacije.

Motivacija cijele grane pritom je izrazito operativna — pouzdana kratkoročna prognoza omogućuje raspored crpljenja u jeftinijim tarifnim razdobljima, s dokumentiranim smanjenjima troškova od 18 do 55 % (Antunes i sur., 2018). Premda prognoza potražnje nije neposredni predmet disertacije, njezine su pouke izravno prenosive na regresijsko predviđanje eksponenta N1: nužnost usporedbe više obitelji modela umjesto apriornog izbora, osjetljivost rangiranja na izbor mjere pogreške, opasnost slučajnog miješanja strukturiranih podataka pri validaciji te vrijednost selekcije značajki i permutacijske važnosti u uvjetima koreliranih ulaznih varijabli — sva četiri načela ugrađena su u metodološki okvir pogl. 4.

3.3.3. Otkrivanje anomalija i kvaliteta vode

Treće primjensko područje obuhvaća otkrivanje anomalija u senzorskim podacima i nadzor kvalitete vode — područje u kojem se najjasnije vide granice primjenjivosti strojnog učenja u uvjetima oskudnih ili neoznačenih podataka. Najpoučnija je u tom pogledu rana studija na stvarnoj mreži najveće nizozemske vodovodne tvrtke, s 2300 km cjevovoda i više od 200.000 kućanstava. Od tri ispitana pristupa — nadzirane regresije potpornih vektora nad senzorskim tokovima, nenadziranog klasteriranja i praćenja skrivenih varijabli ortogonalnom transformacijom — nijedan nije uvjerljivo nadmašio jednostavne referentne modele srednje vrijednosti i medijana, klasteriranje nije razdvojilo opažanja u smislene klase, a algoritam skrivenih varijabli — koji je normalno stanje šest zona uspješno sažimao u svega dvije skrivene varijable s 99 % energije signala i anomalije prijavljivao pojavom treće — tražio je mnogo

ugađanja uz brojne propuštene događaje (Vries i sur., 2016). Nadzirani je pristup pritom bio postavljen uzorno — 26 tjedana podataka bez poznatih anomalija za učenje, 27 tjedana za test, dinamički pojas tolerancije od tri standardne devijacije oko predikcije i mjera „iznenađenja“ za rangiranje težine događaja — stoga neuspjeh razlikovanja od trivijalnih modela nije posljedica nemarne izvedbe, nego svojstava podataka (Vries i sur., 2016). Studija je izdvojila dva sustavna uzroka. Mali broj poznatih, zabilježenih anomalija ozbiljno ograničava svako nadzirano učenje, a anomalna mjerenja koja neopaženo uđu u skup za učenje generiraju lažne detekcije kroz cijelo razdoblje primjene (Vries i sur., 2016) — upozorenja o kvaliteti i čistoći podataka koja vrijede za svaki mali terenski skup, uključujući onaj ove disertacije.

Kad označene anomalije ne postoje, primjenjuju se jednoklasni pristupi. Na skupu od 150.546 dnevnih zapisa o količini vode iz 204 izvora kineskog Ministarstva vodnih resursa jednoklasna metoda potpornih vektora rangirala je zapise po mjeri abnormalnosti, a analiza u jednodimenzionalnoj, trodnevnoj i tjednoj varijanti potvrdila je ekspertno pravilo da su sumnjivi unosi jednaki nuli ili višestruko veći od medijana izvora, uz izdvajanje monotono rastućih i padajućih nizova kao zasebnog tipa anomalije; heterogenost skala među izvorima — sa srednjim vrijednostima koje se razlikuju i pet redova veličine — riješena je normalizacijom po medijanu svakog izvora (Fang i sur., 2019). Evaluacija je, međutim, ostala deskriptivna jer referentne oznake anomalija ne postoje — ograničenje zajedničko svim nenadziranim pristupima (Fang i sur., 2019). U kontekstu kiber-fizičke sigurnosti vodoopskrbe, na laboratorijskom prototipu s dva spremnika pokazano je da se anomalije — uključujući namjerno lažiranje senzorskih očitavanja radi izazivanja prelijevanja — mogu prepoznavati iz korelacija skupine senzora umjesto pojedinačnih očitavanja. Anomalija se očituje kao nesuglasje očitavanja razine i tlaka, a klasifikator k-najbližih susjeda postigao je točnost od 83 do 87 %, znatno više od naivnih Bayesovih varijanti, čije statistike značajki u promjenjivim uvjetima ne vrijede (Meleshko i sur., 2020). Validacija isključivo na prototipu, bez stvarnog sustava, smješta taj rad među ilustracije koncepta, a ne dokazuje primjenjivosti — razlika koju je pri vrednovanju ove literature nužno dosljedno provoditi. U nadzoru kvalitete vode reprezentativan je sustav ranog upozorenja na bakterijski rizik razvijen na 4382 uzorka s 280 lokacija mreže južnokineskog megagrađa. Regresija potpornih vektora predviđa koncentraciju ukupnog klora kao surogatnu varijablu dvojnog rizika bakterija i dezinfekcijskih nusprodukata, s koeficijentom determinacije oko 0,68 na treningu i 0,64 na validaciji — usporedivo s klasičnim modelima raspada dezinficijensa, ali uz veću fleksibilnost — dok je analiza robusnosti s 500 ponavljanja pokazala da realistične mjerne pogreške senzora bitno ne degradiraju predikciju

(Lu i sur., 2023). Rizik se regulira dvama pragovima surogatne varijable — donjom granicom klora ispod koje raste bakterijski rizik i gornjom iznad koje raste rizik nusprodukata — pri čemu je analiza pokazala da je regulatorni cilj potpune odsutnosti bakterija prestrog jer bi tražena koncentracija klora premašila gornju granicu (Lu i sur., 2023). Prijenos modela među postrojenjima provjeren je sustavno. U sedam eksperimenata model je treniran na podacima šest od sedam vodoopskrbnih postrojenja i validiran na sedmom — protokol strukturno istovjetan validaciji izostavljanjem grupe koja se u ovoj disertaciji primjenjuje na razini mjernih zona i država (pogl. 4.3.1, pogl. 5.3) (Lu i sur., 2023). Koncept surogatnog praćenja — lako mjerljiva veličina kao zamjena za skupu ili terenski nedostupnu — strukturno je istovjetan problemu ove disertacije, u kojem rutinski dostupni podaci o zoni zamjenjuju skupo terensko mjerenje eksponenta.

Krovni pregled primjena strojnog učenja u procjeni kvalitete vode te vodoopskrbi i upravljanju, s taksonomijom algoritama od neuronskih i stablastih ansambala do neizrazitih sustava, potvrđuje opće obrasce uočene i u prethodnim potpoglavljima. Nema algoritma savršenog za sve zadaće, najčešće se primjenjuju neuro-neizraziti sustavi, višeslojne mreže, slučajne šume i metoda potpornih vektora, hibridni pristupi u pravilu nadmašuju pojedinačne, javno dostupni skupovi podataka vrlo su rijetki, a duboko učenje pada u prenaučenosť čim podataka nema dovoljno (Oğuz i Ertuğrul, 2023). Autori pregled potkrepljuju i vlastitim eksperimentima na dvama javnim skupovima, u kojima je jednostavna mreža ekstremnog učenja nadmašila objavljene referentne rezultate — uključujući pobjednički model natjecanja u detekciji anomalija kvalitete vode — što ponovno pokazuje da pažljivo primijenjen jednostavniji model može nadmašiti složeniji (Oğuz i Ertuğrul, 2023). Isti pregled izrijeком ponavlja i validacijsko pravilo relevantno za ovu disertaciju — kod vremenski i strukturno povezanih podataka unakrsna validacija ne smije nasumično uzorkovati opažanja (Oğuz i Ertuğrul, 2023). Sažeto, literatura o anomalijama i kvaliteti vode pokazuje da uspjeh strojnog učenja u vodoopskrbi ne ovisi ponajprije o složenosti algoritma, nego o kvaliteti, količini i strukturi podataka te o disciplini validacije. Tamo gdje su podaci oskudni ili neoznačeni, jednostavni i interpretabilni modeli s pažljivom pripremom podataka dosljedno se pokazuju ravnopravnima ili boljima od složenih (Vries i sur., 2016; Oğuz i Ertuğrul, 2023) — nalaz koji izravno oblikuje metodološke izbore u pogl. 4, gdje se za mali terenski uzorak sustavno uspoređuju modeli od linearne regresije do gradijentnog pojačavanja umjesto apriornog posezanja za najsloženijim.

3.4. Istraživačka praznina

Pregled proveden u ovom poglavlju omogućuje preciznu formulaciju istraživačke praznine koju disertacija popunjava. Sintetiziraju li se tri prikazana pregleda literature, slika je sljedeća.

Prvo, terenska istraživanja (pogl. 3.1) dokazuju da je eksponent $N1$ mjerljiva, ali skupo mjerljiva veličina. Svaka od prikazanih metoda — višednevni test tlačnih koraka (Dundović i Tadić, 2022), cikliranje tlaka unutar jedne noći (Jenks i sur., 2023), izolacija dionica mobilnom opremom (Niebuhr i sur., 2019) — zahtijeva fizičku intervenciju u mrežu, mjernu opremu, manipulacije tlakom s mogućim posljedicama za potrošače i pouzdanu procjenu noćne potrošnje, a rezultati su osjetljivi na broj stanja tlaka (Marzola i sur., 2021), integritet granica zone (Deyi i sur., 2014; Jenks i sur., 2023) i veličinu tlačnog koraka (Schwaller i van Zyl, 2015). Posljedica je da izmjerene zonske vrijednosti eksponenta postoje tek za nekoliko desetaka dokumentiranih zona po studiji, u svega nekoliko zemalja. Najveće pojedinačne zbirke broje 75 zona iz Ujedinjenog Kraljevstva, petnaest s Cipra i sedamnaest iz Malezije, dvanaest zona upravljanja tlakom u Južnoafričkoj Republici i dvadesetak u Kanadi, uz pojedinačne zone u Italiji, Turskoj, Gani i Hrvatskoj (Schwaller i van Zyl, 2015; Deyi i sur., 2014; Jenks i sur., 2023) — nasuprot stotinama tisuća mjernih zona u svjetskim vodoopskrbnim sustavima za koje eksponent nije poznat. Upravo raspršenost tih mjerenja po izvorima, državama i metodologijama objašnjava zašto objedinjena, kvalitetno kontrolirana baza terenskih određivanja — kakva se gradi u pogl. 4.2 — do sada nije postojala.

Drugo, modelska istraživanja i primjene (pogl. 3.2) pokazuju da je cijena nepoznavanja eksponenta kvantificirana i značajna — pogreške procjene istjecanja 15 do 20 % na razini sustava i do 60 % na razini čvora pri ekstrapolaciji pogrešno kalibriranog odnosa (Kabaasha i sur., 2016; Boian i sur., 2019), promašaj terenskog učinka upravljanja tlakom od 1,70 l/s pri pretpostavljenom eksponentu (Özdemir i sur., 2021), relativna pogreška procjene istjecanja do 4 % po koraku eksponenta od 0,5 (Amoatey i sur., 2022) — a da praksa unatoč tome eksponent rutinski preuzima iz literaturnih pravila ili ga prepušta optimizaciji bez neovisne provjere (Samir i sur., 2017; Nanda i sur., 2023; Razavi i sur., 2023; Leinaes i sur., 2024). Pravila iz kojih se te vrijednosti preuzimaju pritom su, prema najnovijem stohastičkom modeliranju s empirijskim podlogama, zastarjela i sustavno netočna (Beygi i van Zyl, 2024). Fizikalne determinante zonskog eksponenta — srednji tlak, stanje sustava, materijalni sastav, raspon visina — poznate su i kvantificirane (Schwaller i van Zyl, 2015; Beygi i van Zyl, 2024), no nijedno istraživanje ne pretvara ih u prediktivni postupak kojim bi se iz tih, operaterima rutinski dostupnih, veličina procijenio eksponent konkretne zone.

Treće, literatura strojnog učenja u vodoopskrbnim sustavima (pogl. 3.3) zrela je u susjednim zadaćama — detekciji i lokalizaciji curenja, predviđanju kvarova, prognozi potražnje, otkrivanju anomalija — s razrađenim metodološkim aparatom za upravo one uvjete koji karakteriziraju i problem ove disertacije: male i neuravnotežene skupove, strukturirane podatke koji zabranjuju naivnu validaciju te zahtjev interpretabilnosti (Robles-Velasco i sur., 2021a; Canivete i sur., 2026). Dodiri strojnog učenja i FAVAD okvira, međutim, postoje samo u jednom smjeru. Hidraulički modeli s pretpostavljenim eksponentom služe kao generatori podataka za učenje detekcijskih modela (Taghlabi i sur., 2020; Wang i sur., 2023), a optimizacijski algoritmi kalibriraju eksponent kao slobodni parametar pojedinačne mreže (Sebbagh i sur., 2018; Nasirian i Ahrari, 2022) — postupak koji ne funkcionira izvan mreže na kojoj je proveden i ne daje nikakvu vezu eksponenta sa značajkama sustava.

Dvije poprečne niti pregleda dodatno pokazuju zašto praznina ne može biti popunjena čisto teorijskim putem. Prva je nit terenskih vrijednosti iznad teorijske granice elastičnog otvora od 1,5. Zabilježene su vrijednosti do 3,33 uz fizikalno nemoguće negativne sustavske površine (Deyi i sur., 2014), do 3,2 u zonama s malim istjecanjem uz veliku varijabilnost (Jenks i sur., 2023), vlastita vrijednost 1,76 za čistu PVC mrežu (Dundović i Tadić, 2022) te simulirani rub PVC raspona od 1,82 pri visokim razinama gubitaka (Beygi i van Zyl, 2024); teorija za takve vrijednosti nudi više neisključivih objašnjenja — utjecajna curenja na nadmorskim visinama bitno različitima od prosječnoga zonskog tlaka (Schwaller i sur., 2015; Beygi i van Zyl, 2024), asimptotsko ponašanje veze eksponenta i broja curenja za otvore koji se pri niskim tlakovima zatvaraju (van Zyl i sur., 2017) i mali udjeli otvora s vrlo visokim brojem curenja (Schwaller i van Zyl, 2015) — ali ih ne može unaprijed razlučiti bez podataka o konkretnoj zoni. Druga je nit sustavni raskorak laboratorija i terena jer laboratorijski eksponenti ovise o rubnim uvjetima koji se na terenu ne reproduciraju — neukopani HDPE bez aksijalnog opterećenja daje trendove suprotne ukopanima (Latchoomun i sur., 2015), tlo mijenja koeficijent, ali i ukupnu razinu istjecanja (Latifi i sur., 2018), a strojno izrezani laboratorijski prorezi podcjenjuju eksponente ekvivalentnih terenskih pukotina (Van Zyl i Malde, 2017). Obje niti vode istom zaključku. Pouzdana zonska vrijednost eksponenta mora biti empirijski utemeljena na terenskim mjerenjima stvarnih zona — upravo onakvima kakva čine bazu podataka ove disertacije.

Iz navedenoga slijedi formulacija praznine: u pregledanom korpusu od 94 izvora — koji obuhvaća temeljnu FAVAD literaturu, terenske i laboratorijske studije eksponenta, primjene u upravljanju tlakom i sve tri grane strojnog učenja u vodoopskrbi — nijedno istraživanje ne primjenjuje strojno učenje za određivanje eksponenta curenja N1 iz značajki vodoopskrbnog

sustava. Ne postoji, drugim riječima, objavljeni model koji bi iz podataka kakve vodoopskrbni operater već posjeduje — duljine i materijalnog sastava mreže, broja priključaka, tlačnih prilika, pokazatelja razine gubitaka — procijenio zonsku vrijednost eksponenta s poznatom i neovisno provjerenom točnošću, niti baza terenskih mjerenja na kojoj bi se takav model mogao razviti i validirati. Jednako tako, nijedan od pregledanih izvora ne koristi tlakom normaliziran pokazatelj gustoće stvarnih gubitaka (gubitke po kilometru mreže i metru tlaka) kao ulaznu veličinu u procjeni eksponenta — ni pod kojim imenom. Upravo tu prazninu disertacija popunjava: prikupljanjem i objedinjavanjem međunarodne baze terenskih mjerenja eksponenta (pogl. 4.2), razvojem regresijskog modela za njegovo predviđanje uz validacijski protokol primjeren strukturi podataka (pogl. 4.3, pogl. 5) te kvantifikacijom granica njegove primjenjivosti (pogl. 5.3). Time se ujedno spajaju dva do sada odvojena toka literature: fizikalno utemeljena FAVAD karakterizacija zona i podatkovno vođeno modeliranje strojnim učenjem — pri čemu prvi tok modelu daje kandidatske varijable s fizikalnim značenjem i okvire vjerodostojnosti predikcija, a drugi metodološki aparat za učenje, validaciju i kvantifikaciju nesigurnosti iz ograničenoga terenskog uzorka; sporedni, ali samostalan doprinos istog spoja čini i analiza utjecaja protokola tlačnoga koraka na izmjerene vrijednosti (pogl. 5.4.3), izravno motivirana metodološkim nalazima ovog pregleda o ovisnosti eksponenta o veličini tlačnog koraka.

4. Metodologija

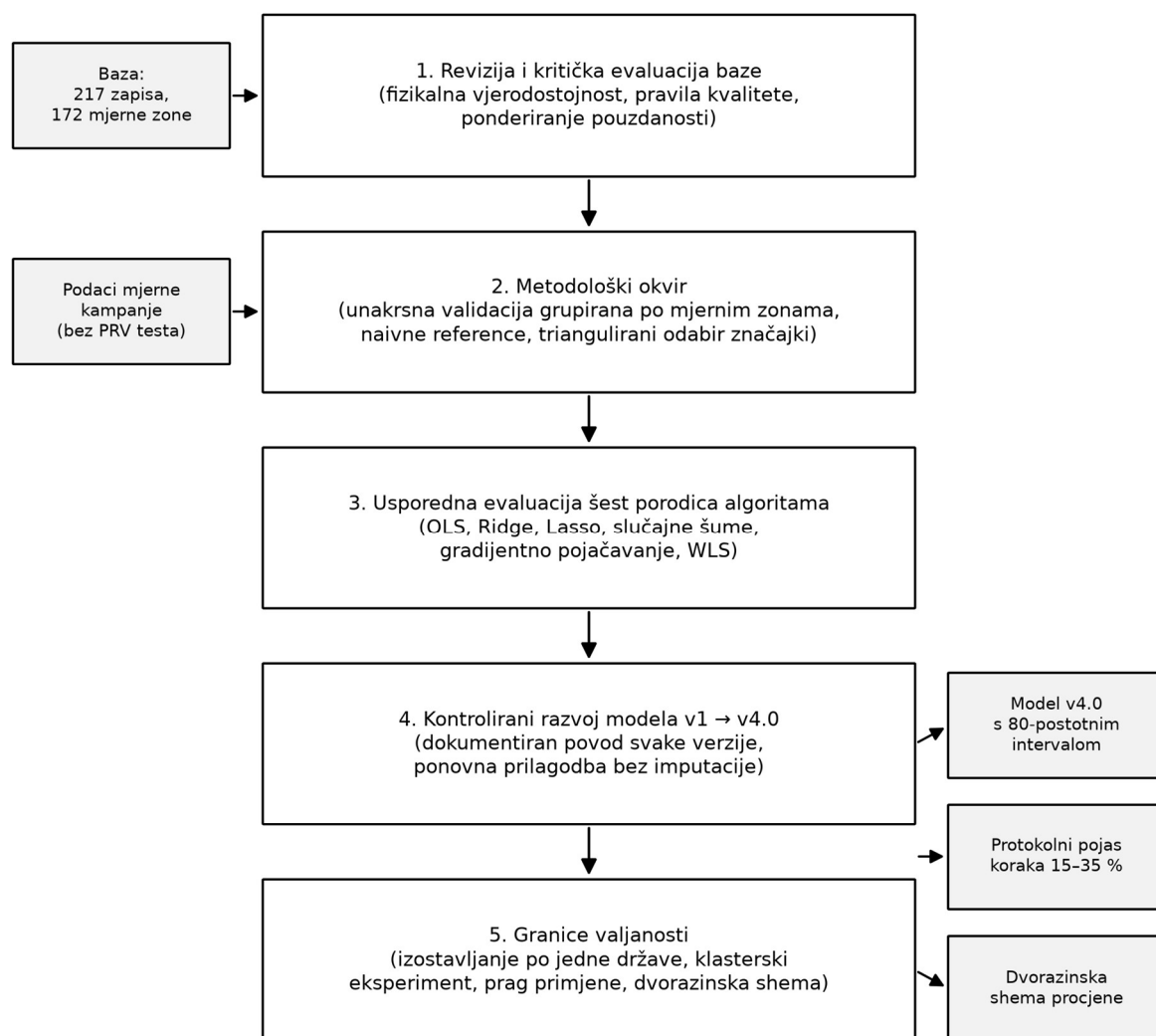
4.1. Pregled istraživačkog postupka

Cilj istraživanja, izveden iz hipoteza u pogl. 1.3, jest analitičko određivanje eksponenta curenja $N1$ mjerne zone iz podataka koje vodoopskrbni operater već posjeduje — bez provedbe terenskog testa tlačnih koraka. Formalno, riječ je o nadziranoj regresiji na malim, grupiranim tabličnim podacima — iz označenih primjera, u kojima je ciljna vrijednost $N1$ izmjerena terenskim testom tlačnih koraka, uči se funkcija koja vektor opisnika zone preslikava u kontinuiranu vrijednost eksponenta. Ključna je asimetrija između podataka za učenje i podataka za primjenu. Model se trenira na zonama u kojima je proveden puni test tlačnih koraka, ali kao ulaze smije koristiti isključivo veličine dostupne iz standardne mjerne kampanje — postavljanja zapisivača protoka i tlaka na ulaz zone i analize minimalnoga noćnog protoka pri postojećem radnom tlaku. Time se model, jednom razvijen, može primijeniti na bilo koju zonu nakon rutinske kampanje, bez ugradnje ventila za redukciju tlaka.

Dizajn cijelog istraživanja počiva na razlici između dviju vrlo različitih terenskih aktivnosti, čiju je cijenu i dostupnost dokumentirao pregled u pogl. 3.1. Mjerna kampanja postavlja zapisivače protoka i tlaka na ulaz mjerne zone i provodi analizu stvarnih gubitaka pri trenutačnom radnom tlaku; rutinska je, pristupačna i uvijek će biti dostupna. Ona daje osnovno stanje gubitaka zone: noćne gubitke L_0 , prosječni zonski tlak P_0 , gubitke vode kao udio ulaznog volumena, ILI i normalizirane statistike gubitaka. Puni test tlačnih koraka dodatno zahtijeva ugradnju redukcijskog ventila kako bi se tlak noću stupnjevito spuštao uz bilježenje odziva gubitaka — a upravo taj odziv izravno mjeri $N1$. Testovi tlačnih koraka dugotrajni su i skupi te za veliku većinu zona nikada neće biti provedeni. Zadaća modela stoga je precizno definirana: predvidjeti eksponent odziva na tlak iz osnovnog stanja pri tlaku — naučiti, iz zona u kojima postoje oba mjerenja, kako se odziv preslikava iz stanja, a zatim tu vezu primijeniti na zone u kojima postoji samo stanje.

Istraživački postupak, shematski prikazan na slici 4.1, teče u pet faza. Prva je faza revizija i kritička evaluacija međunarodne baze terenskih testova tlačnih koraka (pogl. 4.2): 217 zapisa iz 172 mjerne zone u trima državama na trima kontinentima, s kontrolom formata, strukture nedostajućih podataka i fizikalne vjerodostojnosti izmjerenih vrijednosti eksponenta — faza koja se, kako će se pokazati, ne iscrpljuje u čišćenju nego proizvodi i samostalne spoznaje o uvjetima pouzdanoga terenskog mjerenja. Druga je faza uspostava metodološkog okvira

modeliranja (pogl. 4.3), kojim se unaprijed — prije ijednog treniranja modela — fiksiraju pravila: protokol validacije grupirane po mjernim zonama, popis dopuštenih i zabranjenih značajki, naivne referentne vrijednosti koje svaki model mora nadmašiti, postupak odabira značajki, shema ponderiranja pouzdanosti mjerenja i primarna mjera uspješnosti. Fiksiranje okvira prije modeliranja nije formalnost jer svaka od tih odluka, donesena naknadno i s uvidom u rezultate, mogla bi biti — svjesno ili nesvjesno — odabrana tako da rezultate uljepša, čime bi izgubila dokaznu vrijednost. Treća je faza usporedna evaluacija šest obitelji algoritama strojnog učenja pod tim jedinstvenim protokolom (pogl. 4.4). Četvrta je faza razvoj modela kroz kontrolirani slijed verzija, u kojem se između verzija mijenja samo jedna pretpostavka — o dostupnosti podataka u primjeni ili o postupanju s utvrđenom pristranošću — dok trening podaci, filter vjerodostojnosti, validacijski protokol i ograničenja izlaza ostaju fiksni; ta je faza, zajedno s rezultatima, predmet pogl. 5. Peta je faza kvantifikacija granica valjanosti razvijenog modela trima komplementarnim eksperimentima — validacijom izostavljanjem po jedne države, klusterskim eksperimentom provedenim bez uporabe državnih oznaka i testom diskretnog razdvajanja režima gubitaka (pogl. 5.3) — kojima se utvrđuje gdje se modelu smije vjerovati, a gdje njegova primjena prelazi u ekstrapolaciju.



Slika 4.1. Dijagram tijeka istraživačkog postupka

Tri svojstva raspoloživih podataka diktirala su svaki metodološki izbor u nastavku. Prvo, uzorak je malen prema standardima strojnog učenja — 188 upotrebljivih zapisa iz 143 neovisne mjerne zone nakon filtra vjerodostojnosti — što istraživanje smješta u režim kojim dominira kompromis pristranosti i varijance. Fleksibilan model može zapamtiti trening podatke, ali će generalizirati lošije od ograničenoga, stoga jednostavnost modela nije stilska preferencija nego statistička nužnost (Hastie i sur., 2009). Drugo, podaci su grupirani — više zapisa tlačnih koraka može dijeliti istu mjernu zonu, a time i sve njezine mrežne značajke — što krši pretpostavku neovisnosti na kojoj počiva naivna validacija i zahtijeva blokiranje validacijskih podjela po zonama (Roberts i sur., 2017; Kaufman i sur., 2012). Treće, ciljne su vrijednosti šumovite i heteroskedastične. Mjerna pogreška izmjerenog eksponenta drastično se razlikuje među zapisima, ovisno o snazi signala gubitaka i dubini tlačnog koraka, a dio te pogreške nije slučajan

nego sustavno usmjeren — što traži ponderiranje pouzdanosti umjesto jednakoga tretmana svih zapisa i pažljiv izbor mjere uspješnosti.

Metodologija je pritom zamišljena tako da vrijedi više od modela koji iz nje izlazi. Tri samostalna znanstvena doprinosa istraživanja — protokolarni pojas relativnoga tlačnog koraka od 15 do 35 %, kontrolirana dijagnoza zona sa 100 % plastičnih cijevi i spoznaja o materijalu kao uvjetnoj gornjoj granici eksponenta (pogl. 5.4) — nisu proizvod samog prediktivnog modela, nego upravo metodološkog aparata kontrole kvalitete i dijagnostike opisanog u ovom poglavlju. Probir pravila kvalitete iznjedrio je kriterije signala, analiza reziduala po dubini koraka protokolarni pojas, a sustavno praćenje koeficijenta pogrešnog predznaka (uz udio fleksibilnih cijevi) dijagnozu uloge materijala. To je i razlog zašto se metodološka poglavlja iznose ovako detaljno — aparat je prenosiv na srodne probleme analitičkog određivanja pogonskih parametara vodoopskrbnih sustava neovisno o konkretnom modelu.

Metodološki okvir počiva na načelu da se svaka bitna odluka dokumentira s obrazloženjem i dokazom. Glavno izvješće istraživanja sadrži registar dvadeset pet takvih odluka — od parsiranja europskog formata podataka do dvorazinske sheme izlaza — a ovo poglavlje razrađuje one koje čine metodološku okosnicu, dok su odluke vezane uz rezultate i njihovu interpretaciju prikazane u pogl. 5. Za programsku implementaciju cjelokupnog lanca analize (pogl. 6.3) primijenjena je disciplina verifikacije u kojoj se automatizirani testovi i provjere nad podacima tretiraju komplementarno. Testovi dokazuju prisutnost pogrešaka na konkretnim primjerima, a sustavne provjere ograničavaju prostor stanja u kojem bi pogreška mogla ostati neotkrivena — u duhu spoznaje iz literature o verifikaciji softvera da testiranje i formalna provjera nisu suprotstavljeni nego komplementarni postupci (Beckman i sur., 2008).

Sama programska implementacija lanca analize razdvojena je u dva modula s namjerno različitim ulogama i profilima ovisnosti. Istraživački radni tok obuhvaća cijeli postupak opisan u ovom poglavlju — parsira izvornu CSV datoteku u europskom formatu (pogl. 4.2.1), primjenjuje filter vjerodostojnosti (pogl. 4.2.3), provodi unakrsnu validaciju grupiranu po mjernim zonama preko svih kandidatskih modela (pogl. 4.3.1 i 4.4), računa tri mjere važnosti značajki i putanju postupnog uključivanja značajki (pogl. 4.3.4) te zapisuje svaku tablicu rezultata na koju se pozivaju pogl. 4 i 5. Time je svaka iskazana brojka obnovljiva jednim pokretanjem izrađenog računalnog programa nad izvornom bazom, bez ručnih međukoraka u kojima bi se pogreška mogla neopaženo uvući — revizijski trag iz pogl. 4.2.1 nije statična arhiva, nego izlaz postupka koji svatko može ponoviti. Radni tok izrade računalnog programa koristi Python programski jezik te zahtijeva znanstvene programske biblioteke „pandas” i

„scikit-learn“, no one su potrebne samo za reprodukciju istraživanja, ne i za primjenu modela. Za primjenu služi zasebni izrađeni Python modul „predict_n1.py“: implementacija konačnog modela bez ijedne vanjske ovisnosti, oslonjena isključivo na standardnu biblioteku programskog jezika Python, prikladna za skupno ocjenjivanje zona ili ugradnju u postojeće programske alate vodovodnih sustava. To razdvajanje je bitno metodološko načelo jer reprodukcija istraživanja i operativna primjena modela čine dva različita zahtjeva s različitim korisnicima, zbog čega alat za primjenu ne smije naslijediti ovisnosti istraživačkog okruženja. Oba su modula razvijena pod opisanom verifikacijskom disciplinom — automatizirani testovi dokazuju ispravnost na konkretnim primjerima, a sustavne provjere nad podacima sužavaju prostor stanja u kojem bi pogreška mogla ostati neotkrivena — i oba su, zajedno s proračunskim kalkulatorom iz pogl. 6.3, registrirana među dodacima disertacije. U skladu s konvencijom iz uvodnih napomena, programski kod, nazivi datoteka i stupaca koriste decimalnu točku, kako su izvorno izrađeni, dok se u tekstu disertacije dosljedno rabi decimalni zarez.

Struktura postupka izravno prati hipoteze iz pogl. 1.3 i pristup njihovoj provjeri iz pogl. 1.4.2. Provjera prve hipoteze — da je moguće definirati i optimizirati parametre vodoopskrbne mreže potrebne za analitičko definiranje eksponenta — počiva na fazama revizije podataka i odabira značajki, gdje se kandidatski parametri moraju sustavno vrednovati, a preživjeti smiju samo oni čija informacija o eksponentu opstaje pod strogom validacijom. Provjera druge hipoteze — analitičkog određivanja eksponenta s visokom razinom preciznosti — počiva na validacijskom protokolu i mjerama uspješnosti. „Preciznost“ mora biti definirana unaprijed, mjerena izvan preklopa i uspoređena s referentnim vrijednostima i s gornjom granicom mjernog šuma samih terenskih testova. Provjera treće hipoteze — izrade novih matematičkih modela temeljenih na strojnom učenju — počiva na usporedbi algoritamskih obitelji i kontroliranom razvoju verzija. Formalna provjera svih triju hipoteza naspram dokumentiranih rezultata provedena je u pogl. 6.1.

U cjelini, postupak je zamišljen tako da svaki iskazani rezultat odražava generalizacijsku sposobnost modela na zonama koje model nije vidio, a ne prilagodbu podacima na kojima je razvijen. To načelo — operacionalizirano validacijom grupiranom po zonama, dvjema naivnim referencama i trianguliranim odabirom značajki — provlači se kroz sva potpoglavlja koja slijede. Pogl. 4.2 opisuje podatke i njihovu kontrolu kvalitete, pogl. 4.3 šest komponenti metodološkog okvira, a pogl. 4.4 algoritamske obitelji i protokol njihove usporedbe.

4.2. Prikupljanje i opis podataka

4.2.1. Izvori terenskih podataka

Empirijsku osnovu istraživanja čini međunarodna baza terenskih testova tlačnih koraka prikupljena iz mjernih kampanja u Ekvadoru, Južnoafričkoj Republici i Kanadi — 217 zapisa iz 172 mjerne zone, s razdiobom po državama prikazanom u tablici 4.1: Ekvador 95, Južnoafrička Republika 104 i Kanada 18 zapisa. Svaki zapis predstavlja jedno opažanje tlačnog koraka za mjernu zonu: par stanja gubitaka i tlaka prije i poslije redukcije, iz kojega je izračunan izmjereni eksponent $N1$, zajedno s karakteristikama mreže i pogonskog stanja zone. Većina zona nosi jedan zbirni zapis cijelog testa, dok jedanaest zona nosi pojedinačne zapise uzastopnih koraka — okolnost koja, kako će se pokazati u pogl. 4.3.1, ima izravne posljedice za validacijski protokol, jer zapisi iste zone dijele sve mrežne značajke i ne smiju se tretirati kao neovisna opažanja.

Jedanaest zona s pojedinačnim zapisima uzastopnih koraka ima drugu analitičku vrijednost. Unutar iste zone materijal, mreža i stanje sustava konstantni su, stoga razlike izmjerenog eksponenta među koracima izoliraju učinak samog protokola testa — upravo ta struktura omogućuje analizu utjecaja dubine tlačnog koraka u pogl. 5.4.3. Sastavljanje ovakve baze samo je po sebi odgovor na jednu od praznina utvrđenih pregledom literature (pogl. 3.4) — objavljena terenska određivanja eksponenta raspršena su po studijama s desetak do sedamdesetak zona, provedenima različitim metodologijama i bez zajedničkog formata, zbog čega objedinjena, kvalitetno kontrolirana međunarodna baza do sada nije postojala. Ujedinjenje triju nacionalnih kampanja u zajedničku strukturu — s jednoznačno definiranim varijablama, dokumentiranim podrijetlom svake vrijednosti i eksplicitnim oznakama vjerodostojnosti — preduvjet je ne samo ovog istraživanja nego i svake buduće akumulacije terenskih mjerenja prema modelu sljedeće generacije (pogl. 7.2).

Tablica 4.1. Zapisi terenskih testova tlačnih koraka po državama

Država	Broj zapisa	Vjerodostojni zapisi ($0,2 \leq N1 \leq 2,6$)
Ekvador	95	92
Južnoafrička Republika	104	81
Kanada	18	15
Ukupno	217	188

Napomena: 217 zapisa potječe iz ukupno 172 mjerne zone (većina zona ima jedan zbirni zapis, dok 11 zona nosi pojedinačne zapise koraka).

Izvor: baza podataka istraživanja; master izvješće ($N1_master_report_HR$), Odjeljci 3 i 13 te Dio V.

Tri podskupa po državama radikalno se razlikuju po hidrauličkom režimu, stanju infrastrukture i mjernoj praksi — heterogenost koja je istodobno snaga i ograničenje baze. Ekvadorski

podskup potječe iz sustava s ekstremno visokim gubicima. Medijan ILI pokazatelja iznosi 58, s maksimumom od 207, uz umjeren izmjereni eksponent (medijan 0,80) i niske radne tlakove (medijan 27 m u plastičnim zonama) — kampanje su ondje dale snažan signal gubitaka, te je podskup potpun u svim poljima i, kako će pokazati validacija u pogl. 5, mjeriteljski najpouzdaniji. Južnoafrički podskup obuhvaća gotovo isključivo plastične mreže — medijan udjela fleksibilnih cijevi iznosi 100 %, a medijan tlaka u plastičnim zonama 76 m — ali s najšumovitijim mjerenjima eksponenta u cijeloj bazi, od -0,99 do 8,11, dijelom zbog niskih razina gubitaka (slab signal), a dijelom zbog prakse vrlo dubokih tlačnih koraka. Kanadski podskup, najmanji, potječe iz uređenih mreža s niskim gubicima, ali mu strukturno nedostaju podaci o protocima i raščlamba materijala cijevi. Ta isprepletenost države podrijetla, stanja infrastrukture i mjerne prakse ograničava koliko bilo koji model može pripisati fizici, a koliko podrijetlu podataka — pitanje koje se sustavno obrađuje u pogl. 5.3 validacijom izostavljanjem po jedne države i klasterskim eksperimentom provedenim bez uporabe državnih oznaka, s nalazom koji vrijedi najaviti jer opravdava ovakvu konstrukciju baze. Države se u prostoru hidrauličkih značajki razdvajaju gotovo savršeno i bez državnih oznaka, što znači da su „države" u ovoj bazi zapravo hidraulički režimi, a heterogenost baze, pokrivenost tih režima.

U svjetlu pregleda iz pogl. 3.1 ovako sastavljena baza po opsegu nadilazi sve pojedinačne objavljene zbirke terenskih određivanja eksponenta — najveća dokumentirana studija obuhvaća 75 zona (Schwaller i van Zyl, 2015), a tipične kampanje desetak do dvadesetak zona. Njezina posebna vrijednost nije, međutim, samo u broju zapisa nego u širini radnog raspona. Vrijednosti ILI pokazatelja protežu se od 0,25 do 207, udio fleksibilnih cijevi od 0 do 100 %, prosječni zonski tlakovi približno od 10 do 123 m, a gubici vode od manje od 20 % do skoro 100 % ulaznog volumena. Upravo ta širina omogućuje da model nauči ponašanje eksponenta preko cijelog spektra stanja sustava — od uređenih mreža do sustava kojima gubici dominiraju — umjesto unutar uskoga, lokalnog režima jedne države ili jednog operatera. Širina, međutim, nije ravnomjerna, i to je ograničenje koje se u interpretaciji svih rezultata mora držati na umu. Medijan gubitaka vode u bazi iznosi približno 68 % ulaznog volumena, stoga su trening mreže pretežno mreže velikih gubitaka — predikcije za dobro održavane sustave s gubicima ispod približno 15 % oslanjaju se na rijetko zastupljen, slabo pokriveni donji rub domene i valja ih tumačiti kvalitativno, kao „eksponent je visok", prije nego kao preciznu vrijednost (pogl. 5.3).

Svaki zapis nosi i provenijencijske oznake — anonimiziranu oznaku zone, lokaciju, oznaku koraka (zbirni zapis ili pojedinačni korak) — koje omogućuju sljedivost svake analize do izvora te ispravno grupiranje pri validaciji. Podaci su zaprimljeni kao CSV datoteka u europskom

formatu — separator točka-zarez, decimalni zarez, UTF-8 s oznakom redoslijeda bajtova — što je utvrđeno pregledom sirovih bajtova datoteke; naivno parsiranje pod pretpostavkom anglosaksonskog formata tiho bi iskrivilo svaki broj u bazi, zbog čega je ispravno parsiranje formalizirano kao prva metodološka odluka istraživanja. Baza je tijekom istraživanja dopunjena drugom verzijom. Dostavljene su kanadske vrijednosti gubitaka vode, strukturno odsutne iz izvorne datoteke, oznake zona su anonimizirane, a gubici vode, pohranjeni kao udjeli, pretvoreni su pri učitavanju u postotke. Ta je dopuna, kako će se pokazati u pogl. 4.2.3 i pogl. 5.1, imala metodološki dalekosežnu posljedicu — omogućila je politiku nulte imputacije za konačni model i razotkrila jedan raniji koeficijent kao imputacijski artefakt.

Radi provjerljivosti, uz bazu se čuva i potpuni revizijski trag analize. Očišćena baza s oznakama vjerodostojnosti, tablice predikcija izvan preklopa na razini pojedinačnog zapisa (sa zonom, korakom, ulazima, težinom pouzdanosti te izmjerenim i predviđenim eksponentom), sažete validacijske statistike i rezultati svih kontrolnih eksperimenata pohranjeni su kao zasebne datoteke rezultata, a njihov je popis registriran među dodacima disertacije. Time je svaka brojka iskazana u pogl. 4 i 5 sljedeća do zapisa iz kojih je izračunana — standard izvještavanja koji je pregled literature (pogl. 3.3) identificirao kao rijedak, a nužan.

4.2.2. Opis baze podataka

Svaki zapis baze sadrži tri skupine varijabli, sažete u tablici 4.2. Prvu skupinu čine karakteristike mreže iz katastra imovine: duljina glavnih cjevovoda, duljina priključnih cjevovoda, broj priključaka, gustoća priključaka te udjeli cijevnog materijala, od kojih je za FAVAD okvir ključan udjel fleksibilnih cijevi (zbroy udjela HDPE-a i PVC-a) — jedina FAVAD-kritična varijabla prisutna u svakom zapisu baze; ukupno prostor kandidatskih značajki čini trinaest parametara mreže dostupnih iz kampanje i katastra. Drugu skupinu čini osnovno pogonsko stanje iz mjerne kampanje: noćni gubici L_0 , prosječni zonski tlak P_0 , gubici vode kao postotak ulaznog volumena (WL), ILI te normalizirane statistike gubitaka — gubici po kilometru mreže (Q_{rl}/km), po priključku (Q_{rl}/SC) i specifična gustoća stvarnih gubitaka normalizirana tlakom, s oznakom LD (u bazi podataka i priloženim datotekama: stupac $Q_{lr}/km/P$). U nazivima stupaca izvorne baze zadržan je zatečeni zapis Q_{lr} ; u tekstu rada koristi se Q_{rl} . Bitna je provenijencijska napomena da i ILI u ovoj bazi potječe iz mjernih kampanja, a ne iz godišnjih vodnih bilanci. On je izračunan iz istih noćnih mjerenja gubitaka kao i ostale statistike, stoga pretpostavka „ILI je dostupan uredski, bez terenskog rada“ za ovu bazu ne vrijedi — okolnost koja je izravno oblikovala prijelaz s prve na drugu verziju modela (pogl. 5.1). Potonja veličina, definirana kao

$$LD = L_o / (L_m \cdot P_o) \quad (4.1)$$

gdje je L_m duljina glavnih cjevovoda, gustoća je stvarnih gubitaka po jedinici mreže i tlaka, izražena u l/s/km/m (litre u sekundi po kilometru mreže i metru tlaka) — tlakom normaliziran srodnik ILI-jeve UARL normalizacije, koji će se u pogl. 5 pokazati informacijski najbogatijom pojedinačnom značajkom. Veličina se u ovom radu uvodi kao samostalan pokazatelj s vlastitom oznakom LD (engl. *leakage density*); prema provedenom pregledu literature (pogl. 3) takav tlakom normaliziran pokazatelj gustoće gubitaka dosad nije korišten kao ulazna veličina u modelima procjene eksponenta N1. Treću skupinu čine ishodi samog testa tlačnih koraka: sniženi tlak P_1 , gubici pri sniženom tlaku L_1 , apsolutni i relativni tlačni korak te izmjereni eksponent N1 kao ciljna vrijednost. Uloga te treće skupine strogo je ograničena — ona definira cilj učenja i ponderiranje pouzdanosti, ali je kao skup značajki zabranjena (pogl. 4.3.2). Za reproducibilnost je bitno da su i definicije ulaznih veličina fiksirane trening konvencijama. Gubici vode računaju se na volumnoj osnovi naspram ulaza u sustav, a LD iz noćnih gubitaka u litrama u sekundi, duljine mreže u kilometrima i prosječnoga zonskog tlaka u metrima — svaka primjena modela mora ulaze računati po istim definicijama, jer ista fizikalna veličina u drugoj konvenciji (primjerice gubici po priključku umjesto po kilometru) mijenja koeficijente.

Tablica 4.2. Opis baze podataka — varijable, jedinice i izvor

Varijabla	Oznaka	Jedinica	Izvor podatka
Duljina glavnih cjevovoda	L_m	km	katastar imovine (GIS)
Broj kućnih priključaka	N_c	—	katastar imovine
Gustoća priključaka	N_c/L_m	priključaka/km	katastar imovine (izvedeno)
Duljina priključnih cjevovoda	SC_pipe_length	km	katastar imovine
Udio fleksibilnih (plastičnih) cijevi, HDPE + PVC	pipe_flecible_percentage	%	katastar imovine
Noćni protok stvarnih gubitaka pri osnovnom tlaku	L_o	l/s	mjerna kampanja (analiza minimalnoga noćnog protoka)
Prosječni tlak zone pri osnovnom stanju	P_o	m H ₂ O	mjerna kampanja (zapisivač tlaka na AZP točki)
Gubici vode kao udio ulaza u sustav	WL	%	mjerna kampanja (mjerenje ulaza i naplata)

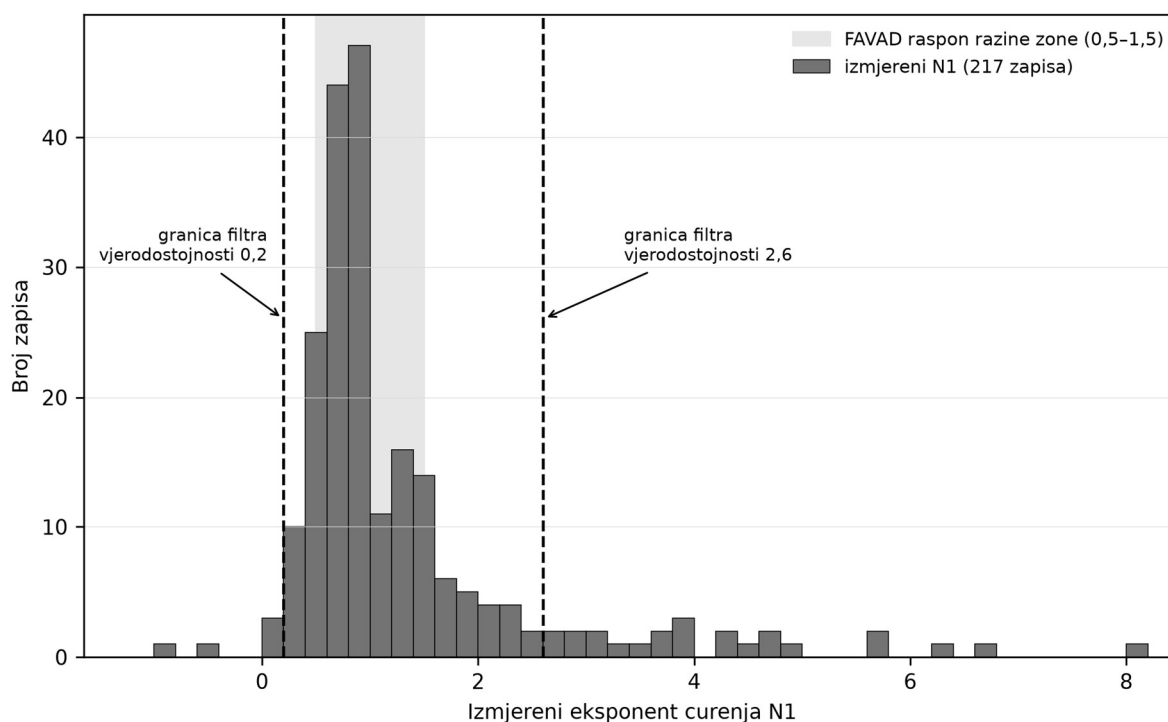
Varijabla	Oznaka	Jedinica	Izvor podatka
Stvarni gubici po kilometru mreže	Qrl/km	l/s/km	izvedeno iz kampanje i katastra
Stvarni gubici po priključku	Qrl/SC	l/s/priključku	izvedeno iz kampanje i katastra
Specifična gustoća stvarnih gubitaka normalizirana tlakom (u tekstu: LD)	Qrl/km/P	l/s/km/m	izvedeno: L ₀ / L _m / P ₀
Infrastrukturni indeks curenja	ILI	—	izvedeno prema IWA metodologiji vodne bilance
Noćni protok gubitaka nakon tlačnog koraka	L ₁	l/s	test tlačnih koraka (ishod; isključeno kao značajka)
Tlak zone nakon tlačnog koraka	P ₁	m	test tlačnih koraka (ishod; isključeno kao značajka)
Relativna dubina tlačnog koraka	dP_pct	%	test tlačnih koraka (oznaka kvalitete)
Eksponent curenja	N1	—	test tlačnih koraka (ciljna veličina)
Fizikalna vjerodostojnost zapisa	N1_plausible	—	oznaka kvalitete (filter $0,2 \leq N1 \leq 2,6$)
Težina pouzdanosti zapisa	—	—	oznaka kvalitete (snaga signala × faktor kvalitete koraka)

Napomena: Ishodi testa tlačnih koraka (L₁, P₁ i stupci razlika) isključeni su kao značajke jer su ulazi u sam izračun eksponenta N1; savršeno kolinearni stupci (flexible-rigid_calculation, pipe_rigid_percentage) izbačeni su iz baze. Naziv stupca pipe_flecible_percentage zatečeni je zapis izvorne baze (tipografska pogreška izvorinika), zadržan radi sljedivosti prema skriptama i datotekama.

Izvor: master izvješće (N1_master_report_HR), Odjeljci 3, 4, 11 i 18 te Dio V; izvorna baza u europskom CSV formatu (ml-report/data — N1_dataset_clean_v02.csv).

Ciljne vrijednosti nisu jednake pouzdanosti, i ta se heterogenost vidi već u opisnoj statistici. Izmjerene vrijednosti eksponenta protežu se od -0,99 do 8,11 — daleko izvan FAVAD-fizikalnog raspona od približno 0,5 do 1,5, proširenog do približno 2,5 za uzdužne pukotine na polietilenskim cjevovodima pod tlakom (pogl. 2.2). Histogram na slici 4.2 pokazuje strukturu te razdiobe. Glavnina zapisa leži u fizikalno smislenom rasponu, ali repovi sadrže vrijednosti koje nijedna hidraulika ne može proizvesti — negativan eksponent značio bi da gubici rastu dok tlak pada, što je u stacionarnim uvjetima noćnog testa fizikalno nemoguće i po definiciji predstavlja mjerni artefakt, a vrijednosti veće od približno 2,6 premašuju i najekstremnije laboratorijski dokumentirane pojedinačne otvore (pogl. 2.2.3). Pregled ekstremnih zapisa

pokazuje da su koncentrirani ondje gdje je tlačni korak testa bio malen, s razlikama tlaka od svega 4 do 7 m — s malim nazivnikom u $\log(P_1/P_0)$, svaka pogreška u procjeni gubitaka snažno se amplificira u izračunatom eksponentu. Taj nalaz — da su nemoguće vrijednosti sustavno vezane uz svojstva testa, a ne uz svojstva zone — temelj je filtra vjerodostojnosti i cijele kontrole kvalitete u pogl. 4.2.3.



Slika 4.2. Histogram izmjerenih vrijednosti eksponenta N1 u bazi (217 zapisa)

Prije modeliranja iz baze su uklonjene savršeno kolinearne i redundantne varijable — stupac razlike udjela fleksibilnih i krutih cijevi točno je jednak razlici dvaju udjela te je izbačen, kao i udjel krutih cijevi, koji je komplement udjela fleksibilnih. Dvije ekstremne, ali zadržane vrijednosti zaslužuju napomenu jer ilustriraju načelo postupanja s neuobičajenim opažanjima. Jedan zapis iskazuje gubitke vode od 108 % ulaznog volumena — fizikalno nemoguće, dakle posljedica pogreške mjerenja ulaza ili učinaka zaliha u spremnicima — a relativni tlačni koraci u jednom testu dosežu 83 %. Oba su opažanja obuhvaćena filtrom vjerodostojnosti i ponderiranjem pouzdanosti, koje tako duboke korake ograničava na težinu 0,30, umjesto da budu prešutno izbrisana jer neuobičajena vrijednost nije sama po sebi pogreška, a mehanizmi kontrole kvalitete moraju biti eksplicitni i dokumentirani, ne diskrecijski.

Struktura nedostajućih podataka u bazi nije slučajna nego ovisi o državi izvora — Ekvador je potpun u svim poljima, Kanadi nedostaju svi podaci o protocima i raščlamba materijala cijevi, a Južnoj Africi potrošnja i detaljna raščlamba materijala. U terminologiji teorije nedostajućih

podataka (Rubin, 1976; Little i Rubin, 2019), takvo je nedostajanje strukturno — vezano uz izvor podataka, a ne uz vrijednosti samih varijabli — što ima izravne posljedice za izbor postupka. Imputacija pretpostavlja da se nedostajuće vrijednosti mogu vjerodostojno predvidjeti iz opaženih, a strukturno nedostajanje po državi tu pretpostavku narušava upravo ondje gdje se države hidraulički razlikuju. Kako je dopunjena baza omogućila potpunost svih polja koja konačni model zahtijeva, za model v4.0 usvojena je politika nulte imputacije — nijedna vrijednost u konačnom trening skupu nije imputirana (pogl. 4.2.3).

4.2.3. Filtriranje i kontrola kvalitete podataka

Kontrola kvalitete provedena je na tri razine — fizikalna vjerodostojnost pojedinačnog zapisa, sustavno otkrivanje pravila kvalitete i ponderiranje pouzdanosti — pri čemu je treća razina, kao sastavni dio treniranja modela, izdvojena u pogl. 4.3.5. Uz te tri razine ispitana je, i s jasno definiranom ulogom zadržana, i četvrta, teorijski utemeljena pretpostavka: pojas prihvatanja od $\pm 16\%$ oko teoretske FAVAD krivulje materijala, opisan na kraju ovog potpoglavlja.

Prva razina je filter fizikalne vjerodostojnosti. Kao granice prozora vjerodostojnosti usvojene su vrijednosti $0,2 \leq N1 \leq 2,6$. Donja granica isključuje negativne i gotovo nulte eksponente, koji su po definiciji mjerni artefakti, a gornja ostavlja prostor iznad teorijske elastične gornje granice za dokumentirane slučajeve uzdužnih pukotina na polietilenu. Izvan tog prozora pada 29 zapisa, odnosno 13 % baze, koncentriranih — kako je pokazano u pogl. 4.2.2 — u testovima s malim tlačnim koracima. Ti su zapisi isključeni iz glavnih modela, ali su zadržani u očišćenoj bazi s oznakom vjerodostojnosti, čime ostaju dostupni za analize osjetljivosti i buduće revizije — načelo „označi, ne briši” koje čuva revizijski trag svake odluke o podacima i omogućuje da se filter naknadno preispita bez rekonstrukcije izvorne datoteke. Nakon filtra ostaje 188 upotrebljivih zapisa iz 143 mjerne zone, potpunih u svakom polju koje konačni model zahtijeva.

Koliko filter vjerodostojnosti mijenja sliku, pokazuje eksplorativno modeliranje provedeno prije i poslije njegove primjene. Na svih 217 zapisa najbolji model (slučajna šuma) postiže MAE 0,64 uz naizgled respektabilan koeficijent determinacije 0,34; na fizikalno vjerodostojnim zapisima MAE pada na 0,35, ali R^2 na 0,02, a dodatno pooštavanje na zapise s relativnim korakom od najmanje 10 % (181 zapis) mijenja sliku tek neznatno. Paradoks je prividan i dijagnostički dragocjen. Visok koeficijent determinacije na neočišćenim podacima gotovo u cijelosti dolazi od toga što model uči predviđati nevjerodostojne ekstreme — pretežno južnoafričke zapise sa sićušnim tlačnim koracima — dakle predviđa mjerni šum, a ne hidrauliku. Na vjerodostojnim podacima realna je slika skromno, ali stvarno poboljšanje od 8

do 10 % u MAE naspram stalnog pogađanja prosjeka. Taj kontrast, uz artefakt nazivnika opisan u pogl. 4.3.6, glavni je empirijski argument za izbor apsolutne pogreške kao primarne mjere — kriterij koji je nagradio učenje šuma ne može biti kriterij uspjeha.

Druga razina odgovara na pitanje: postoje li prepoznatljivi terenski uvjeti pod kojima test tlačnih koraka daje eksponent izvan fizikalnog raspona, tako da se takvi zapisi — ili, još bolje, takvi planovi testiranja — mogu unaprijed prepoznati? Svaka kandidatska varijabla probрана je na tri načina: stopom nevjerodostojnog eksponenta po kvartilima, pravilima jednog praga i plitkim stablom odlučivanja treniranim da predvidi ishode izvan raspona — pri čemu stablo ovdje ne služi za predviđanje eksponenta, nego za izvlačenje čitljivih pravila s pragovima, u skladu s izvornom namjenom stabala kao alata za uvid u prediktivnu strukturu podataka (Breiman i sur., 1984). Rezultati su sažeti u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Kriteriji filtra kvalitete i broj isključenih zapisa

Filtar	Kriterij	n zadržano	Isključeno	Broj mjernih zona	MAE	Uspjeh naspram prosjeka
—	Filtar vjerodostojnosti $0,2 \leq N1 \leq 2,6$ (na 217 zapisa)	188	29	143	—	—
A	Bez dodatnog filtra (referenca)	188	0	143	0,341	+9,9 %
B	Isključeni zapisi $ILI < 3$	152	36	107	0,325	−2,8 %
C	Isključeni zapisi $LD < 0,02$	100	88	55	0,248	+4,4 %
D	Isključeni zapisi $L_o < 2$ l/s	154	34	109	0,326	+5,8 %
E	Isključeni zapisi s relativnim $\Delta P < 15$ %	155	33	135	0,353	+8,6 %
F	C + E kombinirano	75	113	55	0,243	+7,7 %
G	Isključeni južnoafrički zapisi	107	81	62	0,240	+6,1 %
H	Isključivo južnoafrički zapisi	81	107	81	0,472	−0,2 %

Napomena: stopa nevjerodostojnog N1 (ukupno 13 %) monotono pada s intenzitetom signala gubitaka — 27 % za $ILI < 3$ naspram 3 % za $ILI > 20$; 19 % za $LD < 0,02$ naspram 0 % za $LD \geq 0,09$; 23 % za $L_o < 2$ l/s naspram 7 % za $L_o \geq 10$ l/s; zone s $P_o < 15$ m dale su 0 %, a zone s $P_o > 50$ m 19 % nevjerodostojnih vrijednosti (tlak je surogat, a ne uzrok). Broj isključenih zapisa u retcima A–H odnosi se na 188 vjerodostojnih zapisa.

Dominantni obrazac koji je probir otkrio jest omjer signala i šuma — pouzdanost izmjerenog eksponenta raste s intenzitetom gubitaka, a ne s tlakom. Stopa nevjerodostojnog eksponenta monotono pada sa svakom mjerom signala gubitaka: 27 % za $ILI < 3$ naspram 3 % za $ILI > 20$; 19 % za $LD < 0,02$ naspram 0 % za $LD \geq 0,09$; 23 % za $L_o < 2$ l/s naspram 7 % za $L_o \geq 10$ l/s. Fizika je jednostavna. Izračun eksponenta dijeli promjenu protoka gubitaka s promjenom tlaka, a kad je sam protok gubitaka malen, fiksne neizvjesnosti noćnog testa — procjena legitimne noćne potrošnje, rezolucija mjerila — jednako su velike kao mjerena veličina, zbog čega izračunatim eksponentom dominira šum; to je ista mehanika koja stoji iza terenskog nalaza da su eksponenti „zdravih“ zona s malim istjecanjem najvarijabilniji (Jenks i sur., 2023; pogl. 3.1),

ovdje pretvorena u kvantitativne pragove. Upravo su to mehanizmi nesigurnosti dokumentirani u pregledanoj literaturi (Marzola i sur., 2021; Jenks i sur., 2023), ovdje po prvi put kvantificirani na velikoj međunarodnoj bazi. Plitko stablo odlučivanja potvrđuje istu strukturu neovisnim putem. Nevjerodostojni rezultati koncentriraju se ondje gdje se $ILI \leq 29$ kombinira s umjerenim tlačnim koracima, a praktički nestaju u zonama visokog ILI-ja bez obzira na sve ostalo — konvergencija kvartilne analize, pravila jednog praga i stabla na isti obrazac daje pravilu kvalitete čvrstoću koju nijedna pojedinačna metoda ne bi imala. Početna pretpostavka da nizak početni prosječni zonski tlak proizvodi nepouzdanu rezultate pritom je opovrgnuta, i to obrnuto, jer su zone s $P_0 < 15$ m dale 0 % nevjerodostojnih eksponenata, a $P_0 < 25$ m samo 2 %, dok su zone s $P_0 > 50$ m dale 19 %, naspram ukupne stope od 13 % — zone visokog tlaka izgledaju loše u probiru samo zato što su u ovoj bazi pretežno južnoafričke zone niskih gubitaka; tlak je surogat, a ne uzrok.

Drugi obrazac probira jest država podrijetla. Južna Afrika nosi 22 % nevjerodostojnih zapisa naspram 3 % za Ekvador, a model treniran samo na južnoafričkim zapisima nema nikakvu prediktivnu moć. No pravilo signala gubitaka $LD \geq 0,02$ zadržava 93 od 95 ekvadorskih zapisa, 15 od 104 južnoafrička i nijedan od 18 kanadskih — ono je, u prvoj aproksimaciji, formalizacija načela „vjeruj mrežama s visokim gubicima“, bez potrebe da država bude eksplicitna varijabla modela. Učinak je kvantificiran ponovnim ocjenjivanjem modela pod identičnim validacijskim protokolom uz svaki kandidatski filter, s rezultatima u tablici 4.3. Bez dodatnog filtra referentni model postiže MAE 0,341 na 188 zapisa iz 143 zone; isključivanje zapisa s $ILI < 3$ daje 0,325, isključivanje zapisa s $Lo < 2$ l/s daje 0,326, a isključivanje zapisa s $LD < 0,02$ — filter koji zadržava 100 zapisa iz 55 zona — daje najveći dobitak, MAE 0,248; kombinacija s pravilom tlačnog koraka spušta pogrešku na 0,243, a isključivanje južnoafričkih zapisa, koje je s pravilom signala gotovo istovjetno, na 0,240. Nasuprot tome, model treniran isključivo na južnoafričkim zapisima postiže MAE 0,472 bez ikakvog poboljšanja naspram pogađanja prosjeka — ondje veze između značajki i „izmjerenog“ eksponenta nema ni u načelu. Zanimljivo je i da filter utemeljen samo na dubini tlačnog koraka (isključivanje zapisa s relativnim tlačnim korakom manjim od 15 %) sam po sebi ne poboljšava model — MAE 0,353, praktički jednako referenci bez filtra — što potvrđuje da je primarna os pouzdanosti signal gubitaka, a da dubina koraka djeluje kao sekundarni čimbenik, primjereniji ponderiranju nego tvrdoj podjeli (pogl. 4.3.5). Ograničavanje na zone s dostatnim signalom gubitaka, sažeto, smanjuje tipičnu pogrešku predviđanja za 27 do 30 %, s $\pm 0,34$ na $\pm 0,24$ do 0,25 u jedinicama N1 — dovoljno precizno da se s pouzdanjem razluči zona ponašanja nepromjenjivog otvora (eksponent oko 0,5) od zone

dominacije promjenjive površine (oko 1,5), što je upravo razlučivost koju investicijska odluka o upravljanju tlakom treba. Uz taj praktični dobitak ide i metodološko upozorenje koje se sustavno provlači kroz interpretaciju svih rezultata. Koeficijent determinacije ne poboljšava se usporedno s MAE mjerom, jer filteri uklanjaju upravo ekstremne ciljne vrijednosti, stoga se preostala varijanca smanjuje — ispravno je čitanje da filteri čiste ciljne vrijednosti više nego što osnažuju model (pogl. 4.3.6).

Iz probira slijedi preporučeni kriterij kvalitete, i za čišćenje baze i za planiranje budućih testova. Test tlačnih koraka vrijedi provoditi, a njegovu rezultatu vjerovati, kada je osnovni signal gubitaka zone dostatan ($L_0 \geq 2 \text{ l/s}$ i $LD \geq 0,02$) i kada test koristi relativni tlačni korak u pojasu 15–35 % — dovoljno dubok za signal, ali ne dublji, budući da analiza u pogl. 5.4.3 pokazuje da koraci iznad približno 35 % mjere sustavno prenizak eksponent. Zonama koje kriterij signala ne zadovoljavaju izmjereni eksponent uopće ne bi trebalo pripisivati; za njih je teorijska procjena iz granične krivulje materijala (pogl. 5.2.3) pouzdanija od njihova vlastitog testa. Kriterij time prerasta ulogu filtera baze i postaje protokolarna preporuka za terensku praksu — odgovor na nestabilnosti dvostupanjskih procjena, osjetljivost na noćnu potrošnju i učinke dubine koraka koje je literatura dokumentirala kvalitativno (Marzola i sur., 2021; Schwaller i van Zyl, 2015; Jenks i sur., 2023), ovdje po prvi put pretočen u brojčane pragove provjerene na velikoj bazi.

Četvrta, teorijski utemeljena smjernica kontrole kvalitete ispitana je kao stroža alternativa: zadržati samo zapise čiji se izmjereni eksponent slaže s teorijskim eksponentom implicitnim iz udjela plastičnih cijevi zone, unutar omeđenog pojasa prihvaćanja od $\pm 16 \%$ po dijelovima linearne krivulje materijala sa sidrištima 0 % plastike $\rightarrow 0,5$; 50 % $\rightarrow 0,8$; 75 % $\rightarrow 1,5$ i 100 % $\rightarrow 2,0$. Filtar je izrazito strog — prolaze samo 24 od 217 zapisa (11 %), iz 19 zona — a zadržani se uzorak dijeli u dva materijalna režima: miješane i krute mreže s prosjekom eksponenta 0,67 te potpuno plastične mreže s prosjekom 1,90. Na tom je podskupu, pod validacijom izostavljanja po jedne zone, sama teorijska krivulja — bez ikakvog prilagođavanja — točnija od svakoga treniranog modela. Taj se rezultat, međutim, mora čitati s ključnom metodološkom ograndom, zbog koje pojas u ovom istraživanju služi isključivo kao smjernica kontrole kvalitete, a nikad kao trening filter. Budući da su zapisi odabrani upravo prema slaganju s krivuljom, snažan učinak udjela plastike dijelom je ugrađen samom konstrukcijom — inducirana korelacija udjela plastike i eksponenta u zadržanom uzorku iznosi $r = 0,96$ (Pearsonov koeficijent linearne korelacije) — slijedom toga analiza potvrđuje unutarnju konzistentnost, a ne neovisnu prediktivnu moć. Vanjski valjan zaključak jest sama stopa prolaznosti, prema kojoj

samo 11 % terenskih testova u bazi daje eksponent usklađen s FAVAD teorijom materijala unutar ± 16 %, što više govori o kvaliteti terenskih mjerenja nego o teoriji — kvantitativna potvrda upozorenja iz pregleda literature o nestabilnosti dvostupanjskih terenskih procjena (Marzola i sur., 2021). Trening na podacima odabranima prema slaganju s teorijom jamčio bi njezino „ponovno otkrivanje“ — oblik curenja kroz projektantsku odluku (Kaufman i sur., 2012) — i upravo je zato ta granica povučena eksplicitno.

Odnos filtriranja i imputacije zaslužuje završnu metodološku napomenu, uz kratko teorijsko utemeljenje. Svojstva svih postupaka za nedostajuće podatke ovise o mehanizmu nedostajanja, formaliziranom tretiranjem indikatora nedostajanja kao slučajne varijable (Rubin, 1976). Ako nedostajanje ne ovisi o podacima (potpuno slučajno, MCAR, engl. *Missing Completely At Random*), opažene su jedinice slučajni poduzorak te je i analiza potpunih slučajeva valjana; ako ovisi samo o opaženim veličinama (slučajno uz opaženo, MAR, engl. *Missing At Random*), valjani su postupci utemeljeni na vjerodostojnosti i imputaciji bez modeliranja samog mehanizma; ako ovisi o vrijednostima koje upravo nedostaju (MNAR, engl. *Missing Not At Random*), mehanizam se ne smije ignorirati i svaki ga postupak mora eksplicitno uzeti u obzir (Rubin, 1976; Little i Rubin, 2019). U razvojnim verzijama modela nedostajuće vrijednosti popunjavane su imputacijom medijanom — postupkom prihvatljivim pod prvim dvama mehanizmima (Little i Rubin, 2019). Revizija potaknuta vanjskim recenzentskim pitanjem otkrila je, međutim, da je varijabla gubitaka vode nedostajala za sve kanadske zapise — strukturno, a ne slučajno — te je bila popunjena medijanom od 78 %, vrijednošću gotovo sigurno pogrešnog smjera za uredne kanadske mreže. Upravo je to treći, neignorabilan slučaj — vrijednosti nedostaju upravo zonama čije bi stvarne vrijednosti bile niske, zbog čega medijan baze — izveden iz visokogubitnih mreža — sustavno promašuje u pogrešnom smjeru. To je školski primjer kako imputacija pod pogrešnim mehanizmom ne samo da unosi šum nego stvara prividne gradijente. Koeficijent gubitaka vode u modelu, procijenjen na $-0,0032$ s imputiranim vrijednostima, kolabirao je na $+0,0008$ kad su dostavljene stvarne kanadske vrijednosti (pogl. 5.1). Konačna politika stoga glasi: nulta imputacija — model se trenira isključivo na zapisima potpunim u svim potrebnim poljima, što dopunjena baza za svih 188 upotrebljivih zapisa i omogućuje.

4.3. Metodološki okvir modeliranja

Metodološki okvir čini šest komponenti, fiksiranih prije razvoja modela i držanih nepromijenjenima kroz sve njegove verzije: validacijski protokol grupiran po mjernim zonama

(pogl. 4.3.1), tvrda granica prostora značajki koja isključuje ishode testa tlačnih koraka (pogl. 4.3.2), dvije naivne referentne vrijednosti kao donji prag smislenosti (pogl. 4.3.3), trianguliran postupak odabira značajki (pogl. 4.3.4), shema ponderiranja pouzdanosti mjerenja (pogl. 4.3.5) i obrazložen izbor mjere uspješnosti (pogl. 4.3.6). Redoslijed je postavljen ciljano. Prve tri komponente štite od precjenjivanja — od curenja informacija, cirkularnosti i besmislenih usporedbi — a druge tri određuju kako se iz šumovitih terenskih podataka izvlači maksimum informacije. Zajedno, one operacionaliziraju metodološke pouke destilirane iz pregleda literature u pogl. 3.3 — validacija mora poštovati strukturu podataka, mali uzorci traže štedljive modele i disciplinu selekcije, a mjere uspješnosti moraju odgovarati odluci kojoj model služi.

4.3.1. Unakrsna validacija grupirana po DMA zonama

Središnji rizik strojnog učenja na malim uzorcima jest precijenjena ocjena uspješnosti, dobivena testiranjem modela na informacijama koje je već vidio. Formalizaciju tog rizika daje teorija curenja podataka. Curenje je uvođenje informacije o cilju modeliranja koja u legitimnoj primjeni ne bi bila dostupna, a njegov je tipični ishod model koji na evaluaciji izgleda izvrsno, a u primjeni sustavno podbacuje — do te mjere da se u literaturi „predobri“ rezultati navode kao izravni signal curenja (Kaufman i sur., 2012). Dokumentirani primjeri iz natjecanja u rudarenju podataka pokazuju koliko prikriveno curenje može biti: identifikacijski brojevi pacijenata koji nose prognostičku informaciju, financijske serije kointegrirane s „budućim“ vrijednostima koje su desecima natjecatelja dale gotovo savršenu klasifikaciju, kronološki poredak zapisa kao skrivena informacija (Kaufman i sur., 2012) — svaki od njih formalno nevin stupac ili svojstvo skupa, a stvarno kanal informacije o cilju. Bitno je da curenje nije samo svojstvo pojedinačnih značajki. I model bez ijedne nelegitimne značajke može curiti kroz zavisne trening primjere, kada opažanja u trening i test skupu dijele zajedničke uzroke — upravo slučaj kada standardna unakrsna validacija nasumično raspoređuje međusobno zavisna opažanja (Kaufman i sur., 2012).

U ovoj bazi ta zavisnost ima konkretan oblik. Zapisi uzastopnih tlačnih koraka iste mjerne zone dijele sve mrežne značajke — duljinu, priključke, materijal, tlak, gubitke — a razlikuju se samo u ishodu pojedinog koraka. Kada bi dva takva zapisa pala u različite preklope obične k-struke unakrsne validacije, model bi se ispitivao na zoni koju je u treningu praktički zapamtio, stoga bi ocjena laskala svakom modelu, a najviše onima najfleksibilnijima. Opća je to pojava kod svih strukturiranih podataka. Nasumična unakrsna validacija ozbiljno podcjenjuje prediktivnu pogrešku kad podaci imaju vremensku, prostornu ili hijerarhijsku strukturu zavisnosti, i to čak i kad se koriste modeli koji strukturu formalno uvažavaju, dok blokirana validacija — u kojoj

se cijele grupe zavisnih opažanja drže zajedno — procjene pogreške približava stvarnima (Roberts i sur., 2017). Ista analiza pokazuje da problem nije samo u procjeni pogreške nego i u odabiru modela, budući da se pod nasumičnom validacijom na strukturiranim podacima sustavno biraju presloženi modeli, koji strukturu zavisnosti „objašnjavaju” nekauzalnim značajkama, dok blokirani postupci biraju ispravne (Roberts i sur., 2017) — rizik izravno relevantan za usporedbu linearnih modela i ansambala u pogl. 4.4. Kvantitativne ilustracije te pojave dokumentirane su i u primjenama na vodoopskrbne sustave — slučajna podjela vremenskih nizova može napuhati iskazanu točnost i do četiri puta (Canivete i sur., 2026), a studije prognoze potražnje standardnu unakrsnu validaciju na vremenski osjetljivim podacima izrijekom odbacuju (Antunes i sur., 2018).

Usvojeni protokol stoga glasi: sve ocjene u istraživanju koriste unakrsnu validaciju s pet preklopa grupiranu po mjernoj zoni (GroupKFold), u kojoj se cijele zone dodjeljuju preklopima, te se svaki model ocjenjuje isključivo na zonama koje u treningu nije vidio; najmanje analize, s malim brojem preostalih grupa, koriste strožu inačicu izostavljanja po jedne zone (leave-one-DMA-out) — primjerice, na teorijski konzistentnom podskupu s 19 zona (pogl. 4.2.3) to je jedina obranjiva shema, jer bi podjela 19 grupa u pet preklopa dala preklape premale za stabilnu procjenu. Sve glavne iskazane brojke su izvan preklopa (out-of-fold) — svako predviđanje proizveo je model treniran bez ijednog zapisa te zone. Pri 143 zone u pet preklopa svaki preklap sadrži približno 28 do 29 zona, što znači da je svaki model treniran na oko četiri petine zona i ocijenjen na preostaloj petini — dovoljno velikim skupinama da procjena pogreške bude stabilna, a dovoljno brojnim rotacijama da svaka zona točno jednom bude nevidljiva. Time je zadovoljeno i opće načelo razdvajanja učenja i predikcije iz teorije curenja — u kojoj se izbjegavanje curenja po konstrukciji postiže upravo podjelom po oznakama legitimnosti, ovdje po pripadnosti zoni (Kaufman i sur., 2012) — i preporuka blokiranja po grupama za hijerarhijski strukturirane podatke (Roberts i sur., 2017). Konceptualni temelj samog postupka unakrsne validacije — izostavljanje dijela podataka, optimizacija na ostatku i ocjena na izostavljenome, uz spoznaju da isti okvir služi i za izbor i za ocjenu modela — postavljen je u klasičnom radu Stonea (1974), koji je ujedno upozorio da nasumično izdvajanje podataka nije primjereno kad među opažanjima postoji zavisnost. Izbor pet preklopa slijedi literaturnu preporuku kompromisa. Validacija izostavljanjem po jednog opažanja daje približno nepristranu procjenu visoke varijance uz velik računski trošak, mali broj preklopa nižu varijancu uz pristranost navise, a pet do deset preklopa preporučeni je kompromis (Hastie i sur., 2009). Vrijedna je pozornosti i Stoneova terminološka opaska, koja dobro opisuje duh ovog

protokola. Stone, naime, preferira naziv „ocjena” (engl. *assessment*) pred „validacijom”, jer potonja nosi prizvuk pretjerane sigurnosti (Stone, 1974) — nijedan validacijski protokol ne dokazuje valjanost modela, nego samo nepristrano procjenjuje njegovu pogrešku na neviđenim podacima, unutar domene koju podaci pokrivaju.

Blokiranje po grupama nosi i jedan kompromis koji treba iskazati unaprijed jer postaje središnji u pogl. 5.3. Držanje cijelih grupa izvan treninga može ograničiti pokrivenost prostora značajki u trening skupu, stoga procjena pogreške dijelom mjeri ekstrapolaciju umjesto interpolacije — blokiranje rješava korelaciju, ali izbor razine blokiranja mora odgovarati cilju procjene (Roberts i sur., 2017). Grupiranje po zonama, kakvo je ovdje usvojeno, procjenjuje upravo ono što primjena traži — pogrešku na novoj, neviđenoj zoni unutar pokrivenog raspona režima gubitaka; grupiranje po cijelim državama, provedeno u pogl. 5.3, namjerno prelazi u ekstrapolacijski režim i zato se iskazuje odvojeno, kao granica valjanosti, a ne kao mjera uspješnosti.

Uz grupiranje, protokol nameće i drugo literaturno pravilo s neposrednim posljedicama za pogl. 4.3.4 — svaki probir i odabir značajki koji koristi ciljne vrijednosti mora se odvijati unutar validacijske petlje, a ne prije nje. Probir značajki na svim podacima s naknadnom unakrsnom validacijom daje drastično podcijenjenu pogrešku — u poznatom literaturnom primjeru prividna pogreška od 3 % naspram stvarnih 50 % (Hastie i sur., 2009) — jer je informacija o cilju već ugrađena u sam izbor varijabli; to je oblik curenja kroz projektantske odluke, skriveni jer ga evaluacija ne može naknadno otkriti (Kaufman i sur., 2012). U ovom istraživanju svi omotački postupci selekcije i sva podešavanja provedeni su pod grupiranom validacijom, a konačna se uspješnost iskazuje isključivo iz predikcija izvan preklopa.

4.3.2. Isključivanje varijabli koraka tlaka

Druga tvrda granica prostora značajki proizlazi iz same definicije ciljne veličine. Izmjereni eksponent $N1$ računa se iz para stanja prije i poslije redukcije tlaka — iz L_0 , L_1 , P_0 i P_1 — stoga su ishodi testa tlačnih koraka (sniženi tlak P_1 , gubici pri sniženom tlaku L_1 te svi stupci apsolutnih i relativnih razlika) ulazi u sam izračun ciljne vrijednosti. Njihova bi upotreba kao značajki bila cirkularna. Model bi „predviđao” eksponent iz veličina iz kojih je eksponent izračunan, s prividno izvrsnom točnošću koja ne bi imala nikakvu vrijednost u primjeni — jer zona bez provedenog testa te veličine po definiciji nema. U ekstremnom slučaju cirkularnost je čista tautologija — model kojem su dostupni i omjer gubitaka i omjer tlakova može eksponent jednostavno rekonstruirati po definicijskoj formuli, sa savršenom „točnošću” i nultom

spoznajnom vrijednošću — no i blaži oblici, poput korištenja samo dubine koraka, unose informaciju o protokolu testa koje primjenska zona nema. U terminologiji teorije curenja, riječ je o nelegitimnim značajkama u najstrožem smislu: informacija o cilju koja u trenutku primjene ne postoji (Kaufman i sur., 2012).

Značajke su stoga ograničene na varijable dostupne bez provedbe testa tlačnih koraka: karakteristike mreže (duljina, priključci, gustoće, udjeli materijala), osnovno pogonsko stanje (L_0 , P_0 , postotak gubitaka, normalizirane statistike gubitaka) i ILI. Granica je povučena upravo po liniji koja razdvaja dvije terenske aktivnosti opisane u pogl. 4.1 — sve što daje mjerna kampanja dopušteno je, sve što zahtijeva ugradnju redukcijskog ventila zabranjeno je. Time definicija dopuštene značajke nije statistička nego operativna — poklapa se s pitanjem koje se stvarno postavlja: što se o zoni može znati prije nego što se odluči hoće li se u njoj uopće provoditi test? Kriterij je istovjetan zahtjevu legitimnosti značajki iz teorije curenja — u vremenskoj formulaciji, značajka je legitimna samo ako je dostupna prije trenutka za koji se predviđa (Kaufman i sur., 2012); ovdje je „vrijeme“ zamijenjeno operativnim slijedom kampanja → odluka → eventualni test, ali logika je ista. Model koji bi koristio ishode testa odgovarao bi na pitanje koje nitko ne postavlja.

Isključivanje je i točka u kojoj se ovaj rad metodološki razilazi s praksom optimizacijskih kalibracija iz pregleda literature. Ondje se eksponent tretira kao slobodni parametar mreže, prilagođen mjerenjima konkretnoga sustava (Sebbagh i sur., 2018; Nasirian i Ahrari, 2022; Leinaes i sur., 2024), zbog čega naučena vrijednost ne generalizira izvan te mreže; ovdje se eksponent uči kao funkcija značajki sustava, te je prenosivost — uz granice iz pogl. 5.3 — ugrađena u samu postavku problema. Vrijedi istaknuti da to isključivanje nije bez posljedica. Relativna dubina tlačnog koraka, pokazat će se (pogl. 5.4.3), statistički značajnim čimbenikom izmjerenog eksponenta — no ona je svojstvo protokola testa, a ne zone, stoga njezino mjesto nije među značajkama nego u shemi ponderiranja pouzdanosti (pogl. 4.3.5), gdje informira model o tome koliko je pojedinoj ciljnoj vrijednosti vjerovati. Ta podjela uloga — svojstva zone kao značajke, svojstva testa kao težine — dosljedno je provedena kroz cijelo istraživanje.

4.3.3. Osnovne (naivne) referentne vrijednosti

Svaka iskazana mjera uspješnosti besmislena je bez odgovora na pitanje: u odnosu na što? Model koji ne nadmašuje trivijalne referentne modele nema analitičku vrijednost bez obzira na apsolutni iznos svoje pogreške. U protokol su stoga ugrađene dvije naivne referentne vrijednosti, ocijenjene pod identičnim grupiranim validacijskim protokolom kao i svi modeli:

predviđanje prosjeka uzorka i predviđanje $N1 = 1,0$ posvuda (vrijednost koja se u literaturi navodi kao tipična sredina raspona i koja se, kako je dokumentirano u pogl. 3.2, u primjenama rutinski pretpostavlja).

Dvije su reference komplementarne. Prosjek uzorka najbolja je moguća konstantna predikcija u smislu kvadratne pogreške na samim podacima, zbog čega razlika prema njemu mjeri koliko značajke zone uopće nose informaciju o eksponentu dok referenca $N1 = 1,0$ mjeri koliko bi netko pogriješio primjenom literaturne vrijednosti bez ikakve analize — upravo praksu koju su pregledi u pogl. 3.1 i 3.2 identificirali kao prevladavajuću. Vrijednost oko jedinice pojavljuje se u literaturi i kao praktična sredina raspona (Razavi i sur., 2023), i kao ishod optimizacijskih kalibracija (Sebbagh i sur., 2018; Nasirian i Ahrari, 2022), i kao često citirani medijan zbirki terenskih podataka (Van Zyl i Clayton, 2007), te je upravo ona vrijednost koju bi netko bez modela pretpostavio. Obje su reference „jake” upravo zato što je razdioba izmjerenih eksponenata u bazi centrirana blizu jedinice. Pod grupiranim protokolom one postižu MAE 0,378 odnosno 0,380 na svim vjerodostojnim zapisima, a 0,298 odnosno 0,311 na kvalitetno filtriranim — model koji te brojke ne nadmašuje ne opravdava operativnu primjenu. Vrijednosti obiju referenci na obama evaluacijskim podskupovima, uz najbolji jednoulazni kandidatski model radi konteksta, sažima tablica 4.4.

Tablica 4.4. Naivne referentne vrijednosti pod grupiranim validacijskim protokolom

Referentni model	MAE — svi vjerodostojni zapisi (n = 188)	MAE — kvalitetno filtrirani zapisi (n = 100)
Prosjek uzorka („ne znam ništa o zoni”)	0,378	0,298
$N1 = 1,0$ posvuda („iskustveno pravilo”)	0,380	0,311
Najbolji jednoulazni kandidat (radi konteksta)	0,342	0,229

Izvor: ml-report/N1_master_report_HR.md (Odjeljak 12); vrijednosti istovjetne tekstu pogl. 4.3.3.

Nadmašenje referentnih vrijednosti pritom je nužan, ali ne i dovoljan uvjet. Pri malom uzorku i razlika prema referenci nosi svoju standardnu pogrešku, stoga se svaka usporedba iskazuje s mjerom nesigurnosti — primjerice, najbolji model s devet značajki (MAE $0,331 \pm 0,044$) statistički je nerazlučiv od modela s jednom značajkom, što je upravo temelj štedljivog izbora u pogl. 4.3.4. Bez iskazane nesigurnosti, poredak modela na trećoj decimali sugerirao bi razlike koje podaci ne podupiru.

Reference su tijekom razvoja dale i jedan sadržajno važan negativan nalaz. Modeli hranjeni isključivo statičkim podacima katastra imovine — duljinama, priključcima, materijalima, bez

ijedne informacije o gubicima — nikad nisu nadmašili naivne reference. Minimalni podatkovni preduvjet upotrebljivog modela stoga je mjerenje protoka na ulazu u zonu s analizom minimalnoga noćnog protoka jer bez izmjerenog stanja gubitaka opisnici imovine sami po sebi ne nose dovoljno informacije o eksponentu. Taj nalaz ima i praktičnu stranu — definira najmanju investiciju (rutinsku mjernu kampanju) koja zonu čini podobnom za analitičku procjenu eksponenta — i metodološku, budući da potvrđuje da model uči hidrauliku stanja sustava, a ne topologiju mreže.

Referentne vrijednosti imaju i dijagnostičku ulogu u interpretaciji podskupova. Kako će se pokazati u pogl. 5, na pojedinim podskupovima baze — primjerice na južnoafričkim zapisima sa slabim signalom gubitaka, ili na kanadskom podskupu od svega petnaest vjerodostojnih zapisa bez podataka o protocima — nijedan model ne nadmašuje reference; ispravno čitanje nije da je model ondje loš, nego da su ciljne vrijednosti ondje same po sebi šum, što znači da nikakva veza između značajki i „izmjerenog“ eksponenta ne postoji. Bez referenci pod identičnim protokolom takva bi dijagnoza bila nemoguća, a upravo ona razdvaja granice modela od granica mjerenja — razliku na kojoj počiva i dvorazinska shema procjene u pogl. 5.2.3.

4.3.4. Odabir značajki

U nastavku se dosljedno razlikuju parametri vodoopskrbne mreže — mjerljiva svojstva zone u inženjerskom smislu, jezikom hipoteza — i značajke, to jest te iste veličine u ulozi ulaznih varijabli modela; koeficijenti modela naučene su vrijednosti prilagodbe, a hiperparametri postavke algoritama učenja. Baza nudi trinaest kandidatskih parametara dostupnih iz mjerne kampanje, a mali uzorak nalaže da ih konačni model koristi što manje jer svaki dodatni parametar pri 143 trening zone povećava varijancu procjene više nego što prosječno donosi informacije. Odabir značajki pritom nosi vlastite zamke, sustavno opisane u literaturi (Guyon i Elisseeff, 2003). Metode koje varijable ocjenjuju pojedinačno ne mogu otkriti komplementarnost — varijabla beskorisna sama za sebe može biti vrijedna u kombinaciji — dok su metode koje pretražuju podskupove računski skupe i, na malim uzorcima, sklone prenaučenosti; povrh svega, sam je postupak selekcije nestabilan, stoga male perturbacije podataka mogu dati bitno različite odabrane podskupove. Tri glavne obitelji postupaka (tri klase definirane u pogl. 2.4) — filtarske (rangiranje neovisno o modelu), omotačke (pretraga podskupova s modelom kao crnom kutijom) i ugrađene (selekcija tijekom samog treniranja) — otkazuju na različite načine (Guyon i Elisseeff, 2003; De Souza Groppo i sur., 2019), što je upravo svojstvo iskorišteno u usvojenom postupku. Odabir je trianguliran preko sve tri metode,

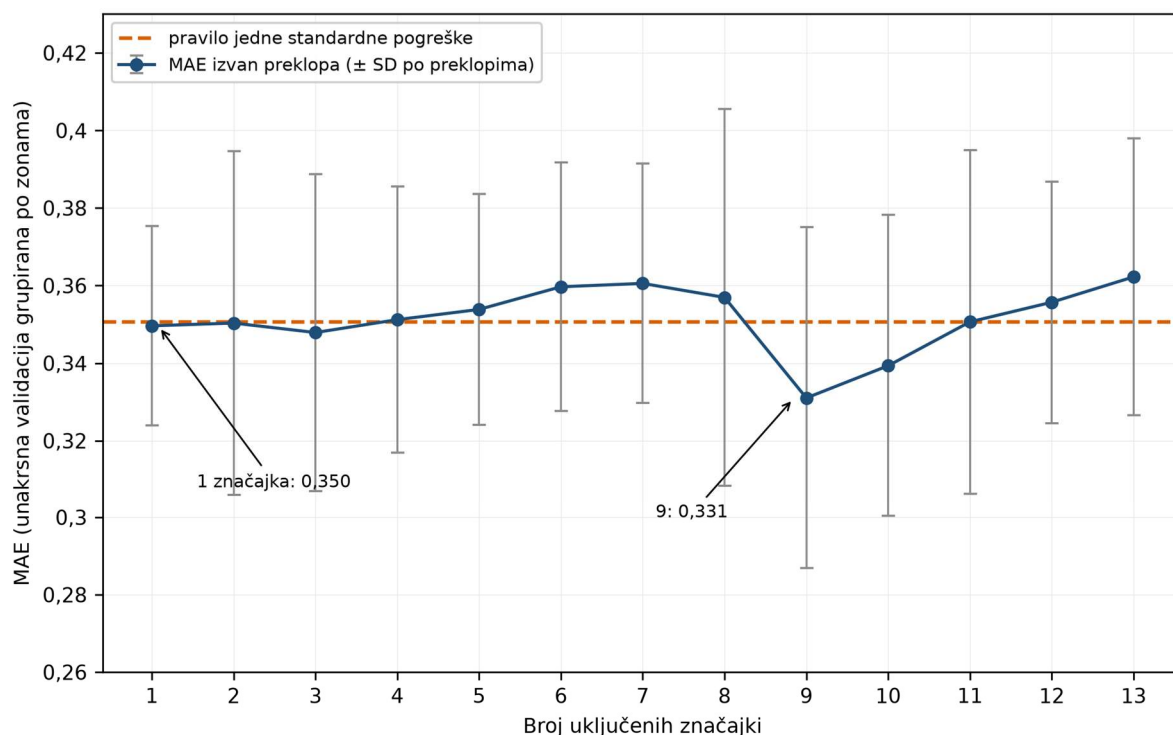
uz permutacijsku važnost kao četvrtu, neovisnu provjeru, a preživjele su samo varijable koje su podržale sve metode.

Filtarsku komponentu čini rangiranje Spearmanovom korelacijom ranga između svake kandidatske varijable i izmjerenog eksponenta. Rangiranje pojedinačnih varijabli računski je i statistički najskalabilniji postupak selekcije, robustan na prenaučenost upravo zato što je jednostavan — pristran, ali male varijance — zbog čega je preporučen kao polazna točka svake selekcije (Guyon i Elisseeff, 2003); njegova je poznata slijepa točka nemogućnost otkrivanja komplementarnih parova varijabli — varijabla potpuno beskorisna sama za sebe može značajno poboljšati model u kombinaciji s drugima, a dvije pojedinačno beskorisne varijable mogu zajedno dati dobru separaciju (Guyon i Elisseeff, 2003) — zbog čega u triangulaciji nikad ne nastupa sam. Ista literatura upozorava i na obrnutu intuiciju o redundantnosti, naime da prividno redundantne, međusobno korelirane varijable nisu nužno beskorisne — usrednjavanjem neovisnih šumova one mogu poboljšati omjer signala i šuma (Guyon i Elisseeff, 2003) — stoga se ni skupina pet međusobno koreliranih pokazatelja intenziteta gubitaka (WL, ILI, Qrl/km, Qrl/SC i LD) u ovoj bazi nije smjela odbaciti administrativno, nego tek nakon što je omotačka selekcija pokazala da zajednički ne donose više od najboljega pojedinačnog predstavnika. Korelacija ranga odabrana je umjesto Pearsonove iz dvaju razloga utemeljenih već u izvornom Spearmanovu radu. Usporedba po rangu bitno smanjuje utjecaj ekstremnih vrijednosti — a baza sadrži ekstreme i u značajkama (ILI do 207) i u cilju — te ima manju slučajnu pogrešku na malim uzorcima (Spearman, 1904). Uz to, korelacija ranga ne pretpostavlja linearnost veze, nego samo monotonost, što odgovara očekivanim FAVAD odnosima s opadajućim graničnim učinkom. Za neparametarske usporedbe podskupova — primjerice razdioba eksponenta među materijalnim režimima — protokol predviđa Mann-Whitneyev U test, egzaktno valjan i pri vrlo malim uzorcima i konzistentan upravo protiv alternative stohastičke dominacije koja se u takvim usporedbama očekuje (Mann i Whitney, 1947).

Ugrađenu komponentu čini Lasso regresija — L1 kazna na veličinu koeficijenata ima svojstvo da neinformativne koeficijente tjera točno na nulu, čime prilagodba modela istodobno obavlja i selekciju varijabli (Tibshirani, 1996). To svojstvo pretvara Lasso u dokazni instrument. Kada Lasso, dobivši sve kandidatske varijable, zadrži samo jednu ili dvije, to je nalaz o informacijskom sadržaju prostora značajki, a ne slučajnost — pod uvjetom da je regularizacijski parametar podešen pod grupiranom validacijom, kako protokol i nalaže. Putanje Lasso koeficijenata preko raspona regularizacije dodatno pokazuju redoslijed kojim varijable „ispadaju“, što daje rangiranje neovisno o filtarskome. Kao dopunska zaštita od lažno

relevantnih varijabli u literaturi je predložena i metoda sonde (engl. *probe method*) — uvođenje umjetnih, slučajnih varijabli u kandidatski skup, uz odbacivanje svih stvarnih varijabli rangiranih ispod njih, čime omjer probranih lažnih i stvarnih varijabli daje gornju granicu udjela lažno relevantnih u odabranom podskupu (Guyon i Elisseeff, 2003); u ovom istraživanju istu ulogu ispunjava zahtjev suglasja četiriju metoda, koji je za varijablu stroži test od nadmašivanja slučajne sonde u jednoj metodi.

Omotачku komponentu čini postupno uključivanje značajki (engl. *greedy forward selection*) pod unakrsnom validacijom grupiranom po mjernim zonama. Kreće se od praznog skupa i u svakom se koraku dodaje značajka koja najviše smanjuje MAE izvan preklopa, a konačna se veličina skupa bira pravilom jedne standardne pogreške — najmanji skup čija je pogreška unutar jedne standardne pogreške od najboljega (Hastie i sur., 2009). Pravilo jedne standardne pogreške ovdje ima ključnu ulogu jer se krivulja pogreške po broju značajki u ovoj bazi pokazuje gotovo ravnom — jedna značajka postiže MAE 0,350 naspram 0,331 najboljeg modela s devet značajki (slika 4.3) — slijedom toga bi izbor globalnog minimuma značio uzimanje u obzir osam dodatnih varijabli za statistički nerazlučivo poboljšanje. Ravna krivulja i sama je nalaz. Ona kazuje da značajke kampanje dijele jednu dominantnu os informacije — intenzitet gubitaka — nakon koje preostale varijable dodaju uglavnom redundanciju, u skladu s korelacijskom strukturom te skupine pokazatelja opisanom u nastavku. Upravo takav obrazac, u kojem manji i dobro odabran skup varijabli postiže praktički jednaku točnost kao potpuni skup, dokumentiran je i u primjenama strojnog učenja za vodoopskrbne mreže (Robles-Velasco i sur., 2021b; Yussif i sur., 2023).



Slika 4.3. Točnost modela po broju uključenih značajki — postupno uključivanje pod grupiranom unakrsnom validacijom

Četvrtu, neovisnu provjeru daje permutacijska važnost izračunata izvan preklopa. Vrijednosti pojedine značajke nasumično se ispremiješaju, čime ona postaje neinformativna bez promjene svoje marginalne razdiobe, a pad uspješnosti modela mjeri koliko se model na nju stvarno oslanjao — postupak uveden uz slučajne šume (Breiman, 2001) i kasnije formalno utemeljen kao mjera oslanjanja modela (Fisher i sur., 2019). Ključno je da se permutacijska važnost ovdje računa izvan preklopa, a ne iz internih procjena ansambla na izostavljenim (engl. *out-of-bag*) uzorcima jer interna procjena ne poštuje grupiranje po zonama (pogl. 4.4), a literatura upozorava i da permutacijska važnost ne mjeri učinak potpunog uklanjanja varijable iz modela — pri ponovnom treniranju model bi se dijelom oslonio na korelirane surogate (Hastie i sur., 2009). Uz formalizaciju ide i upozorenje koje je za ovaj rad posebno relevantno. Važnost varijable iz jednoga modela nestabilna je kad mnogo različitih modela slično dobro predviđa — Rashomonov efekt — stoga varijabla važna za jedan dobar model može biti nevažna za drugi (Fisher i sur., 2019). Na malom uzorku s koreliranim značajkama taj je efekt realan, i upravo je zato važnost značajki u ovom istraživanju iskazana kroz suglasje četiriju metoda, a ne kao točkasta vrijednost iz jednoga modela; kandidatske varijable koje kodiraju intenzitet gubitaka (ILI, WL, Qrl/km, Qrl/SC, LD) međusobno su izrazito korelirane, zbog čega je pitanje „koja je od njih važna“ dijelom neodredivo — određiva je tek informacija koju zajednički nose. Unutar te korelirane skupine konačna prednost značajke LD nije statistička slučajnost nego posljedica

njezine konstrukcije. Ona jedina normalizira gubitke i po opsegu mreže i po tlaku, te u jednoj veličini sažima ono što ILI postiže UARL normalizacijom, ali iz veličina koje kampanja izravno mjeri; prosječni tlak zone pritom djeluje unutar normalizacije — signal eksponenta ne nosi tlak sam po sebi, nego gubici po jedinici tlaka, što je i razlog zašto sirovi P_0 kao zaseban ulaz konačnom modelu ne dodaje ništa (pogl. 5.1).

Suglasje četiriju metoda na ovoj se bazi pokazalo visokim, a poredci stabilnima. Ilustracije radi, eksplorativna faza dala je konzistentan vrh poretka preko sve tri neovisne metode: ILI s negativnim smjerom (visok ILI znači dominaciju velikih detektabilnih puknuća, dakle ponašanje otvora nepromjenjive površine i eksponent prema 0,5), osnovni tlak P_0 s pozitivnim smjerom (viši radni tlak širi otvore istjecanja promjenjive površine), statistike intenziteta gubitaka s negativnim smjerom (isti mehanizam kao ILI) te udjel fleksibilnih cijevi s očekivano pozitivnim, ali slabim smjerom — slabim zato što polovica baze (južnoafrički podskup) u toj varijabli nema varijance. Svi su smjerovi u skladu s FAVAD teorijom iz pogl. 2.2, što je prvi test fizikalne smislenosti cijelog pristupa; njihova detaljna interpretacija i konačna uloga u modelu pripadaju pogl. 5. Ovdje je bitna metodološka pouka suglasja. Kad filter, ugrađena metoda, omotač i permutacijska važnost neovisno konvergiraju na isti mali skup, vjerojatnost da je taj skup artefakt jedne metode ili jedne podjele podataka postaje zanemariva — upravo je to obrana od nestabilnosti selekcije koju literatura dokumentira kao njezin glavni rizik (Guyon i Elisseeff, 2003). Konačni je rezultat triangulacije — detaljno dokumentiran u pogl. 5 — da je obranjivi minimalni skup ulaza malen. Pravilo jedne standardne pogreške izdvaja tri teorijski utemeljene značajke — ILI (ili njegov surogat među statistikama gubitaka), prosječni tlak zone i udjel fleksibilnog materijala — s MAE 0,349, statistički nerazlučivo od punog modela s trinaest varijabli ($0,331 \pm 0,044$), a daljnjom evidencijskom redukcijom u razvoju modela ulazni prostor sveden je s trinaest kandidatskih parametara na jednu izvedenu značajku — specifičnu gustoću stvarnih gubitaka normaliziranu tlakom LD — koja objedinjuje tri izvorna podatka: noćni protok stvarnih gubitaka L_0 , duljinu glavnih cjevovoda L_m i prosječni zonski tlak P_0 . Za metodologiju je bitno da taj ishod nije nametnut unaprijed — protokol je dopuštao i model sa svih trinaest ulaza, a do redukcije je dovela isključivo konvergencija svih četiriju neovisnih metoda selekcije pod grupiranom validacijom.

4.3.5. Težinsko vrednovanje pouzdanosti mjerenja

Standardna regresija svim opažanjima pridaje jednaku težinu — implicitno pretpostavljajući da su sve ciljne vrijednosti jednako pouzdane. U ovoj bazi ta pretpostavka očigledno ne vrijedi — pogreške ciljnih vrijednosti heteroskedastične su, s varijancom koja se među zapisima razlikuje

za redove veličine. Izmjereni eksponent iz testa sa snažnim signalom gubitaka i umjerenim tlačnim korakom pouzdana je veličina, dok isti izračun iz testa sa slabim signalom ili vrlo dubokim korakom jedva razlučuje eksponent od šuma — a dio pogreške, kako pokazuje dijagnoza u pogl. 5.4.2, nije ni slučajna nego sustavno usmjeren prema dolje. Metodološki odgovor jest ponderirana metoda najmanjih kvadrata (WLS) — doprinos svakog zapisa funkciji gubitka množi se težinom, stoga zapisi upitne pouzdanosti informiraju prilagodbu smanjenom snagom umjesto da budu ili slijepo prihvaćeni ili izbrisani. Time se izbjegava lažna dihotomija „dobar zapis / loš zapis“ koja tvrdim filtrima nameće proizvoljne pragove, jer je pouzdanost kontinuirana veličina koju shema tretira kontinuirano.

Statistički temelj postupka klasičan je. Kada pogreške opažanja nisu jednakih varijanci, ispravan procjenitelj minimizira sumu kvadrata ponderiranu inverznim varijancama — poopćenje metode najmanjih kvadrata na korelirane i heteroskedastične podatke formalizirano još Aitkenovim radom (Aitken, 1936). Usvojena težina je umnožak dviju komponenti koje aproksimiraju upravo inverznu varijancu pogreške ciljne vrijednosti: snage signala gubitaka — jer je pokazano (pogl. 4.2.3) da nesigurnost izmjerenog eksponenta monotono pada s intenzitetom gubitaka — i faktora kvalitete tlačnog koraka, koji doseže vrhunac u pojasu relativnih koraka od 15 do 35 % i opada za dublje korake, pri čemu su najdublji koraci ograničeni na težinu 0,30. Obje komponente izračunljive su za svaki zapis iz veličina koje baza sadrži, zbog čega je shema potpuno reproducibilna i ne sadrži nijedan diskrecijski element; njezin je učinak da zapis snažnog signala i protokolarno ispravnog koraka informira prilagodbu punom snagom, zapis slabog signala razmjerno slabije, a zapis vrlo dubokog koraka najviše trećinom pune snage — stupnjevanje koje kvantitativno slijedi empirijske stope nepouzdanosti iz tablice 4.3. Druga komponenta ima, uz klasičnu, i jednu neklasičnu ulogu. Budući da vrlo duboki koraci eksponent ne mjere samo šumovitije nego sustavno prenisko ($p = 0,035$ — p -vrijednost je vjerojatnost da bi se barem ovako izražena veza pojavila slučajno kad stvarnoga učinka ne bi bilo, a vrijednosti ispod 0,05 uobičajeno se smatraju statistički značajnima; pogl. 5.4.3), oblik faktora s platoom i padom ujedno ispravlja usmjerenu pristranost oznaka — diskontira zapise za koje se zna da podmjeruju eksponent, što nijedan simetrični model šuma ne bi opravdao, ali kontrolirana dijagnoza u pogl. 5.4.2 opravdava. Shema je pritom prošla vlastitu reviziju tijekom razvoja. Naime, izvorna težina kvalitete koraka rasla je s dubinom koraka — po intuiciji „dublji korak, jači signal“ — i time nagrađivala upravo zapise za koje je dijagnoza plastičnih zona naknadno pokazala da mjere sustavno prenizak eksponent; nakon te dijagnoze faktor je preoblikovan u plato u pojasu 15–35 % s padom iznad, a 95 zapisa s

dubokim koracima od tada informira prilagodbu smanjenom težinom umjesto da vuče koeficijente prema dolje. Taj slijed — intuicija, empirijska dijagnoza, korekcija sheme — primjer je kontroliranog razvoja opisanog u pogl. 4.1, u kojem se svaka promjena metodologije veže uz dokumentirani nalaz.

Alternativa ponderiranju — tvrdo uklanjanje nepouzdanih zapisa — sustavno je ispitana i odbačena, eksperimentom čiji je dizajn metodološki poučan. Sve varijante ocijenjene su na identičnim, fiksnim evaluacijskim podskupovima (100 kvalitetno filtriranih zapisa te 32 zapisa koji uz kvalitetni filter imaju i ispravan pojas koraka) s istim preklopima grupiranim po zonama, stoga usporedba izolira odluku o postupanju s podacima od svega ostalog. Ishod se čisto dijeli po granici između svojstava testa i svojstava zone. Uklanjanje po valjanosti testa (dostatan signal i ispravan pojas koraka) konkurentno je ponderiranju — stroga varijanta, sa samo 23 preživjela trening zapisa, na malom nepristranom mjerilu čak nadmašuje ponderiranje (MAE 0,272 naspram 0,296) — ali je pri današnjoj veličini uzorka nedovoljno robusna i gubi na širokom mjerilu (0,246 naspram 0,229); zabilježena je stoga kao model strogo filtriranog podskupa (23 zapisa) kojemu treba ponovna prilagodba kad se nakupi više protokolarno ispravnih testova, a ne kao sadašnji izbor. Uklanjanje po naravi zone je pogrešno. Filtriranje niskotlačnih zona ostavlja jedanaest trening zapisa uz MAE 0,375, a dodavanje praga po ILI-ju devet zapisa uz 0,395 — gotovo dvostruko veću pogrešku — jer su te zone upravo primjeri niskog eksponenta iz kojih model uči. Trening metodom stoga ostaje ponderiranje, a ista podjela definira i prag primjene ugrađen u konačne alate, po kojem se izračun smije odbiti zbog nevaljanog testa ili nedostatnog signala, nikad zbog naravi zone — visok ILI ili visoki gubici ulazi su modela, a ne nedostaci, i nizak predviđeni eksponent takve zone upravo je odgovor koji se traži. Radi čistoće usporedbe valja naglasiti i podjelu uloga između treniranja i ocjenjivanja. Težine ulaze isključivo u funkciju gubitka pri prilagodbi modela, dok se sve mjere uspješnosti računaju neponderirano na unaprijed definiranim, fiksnim podskupovima — ponderirana evaluacija miješala bi kvalitetu modela s kvalitetom sheme ponderiranja i onemogućila usporedbu shema među sobom. Postav i ishod cijelog eksperimenta sažima tablica 4.5.

Tablica 4.5. Eksperiment postupanja s nepouzdanim zapisima — ponderiranje naspram uklanjanja

Pristup	Postav	MAE	Posljedica
Ponderiranje pouzdanosti	težina = snaga signala gubitaka $\times$ faktor kvalitete koraka; svih 188 vjerodostojnih zapisa	0,296 (nepristrano mjerilo, 32 zapisa); 0,229 (široko mjerilo, 100 zapisa)	usvojeni trening pristup — čuva veličinu uzorka i geografsku raznolikost, potiskuje šum i usmjerenu pristranost

Pristup	Postav	MAE	Posljedica
Uklanjanje po valjanosti testa	stroga varijanta: 23 preživjela trening zapisa (dostatan signal i ispravan pojas koraka)	0,272 (nepristrano mjerilo); 0,246 (široko mjerilo)	konkurentno na malom nepristranom mjerilu, ali pri postojećoj veličini uzorka nedovoljno robusno; zabilježeno za ponovnu prilagodbu kad se nakupi više protokolarno ispravnih testova
Uklanjanje po naravi zone	filtriranje niskotlačnih zona: 11 trening zapisa; uz dodatni prag po ILI-ju: 9 zapisa	0,375 odnosno 0,395	pogrešno — uklanja upravo primjere niskog eksponenta iz kojih model uči; izračun se smije odbiti zbog nevaljanog testa, nikad zbog naravi zone

Ponderiranje ima i jednu evaluacijsku suptilnost koju treba iskazati unaprijed, jer bez nje rezultati u pogl. 5 mogu djelovati proturječno. Model treniran uz težine s ispravkom za pristranost nužno se nešto lošije slaže s ukupnim skupom izmjerenih ciljeva — jer približno polovica validacijskih ciljeva nosi upravo onu pristranost dubokih koraka koju težine ispravljaju — dok su na nepristranom podskupu (dostatan signal, koraci u ispravnom pojasu) sheme s ispravkom i bez njega statistički izjednačene. Pogoršanje sirove ukupne pogreške stoga nije nazadovanje nego očekivana cijena ispravka zato što model namjerno ne slijedi ciljne vrijednosti za koje se zna da su pristrane. Dosljedno tome, ni interval predikcije ne izvodi se iz svih reziduala nego iz reziduala na kvalitetno filtriranom podskupu (pogl. 4.3.6) — nesigurnost modela smije se mjeriti samo naspram ciljnih vrijednosti kojima se vjeruje, jer bi interval kalibriran na šumovitim ciljevima bio umjetno širok i kažnjavao model za tuđe pogreške.

4.3.6. Odabir mjere uspješnosti (MAE)

Izbor mjere uspješnosti nije tehnička formalnost — on definira što „bolji model” uopće znači, a različite mjere mogu dati različit poredak modela (Antunes i sur., 2018). U istraživanju se sustavno iskazuju tri mjere — srednja apsolutna pogreška, korijen srednje kvadratne pogreške i koeficijent determinacije:

$$MAE = (1/n) \cdot \sum |\hat{y}_i - y_i| \quad (4.2)$$

$$RMSE = [(1/n) \cdot \sum (\hat{y}_i - y_i)^2]^{(1/2)} \quad (4.3)$$

$$R^2 = 1 - \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.4)$$

pri čemu je $\hat{y}_i$ predviđena, y_i izmjerena vrijednost eksponenta, a $\bar{y}$ prosjek izmjerenih vrijednosti ocjenjivanog podskupa. Formula (4.4) navedena je eksplicitno jer u literaturi supostoji najmanje osam neekvivalentnih definicija koeficijenta determinacije, koje su jednake samo za linearni model s odsječkom prilagođen običnim najmanjim kvadratima, a za nelinearne modele i modele bez odsjeka razilaze se — mogu premašiti jedinicu ili postati negativne — zbog čega je dosljedna primjena jedne, jasno navedene formule na sve uspoređivane modele nužan uvjet smislene usporedbe (Kvålseth, 1985). Iz istog razloga sve se mjere računaju na izvornoj skali eksponenta, nikad na transformiranim veličinama jer koeficijent determinacije izračunan na logaritamski transformiranim vrijednostima mjeri prilagodbu lineariziranog, a ne izvornog modela, i može precijeniti kvalitetu prilagodbe (Kvålseth, 1985). Konceptualno, koeficijent determinacije uvijek je usporedba dvaju modela — promatranog i nul-modela konstantne predikcije — te velik R^2 kazuje samo koliko model poboljšava tu trivijalnu referencu, a ništa o apsolutnoj adekvatnosti modela; dvije se R^2 vrijednosti smiju uspoređivati samo uz isti referentni model, istu mjeru varijacije i isti podskup (Anderson-Sprecher, 1994).

Interpretacija primarne mjere neposredna je. MAE je prosječna veličina pogreške u jedinicama same ciljne veličine — primjerice, $MAE = 0,25$ značilo bi da tipično predviđanje promašuje izmjereni eksponent za 0,25 — iskaz razumljiv i bez statističke pozadine, što za alat namijenjen operativnoj primjeni nije sporedna vrlina. Kao primarna mjera usvojena je MAE, a izbor počiva na četiri razloga, od kojih je svaki vidljiv u brojkama samog istraživanja. Prvi je gornja granica šuma. Koeficijent determinacije uspoređuje model s ukupnom varijancom oznaka, ali velik dio varijance izmjerenog eksponenta u ovoj bazi jest mjerni šum terenskih testova — neizvjesnost noćne potrošnje, rezolucija mjerila, mali nazivnici — koji nijedna značajka ne može objasniti, stoga je dostižni R^2 ograničen daleko ispod jedinice ma koliko model bio dobar. Ista je pojava u statistici poznata još od Spearmanova opažanja da pogreške mjerenja sustavno prigušuju opažene korelacije — atenuacije koja se ne uklanja produljenjem serije opažanja (Spearman, 1904) — što znači da se šum u ciljnim vrijednostima ne može „nadmodelirati“, nego samo transparentno priznati u interpretaciji mjera. Drugi je artefakt nazivnika. Budući da je nazivnik koeficijenta determinacije varijanca ocjenjivanog podskupa, svaki korak čišćenja koji ukloni ekstremne ciljne vrijednosti smanjuje taj nazivnik — zbog čega model može postati točniji (MAE pada s 0,34 na 0,25) dok mu R^2 pada, isključivo zato što je preostala varijanca manja — standardna devijacija ciljnih vrijednosti nakon filtriranja smanjuje se s 0,49 na 0,38, a manja pogreška naspram manje varijance može dati niži koeficijent determinacije. Treći razlog jest nagrađivanje prilagodbe šumu, budući da je najviši koeficijent determinacije u cijelom

istraživanju pripadao modelu treniranom na neočišćenim podacima, koji je tu ocjenu zaradio učeći predviđati fizikalno nemoguće ekstreme — kriterij R^2 nagradio je najmanje obranjiv modelarski izbor među ispitanima. Četvrti je relevantnost za odluku. Investicijsko pitanje glasi „koliko će odstupati eksponent koji ću uvrstiti u FAVAD formulu ušteda" — pitanje u apsolutnim jedinicama eksponenta, na koje MAE izravno odgovara, a omjer varijanci ne; s dvama odlučivačkim režimima zone (dominacija puknuća oko 0,5 do 0,7, dominacija pozadinskih gubitaka oko 1,2 do 1,5) razdvojenima približno 0,6 jedinica, pogreška reda veličine navedenog primjera ispravno klasificira režim u velikoj većini slučajeva.

Izbor je usidren i u metodološkoj literaturi o mjerama pogreške, koja je o odnosu MAE i RMSE vodila eksplicitnu raspravu. S jedne strane, RMSE ovisi o trima karakteristikama skupa pogrešaka — prosječnoj veličini, varijanci magnituda i broju opažanja — a ne samo o prosječnoj pogrešci, s granicama $MAE \leq RMSE \leq \sqrt{n} \cdot MAE$, te je kao mjera prosječne pogreške dvosmislen i među skupovima različite veličine neusporediv (Willmott i Matsuura, 2005). S druge strane, RMSE je legitimna metrika koja zadovoljava nejednakost trokuta, prikladnija od MAE kada su pogreške približno normalno raspodijeljene i kada je kažnjavanje velikih pogrešaka poželjno — uz praktičnu prednost da izbjegava apsolutnu vrijednost, nepoželjnu u gradijentnim optimizacijskim postupcima — stoga se preporučuje kombinacija mjera umjesto isključivosti (Chai i Draxler, 2014). Usvojeni protokol slijedi upravo tu pomirbenu liniju. MAE je primarni kriterij uspjeha iz četiriju navedenih razloga, RMSE se iskazuje usporedno — a razmak između njih kvantificira koliki dio proračuna pogreške leži u malom broju teških zapisa, a njegov je iznos za konačni model iskazan u pogl. 5.2 uz ostale mjere — dok R^2 , računat dosljedno po formuli (4.4), služi kao sekundarna provjera zdravlja (jako negativna vrijednost trenutačno signalizira pokvaren model) i za usporedbe na fiksnom podskupu, gdje je nazivnik konstantan, zbog čega je usporedba metodološki ispravna. Uz mjere pogreške, za svaki se model iskazuju i pristranost (prosječni predznak pogreške) te udjeli predikcija unutar $\pm 0,25$ i $\pm 0,50$ jedinica eksponenta — operativno čitljive mjere koje govore koliko često procjena pada unutar tolerancije odluke. Ovisnost RMSE mjere o strukturi pogrešaka pritom nije samo teorijska. Pet skupova pogrešaka s identičnom MAE vrijednošću može imati RMSE u rasponu od jednake do dvostruke vrijednosti, ovisno isključivo o varijanci magnituda (Willmott i Matsuura, 2005) — slijedom toga rangiranje modela po dvjema mjerama može se razlikovati, što je u pogl. 5 dosljedno prikazano usporednim iskazivanjem obiju.

Metodološki okvir uspješnosti zaokružuje pitanje kako uz točkastu predikciju iskazati i njezinu nesigurnost. Usvojeni je pristup distribucijski slobodan — 80-postotni interval predikcije

konstruira se iz 10. i 90. percentila reziduala izvan preklopa na kvalitetno filtriranim validacijskim podacima, čime interval nasljeđuje asimetriju stvarne razdiobe pogrešaka umjesto da nameće simetričnu parametarsku formu. Pristup je konceptualno srodan konformalnoj predikciji, koja pod jedinom pretpostavkom izmjenjivosti opažanja daje predikcijske skupove s jamčenom pokrivenošću, s izborom mjere nekonformnosti — ovdje apsolutnog reziduala — koji utječe samo na širinu, a ne na valjanost intervala (Vovk i sur., 2005). Za grupirane podatke izmjenjivost vrijedi na razini zona, stoga su reziduali uzeti iz predikcija izvan preklopa pod grupiranim protokolom — čime je i kvantifikacija nesigurnosti podvrgnuta istoj disciplini kao i točkasta ocjena; numerička specifikacija intervala i njegova interpretacija dane su u pogl. 5.2.2. Sveukupno, iskazivanje više mjera s definiranim ulogama, uz pristranost, tolerancijske udjele i interval nesigurnosti, izravno odgovara na kritiku izvještajne prakse u primjenama strojnog učenja na vodoopskrbne sustave — gdje mnoge studije navode samo najbolju pojedinačnu brojku, bez mjere nesigurnosti i bez definiranog protokola (Zuñiga-Urbe i sur., 2026; Canivete i sur., 2026).

4.4. Usporedba algoritama

Pod metodološkim okvirom iz pogl. 4.3 uspoređeno je šest obitelji algoritama, od kojih je svaka odabrana za zadaću za koju je teorijski prikladna: obična metoda najmanjih kvadrata (OLS), Ridge regresija, Lasso regresija, slučajne šume, gradijentno pojačavanje i, kao produkcijska metoda, ponderirana metoda najmanjih kvadrata. Izbor pokriva puni raspon od najjednostavnijega interpretabilnog linearnog modela do fleksibilnih nelinearnih ansambala — što je upravo ona širina koju metodološka literatura preporučuje kad ne postoji apriorni razlog za vjerovanje jednoj obitelji (De Souza Groppo i sur., 2019; Antunes i sur., 2018) — a genealogija metoda seže od klasičnih temelja regresije do suvremenih ansambala stabala. Pregled svih šest obitelji — s ključnim postavkama pretrage hiperparametara i ulogom svake u usporedbi — daje tablica 4.6.

Tablica 4.6. Obitelji algoritama u usporedbi — ključne postavke pretrage i uloga svake obitelji

Obitelj	Ključne postavke pretrage	Uloga u usporedbi
obična metoda najmanjih kvadrata (OLS)	bez hiperparametara	interpretabilna referenca: koeficijenti s fizikalnim predznakom i veličinom; dijagnostika predznaka (otkriće artefakta materijala)
ponderirana metoda najmanjih kvadrata (WLS)	bez hiperparametara; težine prema shemi pouzdanosti iz pogl. 4.3.5	produkcijska metoda: linearni oblik spojen s eksplicitnim modelom pouzdanosti oznaka

Obitelj	Ključne postavke pretrage	Uloga u usporedbi
Ridge regresija	mreža regularizacijskog parametra po putanjama koeficijenata, pod grupiranom validacijom; pravilo jedne standardne pogreške	ispituje vrijednost L2 regularizacije — stabilizacija koeficijenata pri koreliranim značajkama
Lasso regresija	mreža regularizacijskog parametra po putanjama koeficijenata, pod grupiranom validacijom	ugrađena selekcija značajki: L1 kazna neinformativne koeficijente tjera točno na nulu
slučajne šume	broj stabala i dubina stabala po pogrešci izvan preklopa	detektor nelinearne strukture i interakcija; podloga permutacijske važnosti izvan preklopa
gradijentno pojačavanje	plitka stabla dubine 2, stopa učenja 0,03, poduzorkovanje 0,8	detektor nelinearnosti sa sekvencijalnom prilagodbom; namjerno konzervativne postavke primjerene veličini uzorka

Obična metoda najmanjih kvadrata služila je kao interpretabilna referenca. Koeficijenti linearnog modela nose fizikalni predznak i veličinu, zbog čega se svako neslaganje s FAVAD očekivanjima odmah vidi — upravo je ta prozirnost omogućila da se koeficijent materijala pogrešnog predznaka uopće otkrije i dijagnosticira (pogl. 5.4). Njezino poopćenje na opažanja nejednakih varijanci — minimizacija sume kvadrata ponderirane inverznim varijancama pogrešaka — klasični je rezultat Aitken (1936) i statistički temelj produkcijske WLS metode, čije su težine opisane u pogl. 4.3.5. Produkcijska uloga WLS metode nije proturječje sa širinom usporedbe nego njezin ishod. Linearni oblik pobjeđuje zato što pri ovoj veličini uzorka najbolje generalizira, ponderiranje zato što su oznake heteroskedastične i dijelom pristrane — a kombinacija tih dviju okolnosti upravo je definicija problema za koji je WLS klasično namijenjen. Praktična je posljedica i potpuna prenosivost — konačni je model zatvorena formula s dva koeficijenta, izračunljiva bez ikakve programske ovisnosti, što izravno omogućuje implementacije opisane u pogl. 6.3.

Ridge i Lasso regresija linearnom obliku dodaju regularizaciju — kaznu na veličinu koeficijenata — kao odgovor na temeljnu slabost najmanjih kvadrata pri koreliranim značajkama. Kada matrica značajki odstupa od ortogonalnosti, OLS procjene postaju nestabilne, koeficijenti neprirodno veliki, a njihova udaljenost od stvarnih vrijednosti raste s recipročnim najmanjim svojstvenim vrijednostima; dodavanjem male pozitivne veličine na dijagonalu normalnih jednadžbi dobiva se pristran, ali stabilniji procjenitelj — a teorem postojanja jamči da uvijek postoji regularizacijski parametar uz koji je srednja kvadratna pogreška pristranog procjenitelja manja od nepristranoga (Hoerl i Kennard, 1970). Izvorni rad nudi i dijagnostički alat, „ridge trace” — prikaz putanja koeficijenata preko raspona

regularizacije, s koje se očitava gdje se koeficijenti stabiliziraju i postaju fizikalno smisleni (Hoerl i Kennard, 1970). Taj je postupak konceptualni prethodnik Lassoova puta koeficijenata — praćenja načina na koji se koeficijenti mijenjaju s jačinom regularizacije — korištenoga u pogl. 4.3.4 za rangiranje značajki. To je kanonski primjer kompromisa pristranosti i varijance — malo pristranosti kupuje veliko smanjenje varijance. Lasso istu ideju provodi L1 kaznom, s kvalitativno drukčijim učinkom — neinformativni koeficijenti postaju točno nula, te metoda uz regularizaciju obavlja i selekciju varijabli (Tibshirani, 1996); u prostoru kandidata ovog istraživanja, gdje pet varijabli kodira međusobno korelirane aspekte intenziteta gubitaka, upravo je ta kombinacija stabilizacije i selekcije razlog uključivanja obiju metoda. Alternativa — diskretna selekcija najboljeg podskupa — namjerno nije korištena kao primarna metoda. Diskretni proces u kojem se varijable ili zadržavaju ili odbacuju vrlo je varijabilan, male promjene podataka daju bitno različite modele, dok su regularizacijski putovi kontinuirani i stabilni (Tibshirani, 1996; Hastie i sur., 2009) — na uzorku ove veličine ta razlika nije akademska. Simulacijski nalazi iz izvorne literature daju i heuristiku očekivanja, prema kojoj je Lasso najbolji pri malom do umjerenom broju umjerenih efekata, Ridge pri velikom broju malih efekata, a diskretna selekcija podskupa pri malom broju velikih (Tibshirani, 1996) — konfiguracija ovog problema, s jednim ili dva dominantna efekta intenziteta gubitaka, bliska je prvom scenariju.

Slučajne šume i gradijentno pojačavanje nelinearni su ansambli regresijskih stabala, uključeni s preciznom ulogom: testirati postoji li ikakva nelinearna struktura ili interakcija koju bi linearni oblik propustio — a njihov slabiji rezultat pod strogom validacijom, očekivan pri ovoj veličini uzorka, sam je po sebi nalaz s vlastitom dokaznom vrijednošću jer informaciju koju značajke kampanje nose o eksponentu u cijelosti obuhvaća već jednostavan monotoni odnos. Gradivni blok obiju metoda jest regresijsko stablo CART metodologije — rekurzivna particija prostora značajki s konstantnom predikcijom po ćeliji, prilagođena kriterijem najmanjih kvadrata — čija je snaga upravo u nehomogenim podacima, gdje veze među varijablama nisu iste u svim dijelovima prostora (Breiman i sur., 1984). Slučajna šuma agregira mnogo stabala treniranih na uzorcima izvučenima ponovljenim uzorkovanjem s vraćanjem (engl. *bootstrap*) uz slučajni odabir kandidatskih varijabli po čvoru; njezina generalizacijska pogreška konvergira s brojem stabala — stoga dodavanje stabala ne prenaučuje — a za regresiju vrijedi granica po kojoj je pogreška ansambla najviše jednaka pogrešci pojedinačnog stabla pomnoženoj srednjom korelacijom njihovih reziduala, što dekorelaciju čini samim mehanizmom metode. Ansambl je dobar onoliko koliko su mu članovi točni i međusobno različiti (Breiman, 2001). Literaturna

analiza varijance ansambla istu poruku daje u zatvorenom obliku — varijanca prosjeka B stabala s međusobnom korelacijom reziduala $\bar{\rho}$ i varijancom σ^2 iznosi:

$$\bar{\rho}\sigma^2 + ((1 - \bar{\rho})/B) \cdot \sigma^2 \quad (4.5)$$

S rastom broja stabala B u jedn. (4.5) preostaje samo korelacijski član $\bar{\rho}\sigma^2$ (Hastie i sur., 2009), a broj slučajno ponuđenih varijabli po čvoru upravo je poluga kojom se korelacija snižava. Gradijentno pojačavanje stabla gradi sekvencijalno, svako prilagođeno negativnom gradijentu funkcije gubitka prethodnog ansambla, uz dva regularizacijska parametra — broj stabala i stopu učenja — čije malene vrijednosti uz više stabala daju sustavno bolju generalizaciju (Friedman, 2001). Opći okvir gradijentnog pojačavanja dopušta i izbor funkcije gubitka — kvadratne, apsolutne ili Huberove — čime se robusnost na ekstremne vrijednosti ugrađuje u samo treniranje (Friedman, 2001); ta se mogućnost prirodno slaže s izborom MAE mjere iz pogl. 4.3.6, jer apsolutni gubitak trenira upravo ono što se ocjenjuje. U ovom istraživanju korištena su namjerno konzervativna, plitka stabla pojačavanja (dubine 2, stopa učenja 0,03, poduzorkovanje 0,8), primjerena veličini uzorka; u literaturi je uobičajena napomena da zadane vrijednosti hiperparametara ansambala treba tretirati kao parametre za podešavanje, a ne kao univerzalne konstante (Hastie i sur., 2009). Odnos dviju metoda ansambla dobro je dokumentiran u literaturi. Slučajne šume rade izvanredno dobro uz vrlo malo podešavanja i djeluju prvenstveno na varijancu, dok pojačavanje — koje smanjuje i pristranost i varijancu — uz pažljivo podešavanje na dijelu problema nadmašuje šume, ali je osjetljivije na izbor hiperparametara (Hastie i sur., 2009; Breiman, 2001). Za ovaj problem obje su metode uključene s istom ulogom detektora nelinearnosti; dublje arhitekture, poput neuronskih mreža, nisu razmatrane kao kandidati jer pri 143 trening zone nemaju statističke osnove — pouka koju pregledana literatura dokumentira i empirijski, od pada dubokih modela u prenaučenost na malim skupovima (Oğuz i Ertuğrul, 2023) do nalaza da više skrivenih slojeva na ograničenom uzorku pogoršava rezultate (Robles-Velasco i sur., 2021b).

Uloga plitkoga klasifikacijskog stabla u otkrivanju pravila kvalitete (pogl. 4.2.3) izdvojena je od uloge ansambala. Ondje stablo ne predviđa eksponent, nego izvlači čitljiva pravila s pragovima koja razdvajaju pouzdana od nepouzdanih mjerenja — u skladu s izvornim dvojnim ciljem CART metodologije, točnom predikcijom i uvidom u prediktivnu strukturu podataka (Breiman i sur., 1984).

Svih šest obitelji natjecalo se pod jednim, identičnim protokolom: treniranje na 188 fizikalno vjerodostojnih zapisa, ponderiranje pouzdanosti, unakrsna validacija s pet preklopa grupirana

po mjernim zonama te ocjena naspram dviju naivnih referenci, uz mjere iz pogl. 4.3.6. Kandidati su uz pojedinačne varijable uključivali i logaritamske transformacije, kombinacije varijabli te ansamble sa svih jedanaest značajki kampanje odjednom; struktura kandidatske liste pritom je namjerno pratila scenarije primjene — model samo s ILI ulazom za krajnjeg korisnika koji raspolaže vodnom bilancom, model samo s postotkom gubitaka za čisto uredsku procjenu, hibridni modeli s kombinacijama statistika kampanje — stoga usporedba algoritama ujedno odgovara i na praktično pitanje koliko točnosti donosi svaka razina raspoloživih podataka (pogl. 5.1). Logaritamski oblik $\ln(1 + x)$ za varijable intenziteta gubitaka zaslužuje kratko obrazloženje. Transformacije varijabli velikog raspona standardna su praksa obrade (Robles-Velasco i sur., 2021a), a ovdje logaritam kodira i fizikalno očekivanje opadajućega graničnog informacijskog sadržaja — razlika između gustoće gubitaka 0,01 i 0,05 govori o režimu zone više nego razlika između 0,20 i 0,24 — dok pomak za jedinicu osigurava definiranost u nuli; bitno je da se transformacija primjenjuje na značajke, a sve mjere uspješnosti računaju na izvornoj skali cilja (pogl. 4.3.6). Usporedba algoritama nije bila jednokratani čin nego okosnica kontroliranog razvoja, u kojem je model kroz verzije v1 do v4.0 mijenjan isključivo kad se promijenila pretpostavka o dostupnosti podataka u primjeni ili kad je dijagnosticirana pristranost — dok su trening podaci, filtar vjerodostojnosti, grupirana validacija i ograničenja izlaza držani fiksima cijelo vrijeme — te je povijest verzija kontrolirani zapis o tome kako pretpostavka o primjeni oblikuje model (pogl. 5.1). Dvije konstante tog zapisa same su po sebi metodološki nalazi — materijal cijevi testiran je u svakoj verziji i svaki put odbačen zbog istog artefakta pogrešnog predznaka, a modeli bez ikakve informacije o gubicima nikad nisu nadmašili naivne reference. Detaljni rezultati usporedbe — uključujući tablicu kandidata i njihovih pogrešaka — prikazani su u pogl. 5.1 i 5.2, a usporedni rezultati svih obitelji iskazani su u tablici 5.1 u pogl. 5.1; no jedan opći nalaz pripada metodologiji jer potvrđuje njezin temeljni postulat. Pod strogo grupiranom validacijom pri 143 trening zone nelinearni ansambli nikad nisu nadmašili dvoulazni (u konačnici jednoulazni) linearni model — fleksibilnost pri ovoj veličini uzorka košta više nego što donosi, zbog čega je parsimonija konačnog modela statistička nužnost, a ne stilski izbor. Taj je ishod u skladu i s obrascem uočenim u pregledanoj literaturi, gdje pažljivo primijenjeni jednostavni modeli na malim i šumovitim skupovima redovito dostižu ili nadmašuju složene (Vries i sur., 2016; Robles-Velasco i sur., 2021a; Oğuz i Ertuğrul, 2023). Dodatni dokaz pouzdanosti pobjedničkoga linearnog oblika jest stabilnost njegovih koeficijenata. Procijenjeni nagibi zadržavaju predznak u svakom preklopu unakrsne validacije, uz tek umjerene varijacije veličine — svojstvo koje model s dva (u konačnici jednim) parametrom pri ovoj veličini uzorka mora pokazati da bi mu se vjerovalo.

Hiperparametri svih metoda podešavani su unutar istoga grupiranog validacijskog protokola — regularizacijski parametri Ridge i Lasso regresije po putanjama koeficijenata, parametri ansambala po pogrešci izvan preklopa — uz pravilo jedne standardne pogreške kao kriterij štedljivosti gdje god je krivulja pogreške bila ravna (Hastie i sur., 2009). Time je izbjegnut i drugi, suptilniji oblik curenja. Podešavanje hiperparametara na cijelom skupu s validacijom na njemu istom precijenilo bi svaku fleksibilniju metodu, i to selektivno — upravo one metode s više parametara za podešavanje — čime bi usporedba obitelji bila sustavno iskrivljena u korist složenosti (Kaufman i sur., 2012).

Sažeto, podjela uloga među obiteljima glasi: OLS daje interpretabilnu referencu i dijagnostiku predznaka; Ridge i Lasso ispituju vrijednost regularizacije i obavljaju ugrađenu selekciju; slučajne šume i gradijentno pojačavanje ispituju postojanje nelinearne strukture; plitko klasifikacijsko stablo izvlači pravila kvalitete podataka; a ponderirana metoda najmanjih kvadrata, kao produkcijska, spaja linearni oblik s eksplicitnim modelom pouzdanosti oznaka. Nijedna obitelj nije uključena „radi popisa” — svaka odgovara na jedno definirano metodološko pitanje, a odgovori zajedno određuju konačni oblik modela u pogl. 5.

Završna metodološka napomena tiče se interpretacije ansambala tamo gdje su korišteni. Za slučajne šume i gradijentno pojačavanje uspješnost i važnost značajki iskazane su isključivo iz vrijednosti izvan preklopa, a ne iz internih procjena poput pogreške na izostavljenim uzorcima. Interna procjena slučajne šume računa se nad uzorcima pojedinačnih zapisa izvučenima s vraćanjem te ne poštuje grupiranje po zonama — dijelila bi zapise iste zone između treninga i procjene, s istim curenjem koje je pogl. 4.3.1 isključilo iz validacije. Dosljednost protokola preko svih obitelji modela — iste grupe, iste težine, iste mjere — jedino je što usporedbu algoritama čini nepristranom; svaki drugi izbor mjerio bi razlike protokola, a ne razlike modela. Time je metodološki okvir zaokružen. Sljedeće poglavlje prikazuje što je pod njim izmjereno — kontrolirani razvoj modela od prve do konačne verzije, njegovu validiranu uspješnost i granice unutar kojih mu se smije vjerovati. Cjelovit pregled svih statističkih, analitičkih i metoda strojnog učenja korištenih u istraživanju, s ulogom i mjestom primjene, daje tablica 4.7.

Tablica 4.7. Pregled statističkih, analitičkih i metoda strojnog učenja korištenih u istraživanju

Metoda	Kategorija	Uloga u istraživanju	Primjena (pogl.)
Obični najmanji kvadrati (OLS)	statistička regresija	kandidatski linearni oblik u usporedbi	4.4; 5.1
Ponderirani najmanji kvadrati (WLS)	statistička regresija	prilagodba svih verzija modela v1–v4.0 s težinama pouzdanosti	4.3.5; 5.1–5.2

Metoda	Kategorija	Uloga u istraživanju	Primjena (pogl.)
Ridge regresija	strojno učenje (regularizirana regresija)	kandidat; kontrola prenaučivosti (L2)	4.4; 5.1
Lasso regresija	strojno učenje (regularizirana regresija)	kandidat; ugrađeni odabir značajki (put koeficijenata)	4.3.4; 4.4; 5.1
Slučajne šume (engl. <i>random forest</i>)	strojno učenje (ansambl)	kandidat; permutacijska važnost značajki	4.3.4; 4.4; 5.1
Gradijentno pojačavanje (engl. <i>gradient boosting</i>)	strojno učenje (ansambl)	kandidat; permutacijska važnost izvan preklopa	4.3.4; 4.4; 5.1
Plitko stablo odlučivanja (engl. <i>decision tree</i>)	strojno učenje	otkrivanje pravila kvalitete u probiru zapisa	4.2.3
Metoda k-srednjih vrijednosti (engl. <i>k-means</i>)	strojno učenje (nenadzirano)	klusterski eksperiment provjere prenosivosti (tri klastera, bez državnih oznaka)	5.3.1
Unakrsna validacija grupirana po mjernim zonama, 5 preklopa (engl. <i>grouped k-fold cross-validation</i>)	validacijski protokol	sve evaluacije kandidata i verzija	4.3.1
Validacija izostavljanjem po jedne države (engl. <i>leave-one-country-out</i>)	validacijski protokol	granice generalizacije	5.3.1
Validacija izostavljanjem po jedne zone (engl. <i>leave-one-DMA-out</i>)	validacijski protokol	usporedba modela na teorijski konzistentnom podskupu	5.4.1
Postupno uključivanje značajki uz pravilo jedne standardne pogreške (engl. <i>forward selection; one-standard-error rule</i>)	odabir značajki (omotački)	optimizacija broja ulaza	4.3.4
Spearmanova korelacija ranga	statistički test	filtrarski probir značajki; dijagnoza plastičnih zona	4.3.4; 5.4.2
Mann–Whitneyjev U-test	statistički test	neparametarska usporedba razdioba eksponenta među podskupovima	4.3.4
Percentilni interval predviđanja, 10.–90. percentil (engl. <i>percentile prediction interval</i>)	statistička metoda	80-postotni interval predviđanja iz reziduala izvan preklopa	4.3.6; 5.2.2
Medijalna imputacija s naknadnom revizijom (engl. <i>median imputation</i>)	obrada podataka	nedostajući WL; utvrđen i uklonjen imputacijski artefakt	4.2.3; 5.1
Naivne referentne vrijednosti — prosjek; konstanta N1 = 1,0 (engl. <i>naive baseline</i>)	referentni modeli	prag smislenosti svakoga kandidata	4.3.3

Metoda	Kategorija	Uloga u istraživanju	Primjena (pogl.)
Logaritamska transformacija $\ln(1 + 100 \cdot LD)$	analitička transformacija	linearizacija odnosa gustoće gubitaka i eksponenta	4.4; 5.2.1
Teorijska FAVAD krivulja s pojasom prihvaćanja $\pm 16\%$	analitički model	konstrukcija teorijski konzistentnog podskupa; usporedni model	5.4.1
Granična krivulja materijala (po dijelovima linearna)	analitički model	teorijska procjena razine 2	5.2.3

Napomena: kategorije prate podjelu iz pogl. 2.4; metode validacijskih protokola i referentnih modela nisu prediktivni modeli, nego okvir kojim se prediktivni modeli ocjenjuju.

5. Razvoj i rezultati modela

5.1. Razvoj modela (v1 → v4.0)

Ovo poglavlje iznosi rezultate istraživanja dobivene pod metodološkim okvirom iz pogl. 4: razvoj modela kroz kontrolirani slijed verzija (pogl. 5.1), specifikaciju i validaciju konačnog modela v4.0 (pogl. 5.2), analizu značajki s fizikalnom interpretacijom uloge cijevnog materijala (pogl. 5.4), protokolarni pojas tlačnog koraka kao samostalan doprinos (pogl. 5.4.3) te kvantifikaciju granica generalizacije (pogl. 5.3). Razvoj modela vođen je kao nadzirani, dokumentirani zapis. Između verzija mijenjala se točno jedna pretpostavka — o dostupnosti podataka u primjeni ili o postupanju s utvrđenom pristranošću mjernih podataka — dok su trening podaci, filter vjerodostojnosti, validacijski protokol grupiran po mjernim zonama i ograničenje izlaza na fizikalni raspon držani fiksnima kroz sve verzije. Povijest verzija time nije administrativna evidencija nego kontrolirani eksperiment o tome kako definicija scenarija primjene oblikuje analitički model — svaka je verzija odgovor na precizniju formulaciju pitanja koji će podaci budućoj zoni stvarno biti dostupni. Rezultati poglavlja pritom nisu jedan nego četiri zasebna proizvoda istraživanja: konačni prediktivni model s kvantificiranom nesigurnošću i dvorazinskom shemom procjene (pogl. 5.2), spoznaja o uvjetnoj, graničnoj ulozi cijevnog materijala koja razrješava prividno proturječje između FAVAD teorije i regresijskih nalaza (pogl. 5.4), protokolarni pojas tlačnog koraka primjenjiv neovisno o modelu (pogl. 5.4.3) te kvantificirana granica valjanosti uz definiran postupak lokalne prilagodbe modela s najmanje dvama mjerenjima (pogl. 5.3) — stoga se poglavlje čita i kao dokazna građa doprinosa najavljenih u pogl. 1.5, čija je formalna provjera naspram hipoteza provedena u pogl. 6.1.

Polazište razvoja kvantificirano je eksplorativnom fazom, čiji je dijagnostički dio prikazan u pogl. 4.2.3. Na fizikalno vjerodostojnim zapisima najbolji modeli postižu skromno, ali stvarno poboljšanje od 8 do 10 % u MAE naspram stalnog pogađanja prosjeka, s tipičnom pogreškom predviđanja od $\pm 0,34$ u jedinicama eksponenta, dok je naizgled snažan koeficijent determinacije od 0,34 na neočišćenim podacima razotkriven kao učenje mjernog šuma. Te dvije brojke određuju referentni okvir svega što slijedi — svaka verzija modela mora pokazati da poboljšanje naspram naivnih referenci opstaje pod grupiranom validacijom, a smanjenje tipične pogreške ispod $\pm 0,34$ mora dolaziti od kvalitetnijeg korištenja informacije, a ne od popustljivijeg protokola. Vrijedi ponoviti da je pod istim protokolom i postupno uključivanje značajki (pogl. 4.3.4) pokazalo gotovo ravnu krivulju pogreške po broju značajki — najbolji

model s devet značajki postiže MAE $0,331 \pm 0,044$, statistički nerazlučivo od znatno manjih skupova — te je prostor u kojem se razvoj odvijao od početka bio prostor štedljivih modela.

Eksplorativni scenariji ujedno kalibriraju očekivanja o tome što čišćenje podataka čini objema stranama usporedbe — i modelu i referenci. Na svih 217 zapisa najbolji eksplorativni model postiže MAE 0,64 naspram referentnih 0,72; na 188 fizikalno vjerodostojnih zapisa 0,35 naspram 0,38; a uz dodatni zahtjev relativnog koraka od najmanje 10 % (181 zapis) 0,34 naspram 0,37. Dvije su pouke tog niza. Prva je da filter vjerodostojnosti prepolavlja apsolutne pogreške obje strane — i modela i naivne reference — jer uklanja ekstremne ciljane vrijednosti koje su obje strane jednako nemoćne pogoditi; apsolutni pad pogreške stoga nije zasluga modela nego kvalitete mjera, i upravo zato se svaka verzija modela u nastavku ocjenjuje relativno, naspram referenci pod identičnim protokolom (pogl. 4.3.3). Druga je pouka da razmak između modela i reference — jedini dio koji mjeri stvarnu informaciju značajki — ostaje razmjerno uzak i stabilan preko scenarija. Značajke kampanje nose stvaran, ali ograničen signal, čiju gornju granicu postavlja mjerni šum ciljnih vrijednosti (pogl. 4.3.6). Razvoj modela stoga nije mogao ciljati na izrazito smanjenje pogreške, nego na tri druga cilja: da se ograničeni signal iskoristi do kraja, da se ne razmijeni za prividnu točnost naučenu iz šuma i da konačni oblik bude primjenjiv na podacima koje buduća zona stvarno ima. Upravo su ta tri cilja redom oblikovala tri redefinicije ulaza, korekciju pristranosti i prag primjene koji čine razvojni slijed.

Prije prikaza pojedinačnih koraka valja precizirati što je u razvoju bilo fiksno, jer upravo fiksni elementi daju slijedu verzija dokaznu strukturu kontroliranog eksperimenta. Kroz sve verzije nepromijenjeni su ostali: trening skup od 188 fizikalno vjerodostojnih zapisa (do dopune baze u v4.0, koja je dokumentirana kao zaseban događaj s vlastitom revizijom), filter vjerodostojnosti s granicama 0,2 i 2,6, unakrsna validacija s pet preklopa grupirana po zonama s istim podjelama, ograničenje izlaza na fizikalni raspon te definicije svih mjera uspješnosti i evaluacijskih podskupova. Kada se između dviju verzija mijenja točno jedna pretpostavka, svaka promjena rezultata jednoznačno se pripisuje toj pretpostavci — bez fiksiranja ostalih elemenata, usporedba verzija bila bi zbrka istodobnih promjena u kojoj se učinci ne mogu razdvojiti. Ta disciplina ima i svoju cijenu, koja je svjesno plaćena. Fiksni protokol znači da se tijekom razvoja nisu smjele prigodno iskoristiti prilike za poboljšanje evaluacije — svaka takva promjena zahtijevala bi ponovno ocjenjivanje svih prethodnih verzija, zbog čega je registar odluka (pogl. 4.1) bilježio i odluke o tome što se ne mijenja.

Prvi sustavni korak razvoja bila je usporedna evaluacija svih kandidatskih ulaza dostupnih iz mjerne kampanje pod jedinstvenim protokolom: treniranje na 188 fizikalno vjerodostojnih

zapisa, ponderiranje pouzdanosti prema pogl. 4.3.5 i unakrsna validacija s pet preklopa grupirana po mjernim zonama. Kandidati su obuhvaćali ILI, noćne gubitke L_0 , osnovni tlak P_0 , gubitke vode WL, normalizirane statistike gubitaka Q_{rl}/km , Q_{rl}/SC i LD s logaritamskim transformacijama, udjele cijevnog materijala i imovinske statistike, te — kao provjeru postojanja nelinearne strukture — slučajnu šumu i gradijentno pojačavanje sa svim značajkama odjednom. Rezultati usporedbe sažeti su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Usporedna evaluacija kandidatskih ulaza pod grupiranom unakrsnom validacijom

Kandidat (unakrsna validacija s pet preklopa, grupirana po mjernim zonama)	Broj ulaza	MAE, svi vjerodostojni	MAE, kvalitetno filtrirani	R^2
Referenca: predvidi prosjek	0	0,378	0,298	—
Referenca: $N1 = 1,0$ posvuda	0	0,380	0,311	—
$\ln(1+ILI)$ sam (model v1)	1	0,343	0,248	+0,16
WL sam (model v2)	1	0,337	0,233	+0,09
$\ln LD$ sam	1	0,342	0,229	+0,12
WL + $\ln(1+ILI)$	2	0,342	0,244	+0,17
WL + P_0	2	0,339	0,232	+0,09
Random Forest, svih 11 značajki kampanje	11	0,346	0,255	+0,09
Konačni hibrid: WL + $\ln LD$ (v3.1 težine)	2	0,346	0,229	+0,11

Napomena: "Broj ulaza = 1" za kandidate s LD čita se uz ogradu da je LD izvedena iz L_0 , L_m i P_0 .

Izvor: master izvješće (N1_master_report_HR), Odjeljak 12 (model_comparison.csv).

Tablica 5.1 čita se po stupcu kvalitetno filtriranih zapisa, jer je — kako je obrazloženo u pogl. 4.3.6 — jedino taj podskup mjerodavno mjerilo budući da samo ondje izmjerene ciljne vrijednosti zaslužuju status istine prema kojoj se pogreška računa. Naivne reference postavljaju prag — predviđanje prosjeka uzorka postiže MAE 0,378 na svim vjerodostojnim zapisima i 0,298 na kvalitetno filtriranim, a industrijsko pravilo $N1 = 1,0$ posvuda 0,380 odnosno 0,311. Pojedinačni ulazi nadmašuju reference redom. Tako $\ln(1 + ILI)$ sam postiže 0,343 odnosno 0,248, WL sam 0,337 odnosno 0,233, a $\ln LD$ sam 0,342 odnosno 0,229 — već ovdje je vidljivo da statistike intenziteta gubitaka nose glavninu raspoložive informacije, u skladu s trianguliranom analizom značajki (pogl. 5.4). Parovi ulaza ne donose proboj. WL + $\ln(1 + ILI)$ daje 0,342 odnosno 0,244, WL + P_0 0,339 odnosno 0,232 — potonji rezultat izravno potvrđuje da sirovi osnovni tlak ne dodaje informaciju povrh svoje uloge unutar normalizacije LD. Slučajna šuma sa svih jedanaest značajki kampanje postiže 0,346 odnosno 0,255 — lošije od najboljih linearnih oblika s jednim ili dva ulaza jer pri 143 trening zone fleksibilnost nelinearnog ansambla košta više nego što donosi, čime je logika kompromisa pristranosti i

varijance (pogl. 4.1) potvrđena na vlastitim podacima. Kao radni oblik razvojne faze usvojen je hibrid WL + ln LD, koji uz težine s ispravkom za pristranost postiže 0,346 odnosno 0,229 — najbolju kvalitetno filtriranu točnost od svih ispitanih konfiguracija. Dva ulaza hibrida hvataju komplementarne aspekte iste fizike — WL mjeri udio isporučene vode koji se gubi, a LD gustoću gubitka po jedinici mreže i tlaka. Koeficijenti su pritom stabilni — oba negativna u svakom preklopu unakrsne validacije, uz umjerene varijacije — što je pri ovoj veličini uzorka nužan dokaz pouzdanosti prilagodbe. U tablici se ne pojavljuju razvojne verzije v3.2 i v4.0 jer one ne uvode novi kandidatski ulaz — v3.2 je v3.1 dopunjena pragom primjene (odlukom o tome kada se model smije koristiti, bez ponovne prilagodbe), a v4.0 je najbolji jednoulazni kandidat iz ove tablice, ponovno prilagođen bez imputiranih zapisa. Njihov je razvojni slijed stoga iskazan u tablici 5.2.

Uz stupce apsolutne pogreške, tablica 5.1 iskazuje i koeficijent determinacije, čije vrijednosti — od +0,09 do +0,17 preko svih kandidata — zaslužuju kratko čitanje u svjetlu pogl. 4.3.6. Nizak i međusobno sličan R^2 svih konfiguracija nije znak da su modeli podjednako loši, nego da svi rade uz istu gornju granicu mjernog šuma. Većina varijance izmjenjenog eksponenta koju nijedan kandidat ne objašnjava nije objašnjiva ni u načelu, jer pripada pogrešci samih terenskih testova. Znakovito je da poredak kandidata po R^2 ne prati poredak po kvalitetno filtriranom MAE — par WL + ln(1 + ILI) ima najviši R^2 (+0,17), a osjetno lošiji filtrirani MAE od hibrida — što na vlastitim podacima demonstrira zašto koeficijent determinacije nije smio biti kriterij izbora jer nagrađuje objašnjavanje varijance ondje gdje je varijanca najveća, dakle i u šumovitim ekstremima, dok apsolutna pogreška na pouzdanim ciljevima mjeri ono što primjena treba. Cijela je usporedba pritom provedena uz iste evaluacijske uvjete za sve kandidate — svaki je prilagođen i ocijenjen s istim v3.1 težinama s ispravkom za pristranost — stoga razlike u točnosti mogu potjecati samo od izbora ulaznih veličina, ne od sheme ponderiranja. Isto načelo fiksnih uvjeta, po kojem se mijenja jedna odluka dok sve ostale miruju, pogl. 4.3.5 primijenilo je u suprotnom smjeru: na usporedbu shema ponderiranja uz nepromijenjen izbor ulaza.

U usporedbi je sudjelovalo svih šest obitelji algoritama uvedenih u pogl. 4.4, svaka u ulozi za koju je teorijski prikladna, i ishod te podjele uloga sam je po sebi rezultat. Obična metoda najmanjih kvadrata odigrala je ulogu interpretabilne reference do kraja — upravo je prozirnost njezinih koeficijenata omogućila da se koeficijent materijala pogrešnog predznaka uopće opazi i pretvori u istraživačko pitanje (pogl. 5.4.2). Lasso je odigrao ulogu ugrađene selekcije. Njegovo poništavanje svih koeficijenata osim članova intenziteta gubitaka bilo je neovisan

dokaz redundantnosti ulaznog prostora. Slučajna šuma i gradijentno pojačavanje imali su ulogu detektora nelinearne strukture — i nisu je detektirali, budući da nijedna konfiguracija stabala ni ansambala nije pod grupiranom validacijom nadmašila dvoulazni linearni oblik, što pri 143 trening zone nije neuspjeh metoda nego nalaz o podacima, dokumentiran u registru odluka kao samostalan rezultat. Plitko stablo odlučivanja poslužilo je izvan prediktivne uloge, za izvlačenje čitljivih pravila kvalitete (pogl. 4.2.3). A ponderirana metoda najmanjih kvadrata, kao produkcijska metoda, prevladala je iz razloga koji se mogu navesti taksativno. Linearni oblik generalizira najbolje pri ovoj veličini uzorka, a ponderiranje je jedini mehanizam kojim se heteroskedastičnost i usmjerena pristranost oznaka mogu uvažiti bez odbacivanja podataka — kombinacija koja je upravo definicija problema za koji je taj klasični procjenitelj namijenjen (pogl. 4.3.5).

Uz usvojeni model, tablica 5.1 dokumentira i tri namjerna isključenja, svako s obrazloženjem koje je postalo sastavnim dijelom nalaza istraživanja. Prvo, ILI ne ulazi u konačne oblike jer ne dodaje ništa kad su WL i LD prisutni. Sva tri kodiraju intenzitet gubitaka, a LD je po konstrukciji po kilometru mreže iskazan, tlakom normaliziran srodnik ILI-jeve UARL normalizacije (pogl. 2.1), stoga par WL + LD pokriva signal. Drugo, udjeli cijevnog materijala odbačeni su i u ovoj rundi — treći put zaredom u istraživanju — jer je procijenjeni koeficijent opet bio zanemariv do negativan, u proturječju s FAVAD fizikom; modelu koji takav koeficijent sadrži ne može se vjerovati pri ekstrapolaciji, a uzrok artefakta razriješen je kontroliranom dijagnozom u pogl. 5.4.2. Treće, sirovi P_0 isključen je nakon što je dvaput testiran s koeficijentom koji kolabira na nulu — tlak informaciju o eksponentu nosi kroz normalizaciju gubitaka po jedinici tlaka, ne sam po sebi. Teorijska krivulja materijala iz analize pojasa (pogl. 5.4.1) ostaje pritom dostupna kao neovisna, komplementarna procjena ondje gdje postoji pouzdan katastar materijala — najbolje čitana kao gornja granica za sustave kojima dominiraju pozadinski gubici.

Ponašanje radnog hibrida preko raspona pogonskih stanja najlakše se vidi na ilustrativnim predviđanjima, dokumentiranima za razvojno stanje v3.2. Zona s gubicima vode od 20 % i gustoćom gubitaka 0,01 dobiva procjenu eksponenta 1,32; zona s 40 % i 0,05 procjenu 1,06; zona sa 60 % i 0,10 procjenu 0,89; a zona s 80 % i 0,20 procjenu 0,72. Niz vjerno reproducira FAVAD očekivanje iz pogl. 2.2 — uredna zona s niskim gubicima ponaša se kao sustav kojim dominira pozadinsko istjecanje promjenjive površine i dobiva visok eksponent, a zona kojom dominiraju puknuća dobiva eksponent koji klizi prema 0,5. Praktična težina te razlike izravna je. Pri smanjenju tlaka od 10 % zona s eksponentom 1,5 štedi približno 15 % gubitaka, a zona

s eksponentom 0,5 približno 5 % (pogl. 2.2.2) — zbog čega upravo raspon predikcija od 0,72 do 1,32 razdvaja zone u kojima je upravljanje tlakom izrazito isplativo od onih u kojima prednost treba dati traženju i sanaciji kvarova. Postignuta točnost dostatna je za rangiranje zona pri planiranju ulaganja u upravljanje tlakom. Za konačni jednoulazni oblik ilustracija je još jednostavnija. Budući da v4.0 ne ovisi o gubicima vode, njegova se cijela funkcija predviđanja može prikazati jednostavnom tablicom za očitavanje — nizom vrijednosti LD s pripadnim predviđenim N1, kako je i izvedeno u primjenskom kalkulatoru za raspon LD od 0,01 do 0,20 (pogl. 6.3) — stoga korisnik ponašanje modela može pregledati u cijelosti prije nego što mu povjeri ijednu odluku; malo koja metoda strojnog učenja dopušta takvu potpunu inspekciju svoje funkcije predviđanja.

Kronologija verzija, sažeta u tablici 5.2, dokumentira kako se od radnog hibrida došlo do konačnog modela. Svaku verziju pokrenuo je jedan dokumentirani povod, a svaka je promjena ostavila revizijski trag u registru metodoloških odluka (pogl. 4.1). Tablica uz svaku verziju navodi pretpostavku primjene koja ju je definirala, ulaze, potpunu formulu s koeficijentima i validiranu točnost na kvalitetno filtriranim podacima — a upravo stupac pretpostavki nosi njezin glavni sadržaj. Stupci formula i točnosti pokazuju da se kroz šest verzija formula mijenjala umjereno, a točnost jedva, dok se pretpostavka primjene izoštravala korak po korak; stabilnost brojki pri promjenjivim pretpostavkama znak je da je signal u podacima robustan, a da je stvarni predmet razvoja bio pronaći oblik koji taj signal čini dostupnim iz podataka koje buduća zona stvarno ima.

Tablica 5.2. Razvoj modela v1 → v4.0 — povod, ulazi, formula i validirana točnost svake verzije

Verzija	Povod / pretpostavka primjene	Ulazi	Formula	MAE (kvalitetno filtrirani podaci)
v1	ILI pretpostavljen dostupnim iz godišnje vodne bilance	ILI	$N1 = 1,4009 - 0,1552 \cdot \ln(1+ILI)$	0,248
v2	Ispravak: bez ikakvog terenskog rada, samo uredski podaci	WL %	$N1 = 1,6458 - 0,0098 \cdot WL$	0,233
v3	Pojašnjenje: mjerna kampanja da, PRV test koraka ne (hibrid)	WL %, LD	$N1 = 1,4435 - 0,0030 \cdot WL - 0,1608 \cdot \ln(1+100 \cdot LD)$	0,229
v3.1	Dijagnoza plastičnih zona: duboki koraci pristrani prema dolje → trening težine s ispravkom za pristranost	WL %, LD	$N1 = 1,5062 - 0,0032 \cdot WL - 0,1753 \cdot \ln(1+100 \cdot LD)$	0,229
v3.2	Eksperiment predkvalifikacije → dodan prag primjene (bez promjene koeficijenata)	WL %, LD	kao v3.1, s pragom primjene	0,229
v4.0	Dopunjena baza v02 → ponovna prilagodba bez imputacije; koeficijent WL pokazan kao imputacijski artefakt; dodan dvorazinski izlaz	LD	$N1 = 1,3375 - 0,2187 \cdot \ln(1+100 \cdot LD)$	0,230

Prva verzija (v1) počivala je na pretpostavci da je ILI dostupan uredski, iz godišnje vodne bilance operatera — pretpostavci razumnoj za sustave s urednim izvještavanjem prema IWA metodologiji (pogl. 2.1). Model je glasio $N1 = 1,4009 - 0,1552 \cdot \ln(1 + ILI)$, s validiranom točnošću $MAE = 0,248$ na kvalitetno filtriranim podacima. Pretpostavka se, međutim, pokazala neodrživom za samu bazu. Provenijencijska analiza (pogl. 4.2.2) utvrdila je da ILI u ovoj bazi potječe iz istih mjernih kampanja kao i ostale statistike gubitaka, a ne iz godišnjih bilanci — što znači da model koji ILI tretira kao uredski podatak implicitno pretpostavlja teren koji je trebao izbjeći. Druga verzija (v2) stoga je pooštrila pretpostavku do kraja: nikakav terenski rad, isključivo uredski podaci. Preživjeli ulaz bili su gubici vode kao postotak ulaznog volumena, s modelom $N1 = 1,6458 - 0,0098 \cdot WL$ i točnošću $MAE = 0,233$ — neočekivano konkurentnom, koja je u tom trenutku sugerirala da i najjednostavniji uredski podatak nosi glavninu dostupnog signala. Upravo će ta verzija kasnije dobiti drugačije tumačenje. Revizija na dopunjenoj bazi (v4.0) pokazala je da je dio gradijenta WL varijable bio imputacijski artefakt, te je i v2 rezultat dijelom počivao na fiktivnim vrijednostima — pouka o tome da se kronologija razvoja mora čitati zajedno s revizijama podataka koje su je pratile.

Prijelaz s v1 na v2 vrijedi zabilježiti i kao obrazac zaključivanja, jer se u njemu prvi put pokazala metodološka vrijednost stroge definicije scenarija primjene. Pitanje „koji će podaci budućoj zoni biti dostupni” nije statističko nego operativno, i na njega ne odgovara nijedna mjera uspješnosti — model v1 bio je pod validacijom posve ispravan, a ipak neupotrebljiv, jer je pretpostavljao ulaz koji ciljna primjena nema. Redefinicija ulaznog prostora — a ne poboljšanje algoritma — bila je ispravan odgovor, i taj se obrazac ponovio u svakoj sljedećoj verziji. Nijedan prijelaz u razvojnem slijedu nije potaknut potragom za nižom pogreškom, nego preciznijim odgovorom na pitanje što model smije znati i čemu smije vjerovati. U tom je smislu razvojni slijed operacionalizacija zahtjeva legitimnosti značajki iz teorije curenja informacija (pogl. 4.3.2), protegnuta s pojedinačnih varijabli na cijele scenarije dostupnosti podataka.

Treća verzija (v3) proizašla je iz konačnog pojašnjenja scenarija primjene, formaliziranog u pogl. 4.1 — mjerna kampanja jest dostupna, test tlačnih koraka s ugradnjom redukcijskog ventila nije. Time su legitimni ulazi postali svi podaci razine kampanje, a model je poprimio hibridni oblik $N1 = 1,4435 - 0,0030 \cdot WL - 0,1608 \cdot \ln(1 + 100 \cdot LD)$ s točnošću $MAE = 0,229$. Inačica v3.1 nije mijenjala ulaze nego težine. Kontrolirana dijagnoza zona sa 100 % plastičnih cijevi (pogl. 5.4.2) pokazala je da testovi s vrlo dubokim tlačnim koracima mjere sustavno prenizak eksponent, zbog čega je faktor kvalitete koraka preoblikovan u plato u pojasu 15–35

% s padom iznad (pogl. 4.3.5). Koeficijenti su se pritom pomaknuli na $N1 = 1,5062 - 0,0032 \cdot WL - 0,1753 \cdot \ln(1 + 100 \cdot LD)$, a kvalitetno filtrirana točnost ostala je 0,229. Ponderiranje s ispravkom za poznatu pristranost mjerenja donijelo je i očekivanu evaluacijsku suptilnost, obrazloženu unaprijed u pogl. 4.3.5. Ukupni MAE naspram svih izmjerenih ciljeva pomaknuo se s 0,341 na 0,346, jer se model ispravljen za pristranost nužno nešto manje slaže s ciljevima koji tu pristranost nose — približno polovicom validacijskog skupa — dok su na nepristranom podskupu (dostatan signal, koraci 15–45 %) obje sheme ponderiranja statistički izjednačene. Pojas 15–35 % pritom je preporuka za buduća terenska mjerenja, dok evaluacijski podskup dopušta korake do 45 % kako bi nepristrano mjerilo zadržalo dovoljan broj zapisa — strogo ograničenje na optimum ostavlja svega 23 zapisa (usp. pogl. 4.3.5). Inačica v3.2 dodala je predkvalifikacijski prag primjene bez ikakve promjene koeficijenata, tako da se izračun eksponenta uskraćuje zonama nevaljanih ulaza ili nedostatnog signala gubitaka, nikad zonama „nepovoljne” naravi — granica čiju je legitimnost utvrdio eksperiment usporedbe tvrdih filtara i ponderiranja (pogl. 4.3.5), a čija je operativna razrada predmet pogl. 5.2.3.

Konačna verzija (v4.0) potaknuta je dopunom baze i revizijom imputacije, opisanima u pogl. 4.2.3 — a okolnost da je reviziju pokrenulo vanjsko recenzentsko pitanje zaslužuje da bude zabilježena, jer ilustrira ulogu vanjske provjere u kontroliranom razvoju. Imputacijski artefakt u kanadskim zapisima nije otkrila nijedna interna dijagnostika — model s fiktivnim vrijednostima validirao se uredno, koeficijenti su bili stabilni, a pogreška niska — nego pitanje vanjskog čitatelja o podrijetlu kanadskih vrijednosti gubitaka. Pouka je metodološki važna. Validacijski protokol, ma koliko strog, provjerava model naspram podataka kakvi jesu, a ne naspram pitanja jesu li podaci ono što se o njima tvrdi; potonje može provjeriti samo revizija provenijencije — i upravo zato revizijski trag iz pogl. 4.2.1 dokumentira podrijetlo svake vrijednosti, a ne samo svakog rezultata. Dopunjena baza donijela je stvarne kanadske vrijednosti gubitaka vode — strukturno odsutne iz izvorne datoteke i u razvojnim verzijama popunjavane medijanom od 78 %, vrijednošću gotovo sigurno pogrešnog smjera za uredne kanadske mreže — čime je politika nulte imputacije postala provediva, jer je svih 188 upotrebljivih zapisa potpuno u svakom polju koje model zahtijeva. Ponovna prilagodba na potpunim podacima razriješila je status ulaza WL. Njegov koeficijent, procijenjen na $-0,0032$ s imputiranim vrijednostima, na stvarnim podacima pada na $+0,0008$ — statistički i praktički nulu — čime je raniji gradijent identificiran kao pretežno imputacijski artefakt jer je petnaest kanadskih redaka s fiktivnim $WL = 78 \%$ davalo nagib kojega u stvarnim podacima nema. Pod identičnom grupiranom validacijom jednoulazni je oblik neznatno točniji od dvoulaznog (MAE

0,230 naspram 0,234 na kvalitetno filtriranim podacima), stoga su parsimonija i dokazi pokazali u istom smjeru. Usvojenim konačnim modelom, specificiranim u pogl. 5.2.1, ulazni prostor sveden je s trinaest kandidatskih parametara na jednu izvedenu značajku — specifičnu gustoću stvarnih gubitaka normaliziranu tlakom LD, koja objedinjuje tri izvorna podatka: noćni protok stvarnih gubitaka L_0 , duljinu glavnih cjevovoda L_m i prosječni zonski tlak P_0 — a gubici vode ostaju u primjenskim alatima prikazani kao informativna statistika kampanje, bez uloge u samom izračunu.

Dvije konstante protežu se kroz sve verzije i same su po sebi nalazi istraživanja. Prva je sudbina cijevnog materijala. Testiran je u svakoj verziji i svaki put odbačen zbog istoga artefakta — regresijski koeficijent uz udio fleksibilnih cijevi dosljedno je poprimao predznak suprotan fizikalno očekivanome, kao da veći udio plastike snižava eksponent. Razrješenje te sustavne pojave (uvjetna, granična uloga materijala umjesto aditivne) predmet je pogl. 5.4. Druga je granica upotrebljivosti uredskih podataka. Modeli hranjeni isključivo statičkim podacima katastra imovine, bez ijedne informacije o gubicima, nikad nisu nadmašili naivne reference (pogl. 4.3.3) — mjerenje protoka na ulazu u zonu s analizom minimalnoga noćnog protoka minimalni je podatkovni preduvjet upotrebljivog analitičkog određivanja eksponenta. Obje konstante imaju izravnu praktičnu težinu — prva upozorava da se katastarski podatak o materijalu ne smije mehanički uvrstiti u regresiju, druga definira najmanju mjernu investiciju koja zonu čini podobnom za analitičku procjenu. U cjelini, razvojni slijed $v1 \rightarrow v4.0$ pokazuje obrazac koji zaslužuje biti istaknut kao metodološka pouka. Svaka od šest promjena — tri redefinicije dostupnosti ulaza, jedna korekcija pristranosti, jedan prag primjene i jedna revizija imputacije — potaknuta je dokumentiranim nalazom, a nijedna naknadnim dotjerivanjem rezultata; upravo ta disciplina omogućuje da se konačnom modelu, unatoč njegovoj jednostavnosti, pripiše dokazna snaga koju složeniji, ali nekontrolirano razvijani modeli ne bi imali.

Formalni okvir te discipline jest registar metodoloških odluka iz master izvješća, uveden u pogl. 4.1: dvadeset pet dokumentiranih odluka, svaka s obrazloženjem i mjestom dokaza. Razvojni slijed iz ovog potpoglavlja pokriva njegov središnji dio — odluke o izbacivanju ILI-ja kao ulaza nakon provenijencijskog nalaza, o prijelazu na hibrid kampanjskih podataka nakon pojašnjenja scenarija, o platou težina kvalitete koraka nakon dijagnoze plastičnih zona, o predkvalifikaciji utemeljenoj na valjanosti a ne na naravi zone, o identifikaciji kanadske imputacije kao artefakta s posljedičnom politikom nulte imputacije te o usvajanju jednoulaznog oblika $v4.0$ — dok su odluke o podacima i validaciji dokumentirane u pogl. 4, a odluke o interpretaciji u nastavku

ovog poglavlja. Za čitatelja koji rezultate želi revidirati, registar ima praktičnu funkciju obrnutog kazala — od svake tvrdnje u ovom poglavlju vodi trag do odluke koja ju je omogućila, od odluke do dokaza koji ju je potaknuo, a od dokaza do datoteke rezultata u revizijskom tragu istraživanja (pogl. 4.2.1). Upravo zato razvojne verzije nisu prikazane kao odbačeni pokušaji nego kao dokumentirani koraci. Verzija v1 dokaz je da ILI nosi signal (MAE 0,248 naspram referentnih 0,298), v2 da i najjednostavniji uredski podatak nadmašuje reference (0,233), v3 i v3.1 da dvoulazna kombinacija kampanjskih veličina — WL i logaritamski transformirana LD — izvlači praktički svu informaciju sadržanu u mjernim podacima (0,229) te da daljnje dodavanje ulaza ne donosi poboljšanje, a v4.0 da se isti rezultat postiže jednim ulazom bez imputacije (0,230) — slijed u kojem svaka verzija sužava prostor mogućih objašnjenja i time podiže pouzdanost konačnog zaključka.

5.2. Konačni model v4.0

5.2.1. Oblik modela i jednadžba

Konačni model istraživanja jest ponderirana linearna regresija ponovno prilagođena na dopunjenoj bazi bez imputacije i dokazima svedena na jednu izvedenu značajku (LD):

$$N1 = 1,3375 - 0,2187 \cdot \ln(1 + 100 \cdot LD), \text{ ograničeno na raspon } [0,50, 1,50] \quad (5.1)$$

Jedini ulaz, LD, gustoća je stvarnih gubitaka po kilometru mreže po metru tlaka, definirana jedn. (4.1): noćni gubici L_0 u litrama u sekundi podijeljeni duljinom glavnih cjevovoda u kilometrima i prosječnim zonskim tlakom u metrima. Sve tri veličine daje standardna mjerna kampanja — analiza minimalnoga noćnog protoka, katastar imovine i zapisivač tlaka — te je model primjenjiv na svaku zonu nakon rutinske kampanje, bez ugradnje redukcijskog ventila. Definicije ulaza fiksirane su trening konvencijama iz pogl. 4.2.2 i svaka ih primjena mora slijediti doslovno jer ista fizikalna veličina u drugoj konvenciji mijenja koeficijente. Prilagodba je provedena ponderiranom metodom najmanjih kvadrata s težinama iz pogl. 4.3.5 — umnoškom snage signala gubitaka i faktora kvalitete tlačnog koraka — na 188 zapisa potpunih u svakom potrebnom polju, bez ijedne imputirane vrijednosti.

Postupak izračuna ulaza iz kampanjskih mjerenja fiksiran je do razine pojedinačne veličine, jer svaka od triju komponenti ima točno određeno mjerno podrijetlo. Noćni protok gubitaka L_0 razlika je minimalnoga noćnog protoka, očitano sa zapisivača na ulazu u zonu, i procijenjene legitimne noćne potrošnje — dakle izlaz analize noćnog protoka opisane u pogl. 2.3, s njezinim

poznatim neizvjesnostima. Duljina glavnih cjevovoda preuzima se iz katastra imovine i ne uključuje priključne cjevovode. Prosječni zonski tlak P_0 očitava se sa zapisivača tlaka postavljenog na reprezentativnoj točki prosječnoga zonskog tlaka (AZP točki, pogl. 2.2.1) tijekom istog mjernog razdoblja. Disciplina jedinica pritom nije formalnost nego uvjet valjanosti. Koeficijenti jednadžbe (5.1) vrijede za L_0 u litrama u sekundi, duljinu u kilometrima i tlak u metrima stupca vode, stoga bi ista fizikalna veličina u drugim jedinicama — ili ista informacija u drugoj normalizaciji, primjerice po priključku umjesto po kilometru — zahtijevala druge koeficijente. U primjenskim alatima (pogl. 6.3) korisnik zato unosi sirove kampanjske veličine, a ulaz modela računa se automatski — mogućnost pogreške u jedinicama uklonjena je konstrukcijom, a ne uputom.

Specifikaciji modela pripada i njegova domena primjene, naslijeđena iz verzije v3.2 i ugrađena u dvorazinsku shemu (pogl. 5.2.3). Jednadžba (5.1) primjenjuje se kao statistička procjena samo kada zona zadovoljava prag signala gubitaka — L_0 od najmanje 2 l/s i gustoću gubitaka od najmanje 0,02 — jer je upravo na takvim zonama model validiran i jer ispod tog praga eksponent nije mjerljiva veličina ni za model ni za teren. Model bez svojeg praga primjene nije potpuno specificiran jer ista formula, primijenjena izvan domene, ne daje „manje pouzdanu procjenu” nego procjenu nepoznate pouzdanosti, što je za investicijsku primjenu kvalitativno drugačija — i neprihvatljiva — kategorija. Zato se u svim implementacijama formula i prag isporučuju kao nedjeljiva cjelina, zajedno s intervalom predviđanja iz pogl. 5.2.2.

Svaki element jednadžbe (5.1) nosi fizikalnu interpretaciju ukotvljenu u FAVAD okvir iz pogl. 2.2. Odsječak 1,3375 procjena je modela za gotovo bezgubitnu zonu. Kad gustoća gubitaka teži nuli, logaritamski član iščezava i predviđeni eksponent teži vrijednosti u blizini FAVAD granice dominacije pozadinskih gubitaka — istjecanja kroz otvore promjenjive površine na spojevima i priključcima, s pojedinačnim eksponentom oko 1,5 (Van Zyl i Clayton, 2007). Negativni nagib uz logaritamski član kodira mehanizam miješanja dviju skupina otvora, budući da rastuća gustoća gubitaka upućuje na zonu kojom sve više dominiraju velika, detektabilna puknuća — otvori nepromjenjive površine s eksponentom oko 0,5 — zbog čega miješani eksponent zone klizi prema toj granici. Logaritamski oblik odražava opadajući granični informacijski sadržaj ulaza. Razlika između gustoće gubitaka 0,01 i 0,05 l/s/km/m govori o režimu zone više nego razlika između 0,20 i 0,24, jer se prijelaz iz dominacije pozadinskih gubitaka u dominaciju puknuća odvija pri malim gustoćama. Tlak u modelu djeluje točno onako kako je triangulirana analiza značajki pokazala (pogl. 5.4): ne kao samostalna značajka, nego unutar normalizacije — signal eksponenta ne nosi tlak sam po sebi, nego gubici po jedinici

tlaka. Granice odsijecanja $[0,50, 1,50]$ fizikalne su granice mješavine na razini zone (pogl. 2.2.2). Pojedinačni otvor može premašiti 1,5, ali zona — mješavina mnogih otvora — u FAVAD okviru ostaje unutar tog raspona, pri čemu je u primjeni bitno aktivna samo donja granica.

Ponašanje jednadžbe (5.1) preko domene primjene monotono je i fizikalno čitljivo. Predviđeni eksponent strogo pada s gustoćom gubitaka. Najviše vrijednosti, u blizini odsječka, dobivaju zone s gustoćom gubitaka tik iznad praga primjene, a s rastom gustoće predikcija klizi prema donjoj granici odsijecanja, koju dosežu tek zone s ekstremnim intenzitetom gubitaka. Zbog logaritamskog oblika osjetljivost je najveća upravo ondje gdje je i odluka najosjetljivija — pri malim i umjerenim gustoćama, gdje se odlučuje pripada li zona režimu dominacije pozadinskih gubitaka ili prijelaznom području — dok je u području vrlo velikih gubitaka krivulja gotovo ravna, te model ondje stabilno vraća nizak eksponent i time stabilnu poruku da upravljanje tlakom nije prioritetna mjera. Ta se svojstva izravno prevode u investicijski jezik iz pogl. 2.2.2. Budući da smanjenje tlaka od 10 % štedi približno 5 % gubitaka pri eksponentu 0,5, a približno 15 % pri eksponentu 1,5, raspon izlaza modela pokriva trostruki raspon očekivanih relativnih ušteda — dovoljno da rangiranje kandidatskih zona po predviđenom eksponentu bude i rangiranje po očekivanoj isplativosti redukcije tlaka, prije nego što se u zoni provede ijedan dodatni terenski zahvat.

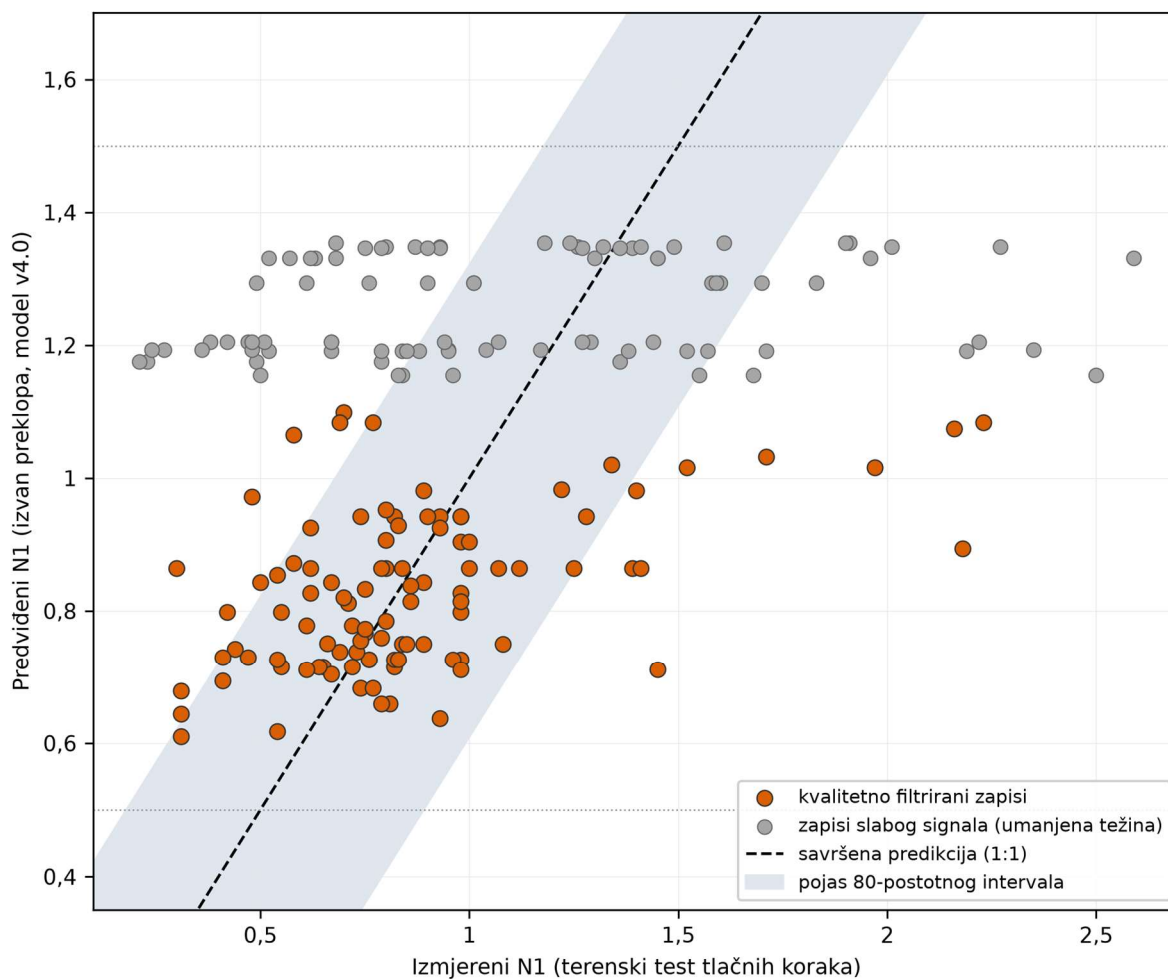
Odnos konačnog oblika prema razvojnima također nosi informaciju. Odsječak jednadžbe (5.1), 1,3375, niži je od odsječaka hibridnih verzija (1,44 do 1,51) upravo zato što je iz modela uklonjen član gubitaka vode. U hibridu je dio silaznog gradijenta nosio WL, stoga je odsječak — predikcija pri nultim vrijednostima obaju ulaza — morao stajati više; u jednoulaznom obliku cjelokupni gradijent preuzima logaritamski član, sa strmijim nagibom ($-0,2187$ naspram $-0,1608$ do $-0,1753$) i primjereno nižim odsječkom. Praktički identična validirana točnost dvaju oblika (MAE 0,230 naspram 0,229) potvrđuje da je riječ o istoj informaciji preraspodijeljenoj među članovima, a ne o promjeni sadržaja modela — što je i očekivano s obzirom na izrazitu koreliranost varijabli intenziteta gubitaka (pogl. 5.4). Upravo zato usporedba koeficijenata među verzijama nije formalnost nego provjera konzistentnosti — da je redukcija ulaza promijenila fizikalni sadržaj modela, vidjelo bi se to u nagibima; nije se vidjelo.

Oblik modela ima i svojstvo čija se vrijednost u primjeni teško precjenjuje — konačni je model zatvorena formula s dva koeficijenta, izračunljiva ručno, bez ikakve programske ovisnosti. Iz toga slijedi potpuna prenosivost implementacije (pogl. 6.3) i trivijalna rekaliibracija. Prilagodba modela novom kontekstu svodi se na ponovnu regresiju dvaju koeficijenata na lokalnim

podacima — postupak čiju kvantitativnu podlogu daje analiza granica generalizacije u pogl. 5.3. Istodobno, jednostavnost oblika ne smije se zamijeniti s trivijalnošću sadržaja jer je do jednadžbe (5.1) dovela konvergencija četiriju neovisnih metoda selekcije značajki, šest obitelji algoritama i kontrolirani slijed šest verzija — jednostavnost je ovdje rezultat, a ne polazna pretpostavka. Konačno, epistemički status modela treba iskazati precizno. Model je kalibrirana apriorna procjena za eksponent zone — najbolja dostupna procjena prije terenskog mjerenja — a ne zamjena za kvalitetan test tlačnih koraka ondje gdje je on priuštiv, proveden protokolarno ispravno (pogl. 5.4.3) i na zoni s dostatnim signalom. Odnos modela i testa stoga nije konkurencija nego podjela rada po cijeni i ulozi informacije, u kojoj analitička procjena dolazi praktički bez dodatnog troška uz svaku provedenu kampanju i pokriva cijeli portfelj zona, dok test — sa svojim troškom ugradnje ventila i noćnih mjerenja — ostaje rezerviran za zone u kojima je investicijska odluka izrazito osjetljiva na eksponent, u kojima se neovisne procjene ne slažu (pogl. 5.4.1) ili u kojima se ventil ionako ugrađuje, te je test nusproizvod puštanja u pogon bez dodatnog troška. Upravo ta formulacija određuje i način iskazivanja uspješnosti modela u nastavku — sve mjere odražavaju generalizaciju na neviđene zone, uz eksplicitno kvantificiranu nesigurnost.

5.2.2. Uspješnost i intervali predviđanja

Sve iskazane mjere uspješnosti izračunane su izvan preklopa pod unakrsnom validacijom grupiranom po mjernim zonama (pogl. 4.3.1) — svako je predviđanje proizveo model treniran bez ijednog zapisa te zone. Na kvalitetno filtriranim podacima — zapisima čiji izmjereni eksponent zadovoljava kriterije signala i vjerodostojnosti iz pogl. 4.2.3, jedinicama čije ciljne vrijednosti zaslužuju status mjerila — konačni model v4.0 postiže $MAE = 0,230$, uz 64 % predikcija unutar $\pm 0,25$ i 90 % unutar $\pm 0,50$ te sustavnu pristranost od $-0,035$, praktički nulu. Na svim vjerodostojnim zapisima ukupni MAE iznosi 0,347. Najbolje se validira ekvadorski podskup, u kojem su mjerne kampanje dale snažan signal gubitaka: MAE 0,198 uz 92 % predikcija unutar $\pm 0,50$. Raspršenje predviđenih naspram izmjerenih vrijednosti prikazano je na slici 5.1, koja validacijsku statistiku čini vizualno provjerljivom. Svaka od 188 točaka jedno je predviđanje izvan preklopa, kvalitetno filtrirani zapisi razlikuju se od zapisa slabog signala, a osjenčani pojas prikazuje 80-postotni interval predviđanja. Slika omogućuje i provjere koje zbirne mjere ne mogu: da se pogreške ne gomilaju u jednom dijelu raspona eksponenta, da zapisi slabog signala odstupaju pretežno iznad dijagonale — u skladu s namjernim nepračenjem njihovih prema dolje pristranih ciljeva — te da unutar pojasa leži približno očekivani udio kvalitetno filtriranih točaka, što je vizualna potvrda kalibriranosti intervala.



Slika 5.1. Predviđeni naspram izmjerjenog eksponenta N1 izvan preklopa (188 zapisa, 80-postotni interval predviđanja)

Potpuna raščlamba validacijskih statistika po podskupovima dana je u tablici 5.3. Tablica dokumentira razvojno stanje v3.2, pod kojim je raščlamba izvorno provedena; predikcije konačnog modela v4.0 statistički su nerazlučive od v3.2 — medijan apsolutne razlike predikcija dvaju modela iznosi 0,018 — stoga raščlamba mjerodavno opisuje i konačni model, dok su glavne brojke v4.0 navedene u prethodnom odlomku iskazane iz njegove vlastite validacije. Na kvalitetno filtriranom podskupu od 100 zapisa protokol v3.2 iskazuje MAE 0,229, RMSE 0,333, R^2 0,201, pristranost $-0,034$ te 65 % predikcija unutar $\pm 0,25$ i 88 % unutar $\pm 0,50$. Razmak između RMSE i MAE mjera — 0,333 naspram 0,229 — kvantificira, kako je najavljeno u pogl. 4.3.6, koliki dio proračuna pogreške leži u malom broju teških zapisa: umjeren, ali ne zanemariv udio, u skladu s repovima razdiobe reziduala koje interval predviđanja u nastavku eksplicitno obuhvaća.

Usporedba dviju završnih verzija na istom mjerilu zaokružuje dokaz da evidencijska redukcija na jednu izvedenu značajku (LD) nije koštala točnosti. Protokol v3.2 na kvalitetno filtriranom

podskupu iskazuje MAE 0,229 uz 65 % predikcija unutar $\pm 0,25$ i 88 % unutar $\pm 0,50$ te pristranost $-0,034$; konačni v4.0 iskazuje 0,230 uz 64 % unutar $\pm 0,25$ i 90 % unutar $\pm 0,50$ te pristranost $-0,035$. Razlike su na razini treće decimale i jednoga postotnog boda — daleko unutar statističke nerazlučivosti pri ovoj veličini uzorka — a medijan apsolutne razlike predikcija dvaju modela od 0,018 pokazuje da se podudarnost ne ostvaruje tek u prosjeku nego zapis po zapis. Za interpretaciju je bitno što ta podudarnost znači. Dvoulazni i jednoulazni oblik, prilagođeni na različito pripremljenim podacima (s imputacijom odnosno bez nje), daju praktički istu funkciju predviđanja — zbog čega su svi nalazi o strukturi pogreške, podskupovima i granicama primjene izvedeni pod v3.2 protokolom izravno mjerodavni i za konačni model, što opravdava zajedničko iskazivanje njihovih validacijskih raščlambi u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Validacijske statistike izvan preklopa po podskupovima

Podskup	n	MAE	RMSE	R ²	Pristranost	unutar $\pm 0,25$	unutar $\pm 0,50$
Svi vjerodostojni zapisi	188	0,346	0,458	0,111	+0,052	48 %	72 %
Kvalitetno filtrirani	100	0,229	0,333	0,201	-0,034	65 %	88 %
Slab signal (smanjena težina)	88	0,479	0,567	-0,024	+0,149	28 %	53 %
Ekvador	92	0,197	0,281	0,243	-0,004	70 %	91 %
Kanada	15	0,556	0,600	-0,050	+0,221	13 %	40 %
Južnoafrička Republika	81	0,478	0,575	-0,078	+0,084	30 %	56 %

Napomena: tablica dokumentira validacijsku raščlambu pod protokolom v3.2; konačni model v4.0 statistički je nerazlučiv (kvalitetno filtrirani podskup: MAE 0,230; 64 % unutar $\pm 0,25$; 90 % unutar $\pm 0,50$; pristranost $-0,035$; svi vjerodostojni: MAE 0,347; Ekvador: MAE 0,198 uz 92 % unutar $\pm 0,50$; medijan apsolutne razlike predikcija dvaju modela 0,018).

Izvor: master izvješće (N1_master_report_HR), Odjeljci 13 i 14 (oof_statistics.csv / oof_statistics_v4.csv).

Usporedba s naivnim referencama daje mjeru stvarnog analitičkog dobitka. Pod identičnim protokolom predviđanje prosjeka postiže MAE 0,298, a industrijsko pravilo $N1 = 1,0$ MAE 0,311 na kvalitetno filtriranim podacima (tablica 5.1) — konačni model tipičnu pogrešku smanjuje, dakle, za približno 23 % naspram najbolje reference, uz bitno ravnomjerniju strukturu pogreške. Gotovo nulta pristranost znači da model ne precjenjuje i ne podcjenjuje sustavno ni u jednom dijelu domene, što je za investicijsku primjenu — u kojoj se pogreške preko više zona zbrajaju — svojstvo jednako važno kao sama veličina pogreške. Vrijednost $R^2 = 0,201$ na filtriranom podskupu valja čitati kroz gornju granicu šuma obrazloženu u pogl. 4.3.6 jer je znatan dio varijance izmjeranog eksponenta mjerni šum terenskih testova koji nijedan ulaz ne može objasniti, stoga je dostižni koeficijent determinacije ograničen daleko ispod jedinice ma koliko model bio dobar — model je kalibrirana apriorna procjena — najbolja dostupna procjena

prije mjerenja, s poznatom točnošću — a njegova se kvaliteta mjeri apsolutnom pogreškom naspram pouzdanih ciljeva. Gornja granica šuma pritom nije retorička obrana nego mjerljiva pojava s poznatom mehanikom. Pogreška u ciljnim vrijednostima prigušuje svaku opaženu povezanost — atenuacija dokumentirana još Spearmanovim radom o pogreškama mjerenja (pogl. 4.3.4) — i ne uklanja se ni većim uzorkom ni boljim algoritmom, nego jedino boljim mjerenjima; upravo zato je putanja prema točnijoj sljedećoj generaciji modela u pogl. 5.4.3 i 7.2 definirana kroz akumulaciju protokolarno ispravnih testova, a ne kroz daljnju algoritamsku razradu na postojećoj građi.

I sama struktura RMSE stupca po podskupovima nosi informaciju o razdiobi pogrešaka. Na kvalitetno filtriranom podskupu RMSE od 0,333 stoji prema MAE od 0,229 u omjeru koji odgovara umjereno teškim repovima — nekoliko zapisa nosi natprosječnu pogrešku, ali bez ekstremnih promašaja; na skupu svih vjerodostojnih zapisa omjer 0,458 prema 0,346 zadržava sličnu strukturu, dok podskup slabog signala (0,567 prema 0,479) pokazuje pogreške velike, ali međusobno ujednačene — ne repove nego opći pomak, u skladu s time da ondje ne griješi model nego mjerilo. Za primjenu je bitna prva od tih struktura. Umjereni repovi na pouzdanim ciljevima znače da će rijetke velike pogreške postojati — što interval predviđanja svojim krajevima izražava — ali da nisu sustavne ni koncentrirane u prepoznatljivom dijelu domene. S gledišta krajnje upotrebe, pogreška eksponenta prevodi se u pogrešku procijenjene FAVAD uštede blaže nego što bi se intuitivno očekivalo. Relacija između uštede i eksponenta glasi:

$$\text{ušteda} = 1 - 0,9^{N1} \quad (5.2)$$

Ta je relacija monotona i glatka, zbog čega pogreška od $\pm 0,23$ u eksponentu pomiče procjenu relativne uštede za nekoliko postotnih bodova, a poredak zona po očekivanim uštedama — veličina koja stvarno upravlja redoslijedom ulaganja — mijenja se tek kad se procjene dviju zona približe unutar pogreške, što je upravo slučaj koji interval predviđanja čini vidljivim i upućuje na terensku provjeru.

Uz MAE, RMSE i R^2 , protokol iz pogl. 4.3.6 predviđa i dvije operativno čitljive mjere, iskazane za svaki podskup u tablici 5.3. Pristranost — prosječni predznak pogreške — odgovara na pitanje griješi li model sustavno u jednom smjeru. Za pojedinačnu zonu sustavna i slučajna pogreška jednako su štetne, ali se preko portfelja zona ponašaju bitno različito, jer se slučajne pogreške u zbroju očekivanih ušteda dijelom poništavaju, a sustavne zbrajaju. Gotovo nulta pristranost konačnog modela na pouzdanim ciljevima ($-0,035$) znači da procjena ukupnog potencijala ušteda preko više zona neće biti sustavno napuhana ni potisnuta — svojstvo koje

prosjeku pogreške ne piše u definiciji i koje je moralo biti provjereno zasebno. Tolerancijski udjeli pak prevode razdiobu pogreške u jezik odluke. Udio predikcija unutar $\pm 0,25$ (64 %) približno odgovara vjerojatnosti da procjena padne unutar poluširine jednoga odlučivačkog režima, a udio unutar $\pm 0,50$ (90 %) vjerojatnosti da ne promaši režim — jer su režimi dominacije puknuća i dominacije pozadinskih gubitaka razdvojeni za približno 0,6 jedinica. Planer koji radi s modelom ne treba, dakle, interpretirati apstraktnu srednju pogrešku, nego može računati s tim da će otprilike devet od deset zona razine 1 biti ispravno smješteno u svoj režim, a da će preostala desetina — prepoznatljiva po procjeni blizu granice režima — biti kandidat za terensku provjeru.

Ekvadorski podskup zaslužuje zasebno čitanje, jer predstavlja najčišći dostupni test modela: 92 vjerodostojna zapisa iz kampanja sa snažnim signalom gubitaka, potpunim poljima i protokolarno umjerenim koracima. Na njemu protokol v3.2 iskazuje MAE 0,197 uz RMSE 0,281, R^2 0,243, pristranost $-0,004$ te 70 % predikcija unutar $\pm 0,25$ i 91 % unutar $\pm 0,50$; konačni v4.0 validira se s MAE 0,198 i 92 % unutar $\pm 0,50$. Te brojke pokazuju što model postiže kada ciljne vrijednosti zaslužuju puno povjerenje — pogrešku ispod 0,2 s praktički savršenom nepristranošću — i time empirijski potvrđuju interpretaciju iz pogl. 4.3.3. Razlika između ekvadorskih i ostalih rezultata nije razlika u modelu, koji je za sve podskupove isti, nego u kvaliteti mjerila naspram kojega se pogreška računa. U tom svjetlu ekvadorski MAE od približno 0,2 najbolja je raspoloživa procjena stvarne pogreške modela naspram istine, dok kvalitetno filtrirani MAE od 0,230 uključuje i preostali šum mjerila — stoga je iskazivanje potonjega kao glavne brojke istraživanja svjesno konzervativan izbor.

Raščlamba po podskupovima u tablici 5.3 nosi i dijagnostičke nalaze koji potvrđuju ispravnost postavki iz pogl. 4. Zapisi slaboga signala (88 zapisa ispod kvalitetnog filtra) iskazuju MAE 0,479 uz pozitivnu pristranost $+0,149$ — očekivano i namjerno, jer su njihove izmjerene vrijednosti pristrane prema dolje zbog dubokih tlačnih koraka (pogl. 5.4.3), a model ih, treniran uz težine s ispravkom za pristranost, namjerno ne slijedi. Prividni neuspjeh južnoafričkog podskupa (MAE 0,478, korelacija približno nula na 81 zapisu) svojstvo je njegovih ciljnih vrijednosti, a ne modela. Većina južnoafričkih testova nije zadovoljila kriterije signala ili pojasa koraka, što znači da su njihovi izmjereni eksponenti sami po sebi šum — isti zapisi koje ponderiranje pouzdanosti diskontira i koje bi predkvalifikacijski prag odbio. Kanadski podskup (15 vjerodostojnih zapisa, strukturno bez podataka o protocima, slab signal posvuda) ilustrira svrhu praga primjene time što MAE 0,556 uz pristranost $+0,221$ ne mjeri kvalitetu modela nego nepostojanje pouzdanog mjerila — model se, kroz prag iz pogl. 5.2.3, u takvim zonama

ispravno suzdržava od kvantitativnog odgovora. Bez naivnih referenci pod identičnim protokolom (pogl. 4.3.3) ovakva dijagnoza — razdvajanje granica modela od granica mjerenja — ne bi bila moguća.

Za potpunost treba navesti i zbirne brojke na svim vjerodostojnim zapisima, u kojima se pouzdani i nepouzdana ciljevi miješaju: 48 % predikcija unutar $\pm 0,25$ i 72 % unutar $\pm 0,50$, uz blagu ukupnu pristranost od $+0,052$. Razlika prema kvalitetno filtriranim udjelima nije mjera pogoršanja modela — predikcije su iste — nego mjera onečišćenja mjerila. Gotovo polovica vjerodostojnih zapisa nosi izmjerene ciljeve kojima se, prema kriterijima iz pogl. 4.2.3, ne može vjerovati, stoga „promašaji“ na njima ne razlikuju pogrešku modela od pogreške mjerenja. Objema se skupinama brojki izvještava namjerno jer filtrirane mjere odgovaraju na pitanje koliko je model točan, a zbirne na pitanje kako će se slagati s proizvoljnim arhivom terenskih testova — dva pitanja koja praksa često miješa, s posljedicama koje su u pregledu literature dokumentirane kao kronične (pogl. 3.3).

Južnoafrički redak tablice 5.3 nosi pritom poruku koja nadilazi ovu bazu, jer opisuje situaciju u kojoj će se naći svaki operater sa sličnom praksom testiranja. Tolerancijski udjeli od 30 % unutar $\pm 0,25$ i 56 % unutar $\pm 0,50$ ne znače da za južnoafričke zone ne postoji upotrebljiva procjena eksponenta — znače da postojeći arhiv testova te zone ne može reći koja je procjena točna, jer je sam proveden pod uvjetima koji rezultat čine šumovitim ili pristranim. Ispravna operativna reakcija nije odbacivanje modela nego trijaža arhive. Zapisi koji zadovoljavaju kriterije signala i pojasa koraka zadržavaju dokaznu vrijednost, ostali se tretiraju kao indikativni, a nova se mjerenja planiraju protokolom iz pogl. 5.4.3. U tom smislu tablica 5.3 nije samo validacija modela nego i dijagnostički predložak za ocjenu tuđih arhiva terenskih testova — primjena metodološkog aparata istraživanja neovisna o samom modelu, u istom duhu u kojem je pogl. 4.1 najavilo prenosivost aparata na srodne probleme.

Uz točkastu predikciju model iskazuje i kvantificiranu nesigurnost. Svako predviđanje razine 1 nosi 80-postotni interval predviđanja $[N1 - 0,32, N1 + 0,39]$, konstruiran iz 10. i 90. percentila reziduala izvan preklopa na kvalitetno filtriranim validacijskim podacima — distribucijski slobodnim postupkom obrazloženim u pogl. 4.3.6, koji interval kalibrira isključivo naspram ciljnih vrijednosti kojima se vjeruje (pogl. 4.3.5). Interval je najuži od svih verzija modela, a njegova asimetrija — širi krak prema gore — nije proizvoljna, nego odražava to da model povremeno podcjenjuje zone visokog eksponenta s dominacijom pozadinskih gubitaka češće nego što precjenjuje zone niskog eksponenta, zbog čega empirijski kvantili tu asimetriju stvarne razdiobe pogrešaka prenose u interval umjesto da nameću simetričnu parametarsku formu. U

investicijskoj primjeni interval ima operativnu ulogu opisanu u pogl. 6.3 — rangiranje kandidatskih zona za upravljanje tlakom provodi se tako da uštede ostaju opravdane i na donjoj granici intervala, čime nesigurnost procjene ulazi u odluku eksplicitno, a ne prešutno. Interval se pritom ne iskazuje kao $\pm\text{MAE}$ — prosječna apsolutna pogreška ne definira pokrivenost (unutar $\pm 0,25$ nalazi se 64 % predikcija) niti bilježi asimetriju reziduala, dok percentilne granice jamče deklariranih 80 %.

Valjanost intervalne konstrukcije počiva na pretpostavci izmjenjivosti opažanja, koja za grupirane podatke vrijedi na razini zona (pogl. 4.3.6) — i upravo zato su reziduali uzeti iz predikcija izvan preklopa pod grupiranim protokolom. Kvantifikacija nesigurnosti podvrgnuta je istoj disciplini kao i točkasta ocjena, te interval izražava nesigurnost predviđanja za novu, neviđenu zonu, a ne prilagodbu zonama iz treninga. Nominalna pokrivenost od 80 % pritom je svjestan kompromis jer bi uži interval (primjerice 50-postotni) davao privid preciznosti koji struktura šuma ne podupire, a širi (95-postotni) bio bi u repovima određen s premalo opažanja da bi mu granice bile stabilne — deseti i devedeseti percentil reziduala procjenjivi su pouzdano i pri stotinjak kvalitetno filtriranih zapisa. Interval je nadalje konstantne širine po cijeloj domeni razine 1 — posljedica toga što je izveden iz ukupne razdiobe reziduala, a ne modeliran kao funkcija ulaza; pri raspoloživoj veličini uzorka procjena uvjetnih kvantila po gustoći gubitaka ne bi bila obranjiva, stoga je konstantna širina još jedan izraz načela da se iskazuje samo ono što podaci mogu poduprijeti. U operativnom čitanju interval kaže sljedeće: za zonu razine 1 s točkastom procjenom $N1$ vrijednosti eksponenta ispod procjene umanjene za 0,32 ili iznad procjene uvećane za 0,39 nisu isključene, ali su zajedno očekivane u približno svakom petom slučaju — informacija dostatna da se investicijski granični slučajevi prepoznaju i po potrebi upute na terensku provjeru protokolom iz pogl. 5.4.3.

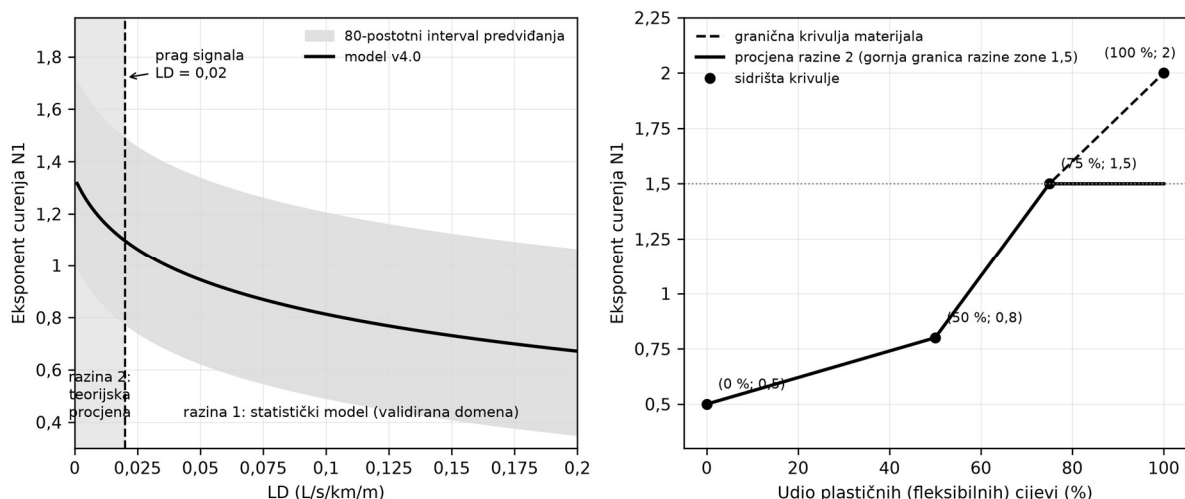
Postignutu točnost na kraju valja smjestiti u kontekst pouzdanosti samog terenskog mjerenja, jer upravo taj odnos određuje praktični domet analitičkog pristupa. U prikupljenoj bazi 13 % terenskih testova daje fizikalno nemoguće vrijednosti eksponenta, a samo je 11 % rezultata suglasno s teorijom materijala unutar pojasa od ± 16 % (pogl. 4.2.3); tipična pogreška analitičke procjene od $\pm 0,23$ na pouzdanim ciljevima time dostiže red veličine pouzdanosti terenskog testa provedenog izvan optimalnog protokola. Za odluku koju model posluhuje — razlikovanje režima dominacije puknuća (eksponent približno 0,5 do 0,7) od režima dominacije pozadinskih gubitaka (približno 1,2 do 1,5), razdvojenih za približno 0,6 jedinica — takva je točnost dostatna jer udjeli predikcija unutar tolerancija (64 % unutar $\pm 0,25$; 90 % unutar $\pm 0,50$) pokazuju da model režim zone ispravno klasificira u velikoj većini slučajeva, što je upravo

informacija koju planer treba pri odlučivanju treba li u zoni prednjačiti upravljanje tlakom ili aktivno traženje i sanacija kvarova (pogl. 2.2.2).

5.2.3. Dvorazinska shema procjene (razina 1 / razina 2)

Predkvalifikacijski prag iz verzije v3.2 ostavio je otvorenim pitanje što odgovoriti zoni koja ga ne zadovoljava. Blokada s odgovorom „nije dostupno” bila je epistemički obranjiva — zonama s vrlo malim gubicima ni terenski test ni statistički model ne mogu pripisati pouzdan eksponent, jer ispod praga signala eksponent ne može razriješiti nijedno mjerenje — ali je uskraćivala ono što se o takvoj zoni ipak zna. Zona ima male gubitke u pravilu zato što su njezina velika, detektabilna puknuća pronađena i sanirana, zbog čega preostalim istjecanjem dominira pozadinska komponenta promjenjive površine — točno režim za koji kontrolirana dijagnoza u pogl. 5.4.2 pokazuje da vrijedi teorija materijala i da zona sjedi blizu gornje granice svojega materijala. Konačna inačica modela stoga odgovara u dvije razine, a granica među njima empirijski je izvedena u pogl. 4.2.3 — razina 1 primjenjuje se kada je signal gubitaka dostatan ($L_0 \geq 2 \text{ l/s}$ i $LD \geq 0,02$), razina 2 kada nije.

U razini 1 odgovor daje statistički model: eksponent prema jedn. (5.1) s 80-postotnim intervalom predviđanja iz pogl. 5.2.2. U razini 2 odgovor daje teorijska procjena iz krivulje gornje granice eksponenta prema materijalu cijevi — po dijelovima linearne funkcije udjela plastičnih (fleksibilnih) cijevi kroz sidrišta (uporišne točke): 0 % plastike $\rightarrow N1 = 0,5$; 50 % $\rightarrow 0,8$; 75 % $\rightarrow 1,5$; 100 % $\rightarrow 2,0$, uz gornju granicu na razini zone od 1,5 — čije je teorijsko utemeljenje i empirijska provjera predmet pogl. 5.4.1. Procjena razine 2 traži jedan dodatni ulaz, udio plastičnih cijevi iz katastra imovine, i razlikuje se od razine 1 u tri obilježja koja zajedno čine njezinu epistemičku oznaku. Prvo, nosi širi i asimetričan interval $[N1 - 0,30, N1 + 0,10]$. Zona malih gubitaka može sjediti na gornjoj granici svojega materijala ili ispod nje, ali teško iznad — stoga je nesigurnost usmjerena prema dolje. Drugo, ušteda upravljanja tlakom računa se konzervativno, na donjoj granici intervala. Treće, procjena je izrijekom označena kao teorijska i izvan validirane domene — uz presudu da se test tlačnih koraka za takvu zonu ne preporučuje, jer bi mjerio šum (pogl. 4.2.3). Oblik krivulje i položaj obiju razina u prostoru ulaza prikazani su na slici 5.2.



Slika 5.2. Dvorazinska shema procjene — granična krivulja materijala i domena statističkog modela

Pravila usmjeravanja među razinama slijede granicu utvrđenu eksperimentom iz pogl. 4.3.5 — izračun se smije odbiti zbog nevaljanosti ulaza ili nedostatka signala, nikad zbog naravi zone. Potpuno blokiranje izračuna rezervirano je isključivo za fizikalno neispravne ulaze; zona koja ne zadovoljava prag signala ne ostaje bez odgovora nego dobiva jasno označenu procjenu razine 2. Radni tlak ispod 30 m proizvodi upozorenje, ali nikad ne blokira — predviđanje stoji, uz napomenu da opisuje ponašanje zone pri tom niskom tlaku, koji eksponent stvarno potiskuje (pogl. 5.4.2). Visok ILI ili visoki gubici nikad nisu razlog uskrate — oni su ulazi modela, a ne nedostaci. Nizak predviđeni eksponent zone kojom dominiraju puknuća upravo je odgovor koji planeru treba da upravljanje tlakom ondje deprioritizira u korist traženja i sanacije kvarova. Time nijedna valjana zona ne ostaje bez odgovora i nijedan odgovor bez svoje epistemičke oznake.

Sama granica između razina — $LD = 0,02$ uz $L_0 = 2$ l/s — nije zadana konvencijom nego empirijski izvedena, i to dvama neovisnim putovima koji konvergiraju na istu vrijednost. Prvi je put probir pravila kvalitete iz pogl. 4.2.3. Ispod praga gustoće gubitaka stopa fizikalno nevjerodostojnih terenskih rezultata iznosi 19 %, iznad njega pada, a od vrijednosti 0,09 navise iščezava — prag, dakle, razdvaja zone u kojima terensko mjerenje eksponenta uopće ima smisla od onih u kojima nema. Drugi je put učinak istog praga na točnost modela — ograničavanje na zone s dostatnim signalom smanjuje tipičnu pogrešku predviđanja s $\pm 0,34$ na $\pm 0,25$, najviše od svih ispitanih filtera (tablica 4.3). Konvergencija je sadržajno važna. Ista fizikalna okolnost — premalen protok gubitaka naspram fiksnih neizvjesnosti noćnog mjerenja — istodobno onemogućuje i terensko i analitičko određivanje eksponenta, što znači da prag ne dijeli zone u kojima je mjerodavan model od zona u kojima je mjerodavno terensko mjerenje, nego zone u kojima eksponent uopće jest mjerljiva veličina od onih u kojima nije. Odatle i legitimost druge

razine — ona ne nadomješta mjerenje koje bi bilo moguće, nego odgovara na pitanje na koje mjerenje odgovoriti ne može. Granica po kojoj se izračun smije uskratiti pritom je povučena eksperimentom iz pogl. 4.3.5 — po valjanosti testa i signalu, nikad po naravi zone — a njezino kršenje ima kvantificiranu cijenu jer bi tvrdo uklanjanje zona po naravi (nizak tlak, nizak ILI) ostavilo model bez upravo onih primjera niskog eksponenta iz kojih uči, s gotovo dvostruko većom pogreškom.

Praktična važnost zona razine 2 pritom je veća nego što bi njihov izostanak signala sugerirao. Upravo su uredne, niskogubitne zone one u kojima teorija i dijagnoza iz pogl. 5.4 predviđaju najviši eksponent — a time i najveće relativne uštede od redukcije tlaka (pogl. 2.2.2) — stoga bi njihovo prešutno izostavljanje iz analize sustavno diskriminiralo najperspektivnije kandidate za upravljanje tlakom. Druga razina omogućuje da i takve zone uđu u investicijsko rangiranje, ali pod uvjetima koji nesigurnost čine vidljivom. Procjena iz granične krivulje materijala konzervativna je po konstrukciji za zonu čiji stvarni omjer puknuća i pozadinskih gubitaka nije poznat, interval je usmjeren prema dolje, a ušteda se računa na njegovoj donjoj granici — zbog čega je rangiranje koje iz toga proizlazi oprezno u točno onom smjeru u kojem nedostaje dokazna građa.

Za zone razine 2 čiji katastar ne raspolaže pouzdanim udjelom materijala preostaje i treća, najskromnija razina informacije: zadana vrijednost $N1 = 1,0$ za miješane mreže, koju je probir pravila kvalitete (pogl. 4.2.3) izrijekom ocijenio pouzdanijom od vlastitog testa takve zone. I ta preporuka ima svoju hijerarhijsku logiku. Iskustveno pravilo nije dobro, ali je za nemjerljivu zonu manje loše od šumovitog mjerenja — dok je za mjerljivu zonu lošije od svega što model nudi, kako pokazuje usporedba s referencama u tablici 5.1. Cjelina tako čini dosljednu ljestvicu epistemičkog povjerenja: validirani statistički model gdje signal postoji, teorijska procjena iz granične krivulje materijala gdje signala nema ali katastar postoji, zadana vrijednost gdje nema ni jednoga ni drugoga — sa širinom intervala i konzervativnošću izračuna koji rastu kako se silazi ljestvicom.

Epistemička oznaka procjene u shemi nije popratni komentar nego strukturni dio izlaza. Svaka procjena, u kalkulatoru i u programskom modulu jednako, nosi broj svoje razine i izričitu napomenu koja razlikuje validirani statistički odgovor od teorijskoga — te se razina procjene ne može izgubiti ni pri skupnoj obradi stotina zona, ni pri prijenosu rezultata u drugi dokument, ni kod korisnika koji metodološku pozadinu ne poznaje. Uz procjenu i interval, izlaz obiju razina uključuje i FAVAD uštedu za referentno smanjenje tlaka od 10 %, izračunanu prema jedn. (5.2) (pogl. 2.2.2) — u razini 1 iz točkaste procjene, u razini 2 konzervativno iz donje

granice intervala — čime se procjena eksponenta bez ijednog dodatnog koraka prevodi u veličinu koju investicijska analiza izravno koristi. Time je zatvoren lanac od kampanjskog mjerenja do odluke — ulazi se računaju automatski iz sirovih veličina (pogl. 5.2.1), procjena dolazi s razinom, intervalom i uštedom, a preporuka o eventualnom terenskom testu iz savjetnika u pogl. 5.4.3.

Dvorazinska shema izravna je operativna posljedica dvaju središnjih nalaza istraživanja. Prvi je dihotomija ponašanja dokumentirana u pogl. 5.4. Sustavi s visokim gubicima sustavno odstupaju od teorijskog eksponenta prema dolje — izmjereni eksponent teži rasponu 0,5 do 0,8 neovisno o materijalu, jer gubicima dominiraju puknuća nepromjenjive površine — dok se sustavi s niskim gubicima približavaju gornjoj granici materijala, jer preostalim istjecanjem dominira pozadinska komponenta. Za prve je mjerodavan statistički model, za druge teorijski proračun — regresija je mjerodavna ondje gdje gubici nose signal, teorija ondje gdje signala nema. Drugi je nalaz konstruktivni ishod eksperimenata generalizacije u pogl. 5.3. Test diskretnog razdvajanja pokazao je da zasebni modeli za „male“ i „velike“ gubitke nisu bolji od združenoga kontinuiranog modela — stoga druga razina nije drugi model, nego druga vrsta izlaza, s drugim izvorom informacije (teorija umjesto regresije) i drugom epistemičkom oznakom.

U odnosu na praksu dokumentiranu pregledom literature, shema mijenja i sam način na koji se s nesigurnošću eksponenta postupa. Primjene FAVAD okvira u pravilu biraju između dviju krajnosti (pogl. 3.2): pretpostaviti literaturnu vrijednost — najčešće $N1 = 1,0$ — za sve zone bez razlike, ili eksponent kalibrirati mjerenjima konkretne mreže bez iskaza o tome koliko mu se smije vjerovati drugdje. Prva krajnost nesigurnost ignorira, druga je skriva u kalibracijskom postupku; dvorazinska shema umjesto toga nesigurnost raščlanjuje po njezinu uzroku i svakom uzroku dodjeljuje primjeren odgovor — statistički interval gdje je uzrok mjerni šum unutar validirane domene, teorijsku procjenu s eksplicitnom oznakom gdje je uzrok nemjerljivost eksponenta, a uskratno izračuna jedino gdje su ulazi neispravni. Takva raščlamba nije tehnička pojedinost nego uvjet odgovorne primjene analitičkog modela u investicijskom kontekstu. Odluka vrijedna ulaganja u redukcijske ventile smije se oslanjati na procjenu samo ako zna koje je vrste ta procjena — i upravo tu informaciju shema čini neodvojivom od same brojke.

Ograničenje sheme iskazuje se otvoreno, jer pripada samoj njezinoj konstrukciji. Procjene razine 2 načelno su nevalidabilne — za zone ispod praga signala ne postoji pouzdano terensko mjerilo naspram kojega bi se teorijska procjena mogla provjeriti, budući da bi i sam test tlačnih koraka ondje mjerio šum. Shema to ograničenje ne skriva nego ga priopćuje trima

mehanizmima: širim intervalom, konzervativnim izračunom ušteda i izričitom oznakom teorijske procjene. Praktična vrijednost takvog odgovora unatoč nevalidabilnosti nije sporna. Planeru koji uspoređuje kandidatske zone potrebna je i procjena za uredne zone — upravo one u kojima je upravljanje tlakom često najisplativije, jer visok eksponent obećava velike relativne uštede (pogl. 2.2.2) — a alternativa jasno označenoj teorijskoj procjeni bila bi prešutna primjena iskustvenog pravila $N1 = 1,0$, za koje je pokazano (tablica 5.1) da je lošije od svega što model nudi. Implementacija sheme u proračunskom kalkulatoru i programskom modulu, uključujući savjetnik za planiranje testova tlačnih koraka, opisana je u pogl. 6.3.

5.3. Granice generalizacije

Posljednje istraživačko pitanje glasi: gdje se razvijenom modelu smije vjerovati, a gdje njegova primjena prelazi u ekstrapolaciju. Odgovor je kvantificiran trima komplementarnim eksperimentima — validacijom izostavljanjem po jedne države, klsterskim eksperimentom provedenim bez uporabe državnih oznaka i testom diskretnog razdvajanja režima — čiji su rezultati dijelom namjerni negativni nalazi. Oni ne uljepšavaju domet modela nego ga razgraničuju, a upravo u tom razgraničenju leži njihova znanstvena vrijednost. Metodološki okvir eksperimenata najavljen je u pogl. 4.3.1, prema kojem izbor razine blokiranja validacije mora odgovarati cilju procjene, zbog čega grupiranje po zonama procjenjuje pogrešku na novoj zoni unutar pokrivenog raspona režima, dok grupiranje po cijelim državama namjerno prelazi u ekstrapolacijski režim i iskazuje se odvojeno — kao granica valjanosti, a ne kao mjera uspješnosti (Roberts i sur., 2017).

5.3.1. Provjere prenosivosti

Prvi eksperiment, validacija izostavljanjem po jedne države, trenira model na dvjema državama i ocjenjuje ga na trećoj, u cijelosti uskraćenoj. Rezultati po državama sažeti su u tablici 5.4. Degradacija je izrazita — izvandržavni MAE raste na 0,47 do 0,70, naspram 0,230 unutar validirane domene. Najpoučniji je slučaj izostavljanja Ekvadora. Preostali trening skup — južnoafrički i kanadski zapisi — gotovo i ne sadrži visokogubitne zone s dominacijom puknuća, stoga prilagođeni nagib na $\ln LD$ mijenja predznak (+0,19), a model precjenjuje eksponent svake propusne zone u prosjeku za +0,66. Model se, dakle, ne ekstrapolira na potpuno nepokriven režim gubitaka jer koeficijenti jednadžbe (5.1) kodiraju odnos naučen preko pokrivenog raspona intenziteta gubitaka, i kada trening skup taj raspon ne sadrži, formula ne degradira blago nego kvalitativno — do pogrešnog smjera veze.

Dizajn eksperimenta treba čitati u svjetlu njegove svrhe. On ne procjenjuje uspješnost modela u primjeni — nijedan razuman scenarij primjene ne uključuje predviđanje za državu o kojoj model nije vidio nijedan zapis bez ikakve lokalne prilagodbe — nego mjeri koliko naučeni odnos ovisi o pokrivenosti režima u trening skupu. Odgovor „znatno” nije slabost nego specifikacija — on kvantificira što korisnik modela mora osigurati (pokrivenost ciljnog režima, makar minimalnu) i što ne mora (geografsku ili institucionalnu sličnost s trening kampanjama). Asimetrija ishoda po izostavljenoj državi pritom je informativna sama po sebi. Degradacija je najteža upravo za Ekvador, čiji visokogubitni režim ostale dvije države gotovo ne pokrivaju, dok je za Kanadu — čiji se zapisi zbog slabog signala ionako pretežno nalaze ispod praga primjene — praktički bespredmetna. Granica valjanosti, drugim riječima, nije simetrična ograda oko baze nego karta pokrivenosti — gusto pokriveni režimi nose pouzdane predikcije, rijetko pokriveni nepouzdana, a nepokriveni nikakve.

Tablica 5.4. Rezultati validacije izostavljanjem po jedne države

Izostavljena država	n (trening)	n (ocjenjivani zapisi)	MAE izvan države	Pristranost	Nagib na ln LD
Ekvador	96	92	0,704	+0,657	+0,191 (promjena predznaka)
Južnoafrička Republika	107	81	0,466	−0,028	−0,088
Kanada	173	15	0,605	+0,373	−0,239

Napomena: unutar validirane domene model postiže MAE 0,230 (kvalitetno filtrirani podaci), a nagib konačnog modela v4.0 iznosi −0,2187 — pri izostavljenom Ekvadoru trening skup gotovo ne sadrži visokogubitni režim, stoga nagib mijenja predznak i model precjenjuje N1 svake propusne zone u prosjeku za +0,66. Na kvalitetno filtriranim ocjenjivanim zapisima MAE iznosi 0,701 za Ekvador (n = 90) i 0,667 za Južnoafričku Republiku (n = 10); Kanada nema kvalitetno filtriranih zapisa. Klasterski eksperiment proveden bez uporabe državnih oznaka reproducira istu degradaciju (pristranost +0,21 do +0,28, kolaps nagiba na −0,05).

Uz iznos degradacije, tablica 5.4 dokumentira i njezin mehanizam, koji je za razumijevanje granice važniji od samih brojki. Promjena predznaka nagiba pri izostavljenom Ekvadoru znači da model, treniran samo na niskogubitnim i šumovitim režimima, iz preostalih podataka izvodi fizikalno obrnut odnos — da eksponent s gustoćom gubitaka raste — zbog čega propusnim zonama sustavno pripisuje visok eksponent i time bi upravljanje tlakom preporučivao upravo ondje gdje mu FAVAD mehanika daje najmanji učinak. Pogreška ekstrapolacije, dakle, nije samo kvantitativna nego usmjerena i za odlučivanje osobito rizična. Model izvan domene ne vraća očito besmislene vrijednosti — vraća uvjerljive brojke pogrešnog rangiranja. Upravo zato je prag primjene i dokumentacija domene (pogl. 5.2.3) sastavni dio isporuke modela, a prosječna pristranost od +0,66 pri izostavljenom visokogubitnom režimu najjači je pojedinačni argument da se model u novom kontekstu ne primjenjuje bez lokalne prilagodbe.

Drugi eksperiment utvrđuje da granica iz prvog eksperimenta nije geografska nego hidraulička. Mjerne zone grupirane su isključivo po hidrauličkom profilu — gubicima vode, logaritmu gustoće gubitaka i osnovnom tlaku — metodom *k*-srednjih vrijednosti (engl. *k-means*; Hastie i sur., 2009) s tri klastera, bez ikakvih državnih oznaka. Ishod je jednoznačan. Klasteri gotovo savršeno rekonstruiraju tri države — jedan klaster sadrži 90 od 92 ekvadorska zapisa — a validacija izostavljanjem po jednog klastera reproducira degradaciju iz prvog eksperimenta (pristranost +0,21 do +0,28, kolaps nagiba na -0,05). Zaključak je dvostruk. Prvo, „države” u ovoj bazi naprosto jesu hidraulički režimi — politička je etiketa informacijski suvišna, a heterogenost baze (pogl. 4.2.1) ispravno se čita kao pokrivenost režima, ne kao geografska raznolikost. Drugo, isti eksperiment nosi i konstruktivan korolar praktične vrijednosti. U klusterskoj inačici izostavljanja ekvadorskog režima trening skup zadržao je samo dva zapisa ciljnog režima — i ta su dva bila dovoljna da nagib modela ostane negativan. Malen broj kvalitetno filtriranih lokalnih mjerenja, dakle, dostatan je za prilagodbu modela novom režimu — preporuka lokalne rekalkibracije dvaju koeficijenata pri primjeni u novom kontekstu (pogl. 6.3) nije oprezna formulacija nego kvantificiran nalaz.

Da klasteri rekonstruiraju države, nije statistička slučajnost nego izravna posljedica profila dokumentiranih u pogl. 4.2.1. Ekvadorski režim ekstremnih gubitaka pri niskom tlaku, južnoafrički režim pretežno plastičnih mreža visokog tlaka s niskim do umjerenim gubicima i kanadski režim uređenih mreža slabog signala tri su međusobno udaljene točke u prostoru hidrauličkih značajki, stoga ih algoritam grupiranja bez ikakvih oznaka razdvaja gotovo savršeno. Upravo zato eksperiment ima dokaznu snagu koju validacija izostavljanjem po jedne države sama nema. Naime, da je degradacija iz prvog eksperimenta odražavala nešto specifično nacionalno — mjerne konvencije, opremu, praksu kampanja — klusterska inačica, koja raspolaže samo hidrauličkim veličinama, ne bi je mogla reproducirati; a reproducira je gotovo identično. Isprepletenost države i hidrauličkog režima, istaknuta u pogl. 4.2.1 kao temeljno ograničenje interpretacije baze, time je razriješena u korist hidraulike — ono što se u bazi ne može razdvojiti od države jest režim, a ono što režim čini jesu izmjerene veličine koje model već koristi.

Korolar o dostatnosti malog broja lokalnih zapisa vrijedi razraditi do operativnog postupka, jer on granicu generalizacije pretvara iz zabrane u uputu. Operater koji model želi primijeniti u novom kontekstu — novoj državi, novom tipu sustava, režimu gubitaka slabo pokrivenom bazom — ne treba ponoviti cijelo istraživanje. Treba prikupiti nekoliko kvalitetno filtriranih lokalnih mjerenja (dostatan signal, korak u pojasu 15–35 %), provjeriti slaganje njihovih

izmjerenih eksponenata s predikcijama modela i, pri sustavnom odstupanju, ponovno prilagoditi dva koeficijenta jednadžbe (5.1) na lokalnim zapisima — regresijski zadatak rješiv i u proračunskoj tablici. Klasterski eksperiment daje toj uputi kvantitativno jamstvo s njezine najosjetljivije strane jer su čak i dva zapisa ciljnog režima bila dovoljna da spriječe kvalitativni slom nagiba, što znači da prijelaz iz nepokrivenog u minimalno pokriven režim ne zahtijeva kampanju nego prve rezultate protokola kontinuirane rekalkibracije. Granica valjanosti time dobiva svoju konačnu, konstruktivnu formulaciju. Model se ne prenosi u novi kontekst kao gotova istina nego kao kalibrirana apriorna procjena s definiranim postupkom lokalne provjere i prilagodbe — a trošak tog postupka mjeri se u pojedinačnim noćnim mjerenjima, ne u istraživačkim projektima. Ista formulacija određuje i doseg tvrdnje o „visokoj razini preciznosti“ iz druge hipoteze, tako da je preciznost dokumentirana u pogl. 5.2.2 iskazana za validiranu domenu i unutar nje vrijedi bez ograda, dok se izvan domene ne degradira prešutno nego uz eksplicitno pravilo — rekalkibriraj ili ne primjenjuj — stoga je i formalna provjera hipoteza u pogl. 6.1 provedena s tim domenskim određenjem, a ne kao bezuvjetna tvrdnja.

Treći eksperiment ispitao je alternativu koju granica domene prirodno sugerira: zasebne modele za „male“ i „velike“ gubitke. Razdvajanje po pragu gubitaka vode od 40 %, po pragu gustoće gubitaka 0,02, ili preko interakcijskog člana režim–nagib, redom je neznatno lošije od združenoga kontinuiranog modela na pouzdanom mjerilu: kvalitetno filtrirani MAE 0,239 do 0,240 naspram 0,234 za kontinuirani oblik. Os intenziteta gubitaka valja, dakle, tretirati kao kontinuiranu varijablu koju model već sadrži, a ne kao kategorijalnu granicu. Razlog slabijeg rezultata diskretnih inačica statistički je poučan. Svako razdvajanje raspolovljuje trening skup, zbog čega svaki od dvaju podmodela procjenjuje svoje koeficijente iz upola manje podataka — trošak koji bi se isplatio samo kada bi odnos eksponenta i gustoće gubitaka bio kvalitativno različit s dviju strana granice; logaritamski oblik jednadžbe (5.1) tu promjenu nagiba, međutim, već sadrži kontinuirano, te diskretna granica ne dodaje izražajnost nego samo varijancu, uz proizvoljnost samog položaja praga i skokovit izlaz na njemu — svojstvo posebno nepoželjno za investicijsko rangiranje, u kojem bi dvije gotovo identične zone s dviju strana granice dobile osjetno različite procjene. Konstruktivna posljedica svih triju eksperimenata stoga nije drugi model nego druga razina izlaza, formalizirana u pogl. 5.2.3. Unutar validirane domene statistički model odgovara kvantitativno; ispod praga signala — gdje eksponent ne može razriješiti nijedno mjerenje — odgovara jasno označena teorijska procjena iz granične krivulje materijala.

Postav, ključne rezultate i implikacije svih triju eksperimenata sažima tablica 5.5.

Tablica 5.5. Eksperimenti provjere generalizacije

Eksperiment	Postav	Ključni rezultat	Implikacija
validacija izostavljanjem po jedne države	treniranje na dvjema državama, ocjena na trećoj, u cijelosti uskraćenoj	izvandržavni MAE 0,47 do 0,70 naspram 0,230 unutar validirane domene; pri izostavljenom Ekvadoru nagib mijenja predznak (+0,19), a prosječna pristranost iznosi +0,66	model se ne ekstrapolira na nepokriven režim gubitaka; u novom kontekstu nužna je lokalna prilagodba koeficijenata
klusterski eksperiment bez uporabe državnih oznaka	grupiranje zona metodom k-srednjih vrijednosti (tri klastera) isključivo po hidrauličkom profilu: gubici vode, logaritam gustoće gubitaka, osnovni tlak	klasteri gotovo savršeno rekonstruiraju države (90 od 92 ekvadorska zapisa u jednom klasteru); izostavljanje klastera reproducira degradaciju (pristranost +0,21 do +0,28, kolaps nagiba na -0,05); već dva zapisa ciljnog režima drže nagib negativnim	granica valjanosti je hidraulička, a ne geografska; malen broj kvalitetno filtriranih lokalnih mjerenja dostatan je za prilagodbu modela
test diskretnog razdvajanja režima	zasebni modeli za „male” i „velike” gubitke: prag gubitaka vode 40 %, prag gustoće gubitaka 0,02, interakcijski član režim–nagib	kvalitetno filtrirani MAE 0,239 do 0,240 naspram 0,234 za združeni kontinuirani model	intenzitet gubitaka kontinuirana je varijabla koju model već sadrži; druga razina izlaza umjesto drugog modela

5.3.2. Domenske granice primjene

Uz glavnu granicu — pokrivenost domene, kvantificiranu eksperimentima iz pogl. 5.3.1 — stoje i dvije podređene, iskazane izravno. Prvo, trening mreže pretežno su mreže velikih gubitaka — medijan gubitaka vode u bazi iznosi približno 68 % ulaznog volumena — stoga se predikcije za dobro održavane sustave s gubicima ispod približno 15 % oslanjaju na rijetko zastupljen donji rub domene. Valja ih čitati kvalitativno, kao „eksponent je visok (približno 1,3 do 1,5)”, a ne kao preciznu vrijednost. Drugo, znatan dio rezidualne varijance čini mjerni šum terenskih testova koji nijedna varijabla kampanje ne može objasniti (pogl. 4.3.6). Model je, naime, kalibrirana apriorna procjena, i nijedan validacijski protokol tu granicu ne može ukloniti — može je samo nepristrano izmjeriti. Za praktičnu primjenu iz svega slijedi jednostavno pravilo s kvantificiranim opravdanjem. Model se u novom kontekstu primjenjuje uz lokalnu rekalkibraciju dvaju koeficijenata, za koju je dostatan malen broj kvalitetno filtriranih lokalnih zapisa — najbolje prikupljenih protokolom kontinuirane rekalkibracije iz pogl. 5.4.3, koji svako puštanje redukcijskog ventila u pogon pretvara u protokolarno ispravan test bez dodatnog

troška. Granice generalizacije određuju, konačno, i put njihova budućeg pomicanja, čime se zaokružuje odnos ovog potpoglavlja prema dvorazinskoj shemi iz pogl. 5.2.3 i protokolu iz pogl. 5.4.3. Tanak niskogubitni kraj domene ne može se proširiti postojećim podacima ni boljim algoritmom — može se proširiti samo akumulacijom protokolarno ispravnih mjerenja iz zona koje danas nedostaju: uređenih mreža s dostatnim signalom, zona miješanih materijala s niskim ILI-jem te zona testiranih korakom u pojasu 15–35 %. Za tu akumulaciju istraživanje je ostavilo tri instrumenta: kriterije kvalitete koji svaki novi zapis čine upotrebljivim po konstrukciji (pogl. 5.4.3), protokol kontinuirane rekalkulacije koji nove zapise pribavlja bez dodatnog troška pri svakoj ugradnji redukcijskog ventila te model treniran isključivo na strogo filtriranom podskupu protokolarno ispravnih zapisa, koji je već pri 23 zapisa konkurentan produkcijskome i označen kao kandidat za ponovnu prilagodbu kad se građa nakupi (pogl. 4.3.5). Dvorazinska shema pritom osigurava da model ni u međuvremenu ne šuti o zonama izvan domene. Procjena razine 2 premošćuje razdoblje do akumulacije mjerenja, a svaka zona koja iz razine 2 s vremenom prijeđe u razinu 1 — jer su joj gubici porasli ili je mjerenje postalo dostupno — automatski prelazi s teorijske na statističku procjenu.

Sintetički iskaz granica valjanosti glasi: granica generalizacije razvijenog modela jest pokrivenost domene u prostoru intenziteta gubitaka, a ne geografija. Unutar pokrivenog raspona — od uređenih mreža s dostatnim signalom gubitaka do sustava kojima gubici dominiraju — model generalizira na neviđene zone s točnošću iz pogl. 5.2.2; izvan njega degradira predvidljivo i dokumentirano.

5.4. Popratni znanstveni doprinosi

Uz konačni model i njegove granice, istraživanje je dalo i skupinu popratnih znanstvenih doprinosa, nastalih iz istog metodološkog aparata, ali valjanih i neovisno o samom modelu: analizu značajki s fizikalnom interpretacijom i spoznaju o uvjetnoj ulozi cijevnog materijala (pogl. 5.4.1), kontroliranu dijagnozu zona sa 100 % plastičnih cijevi (pogl. 5.4.2) te protokolarni pojas tlačnog koraka za terensko određivanje eksponenta (pogl. 5.4.3). Odnos tih doprinosa prema glavnome rezultatu dvojak je. S jedne strane objašnjavaju zašto konačni model ima oblik kakav ima — bez cijevnog materijala kao ulaza i s težinama s ispravkom za pristranost mjernih podataka — a s druge strane stoje kao samostalni nalazi, primjenjivi i ondje gdje se sam model ne koristi.

Triangulirani postupak odabira značajki, čije su metode i međusobne kontrole opisane u pogl. 4.3.4, dao je na ovoj bazi konzistentan i fizikalno čitljiv rezultat. Poredci triju neovisnih metoda

— Spearmanove korelacije ranga, preživljavanja Lasso koeficijenata i permutacijske važnosti izvan preklopa — međusobno se slažu, a njihov je konsenzusni vrh sažet u tablici 5.6, zajedno sa smjerom svake veze i njezinom hidrauličkom interpretacijom. Potpuni rezultati svake od četiriju metoda — mjere važnosti svih kandidatskih značajki i redoslijed njihova ulaska postupnim uključivanjem — pohranjeni su u revizijskom tragu (Prilog D: `feature_importance.csv`, `forward_selection_path.csv`).

Tablica 5.6. Konsenzusni poredak važnosti kandidatskih parametara sa smjerom veze i hidrauličkom interpretacijom

Rang	Značajka	Smjer	Hidraulička interpretacija
1	ILI	negativan	Visok ILI = gubicima dominiraju velika detektabilna puknuća → ponašanje otvora nepromjenjive površine → $N1 \rightarrow 0,5$. U skladu s FAVAD-om.
2	P_0 (osnovni tlak)	pozitivan	Viši radni tlak širi otvore istjecanja promjenjive površine → veći $N1$. U skladu s FAVAD-om.
3	WL (gubici vode) / Q_{rl}/SC	negativan	Isti mehanizam kao ILI: sustavi s većim gubicima ponašaju se više kao nepromjenjivi otvori.
4	Udio fleksibilnih (plastičnih) cijevi	pozitivan, ali slab	Očekivani FAVAD pokretač, no ovdje slab jer Južnoafrička Republika (polovica podataka) nema varijance u njemu (sve plastika).
5	Duljina priključnih cjevovoda (<code>SC_pipe_length</code>)	slabo negativan	Doprinos gubitaka kućnih priključaka.

Napomena: poredak je konsenzus triju neovisnih metoda — preživljavanja Lasso koeficijenata, permutacijske važnosti izvan preklopa (gradijentno pojačavanje) i Spearmanove korelacije ranga.

Na vrhu poretka stoji ILI, s negativnim smjerom. Visok ILI označava zonu u kojoj gubicima dominiraju velika, detektabilna puknuća, dakle ponašanje otvora nepromjenjive površine i eksponent koji teži prema 0,5 — izravno u skladu s FAVAD mehanizmom miješanja iz pogl. 2.2.2. Slijedi osnovni tlak P_0 s pozitivnim smjerom — viši radni tlak širi otvore istjecanja promjenjive površine i povisuje eksponent, u skladu s konceptom broja curenja iz pogl. 2.2.1. Treće mjesto dijele gubici vode i statistike intenziteta gubitaka (Q_{rl}/SC i srodne), s negativnim smjerom — isti mehanizam kao ILI, izražen drugim normalizacijama. Udjel fleksibilnih cijevi pokazuje očekivano pozitivan, ali slab smjer — slab zato što polovica baze, južnoafrički podskup, u toj varijabli gotovo nema varijance (medijan udjela 100 %), zbog čega korelacijska

analiza na razini cijele baze materijalu strukturno ne može izmjeriti puni učinak; dublji razlozi njegove prividne beznačajnosti predmet su pogl. 5.4.1 i 5.4.2. Na začelju mjerljivog utjecaja je duljina priključnih cjevovoda, sa slabo negativnim smjerom koji odražava doprinos istjecanja na kućnim priključcima. Ključni je nalaz cijele analize da su svi smjerovi u skladu s FAVAD teorijom. Model koji će iz ovih značajki učiti ne uči proizvoljne korelacije nego strukturu koju hidraulika istjecanja predviđa — prvi i nužni test fizikalne smislenosti pristupa.

Snaga konsenzusa vidi se najbolje u tome kako su ga tri metode dosegle različitim putovima, sa slijepim točkama koje se ne preklapaju (pogl. 4.3.4). Filtarska komponenta rangira varijable neovisno o bilo kojem modelu, stoga njezin poredak ne može biti artefakt izbora algoritma — ali ne vidi komplementarnosti. Lasso, dobivši sve kandidate odjednom, provodi selekciju unutar samog treniranja. Redoslijed kojim varijable ispadaju s rastućom regularizacijom daje rangiranje osjetljivo upravo na zajedničko djelovanje varijabli — a njegov je ishod na ovoj bazi bio dokazno najснаžniji jer pri regularizaciji podešenoj pod grupiranom validacijom preživljavaju samo članovi intenziteta gubitaka. Permutacijska važnost, izračunata izvan preklopa, mjeri oslanjanje već treniranog modela na pojedinu varijablu i time hvata ono što korelacije ne mogu — varijablu koja je korelirana s ciljem, ali ju model ne treba jer istu informaciju crpi drugdje. Da sve tri metode, uz četvrtu omotačku provjeru, konvergiraju na isti vrh poretka, čini vjerojatnost artefakta jedne metode zanemarivom; jednako je važno i ono što nijedna metoda nije podržala. Indikatori države, logaritamske transformacije povrha već uključenih i preostale imovinske statistike ni u jednoj metodi nisu ušli među nositelje informacije — negativan nalaz koji unaprijed otklanja primjedbę da bi bogatiji ulazni prostor dao bitno bolji model.

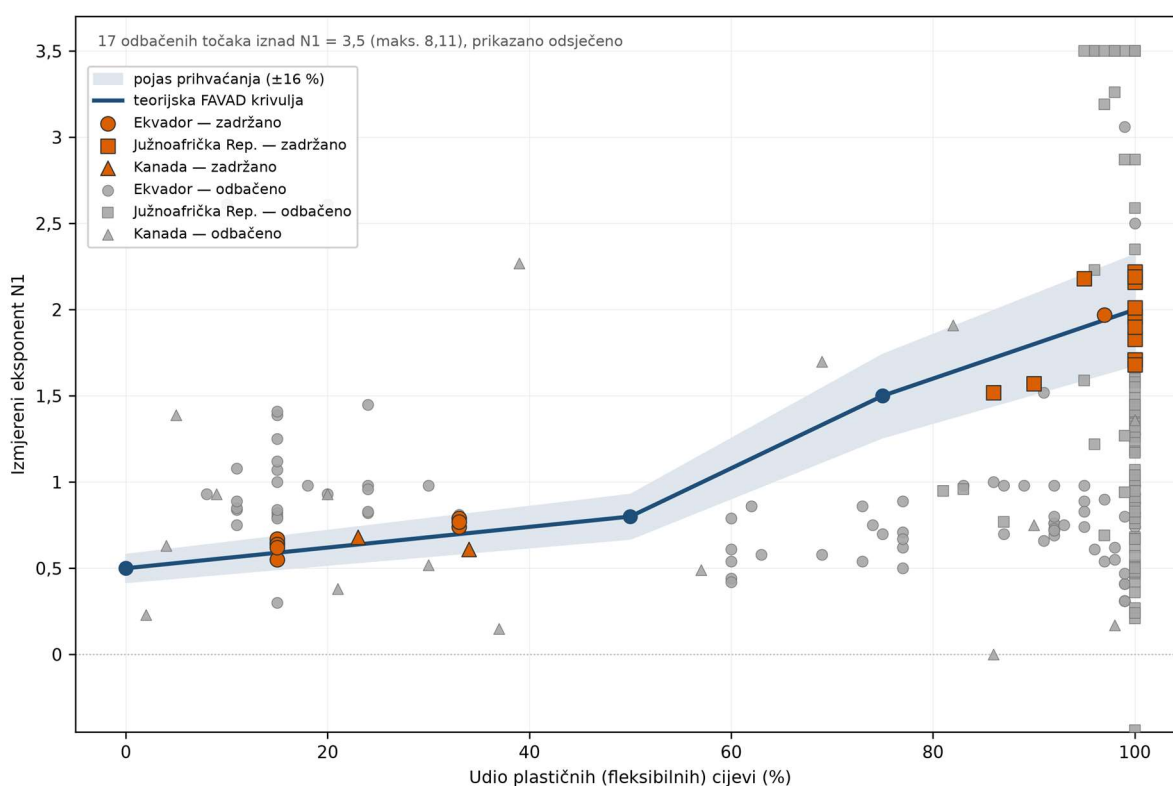
Rezultat analize značajki ujedno je i izravan odgovor na prvi dio istraživačkog programa iz pogl. 1.4 — parametri potrebni za analitičko određivanje eksponenta nisu samo identificirani nego i hijerarhijski strukturirani prema informacijskom doprinosu. Na vrhu hijerarhije stoji intenzitet gubitaka kao dominantna os informacije, mjerljiv bilo kojim od pet koreliranih pokazatelja intenziteta gubitaka; slijedi razina tlaka, djelatna kroz normalizaciju; potom materijal, djelatna kao uvjetna gornja granica; a na dnu su imovinske statistike, informativne tek rubno. Iz hijerarhije proizlaze dva praktička korolara koja nadilaze konkretni model. Prvi je minimalni podatkovni zahtjev. Budući da nijedna kombinacija čisto katastarskih varijabli ne nadmašuje naivne reference (pogl. 4.3.3), analitička procjena eksponenta počinje mjerenjem protoka na ulazu u zonu — operater koji želi procjenu, a nema kampanjskih mjerenja, ne treba bolji model nego zapisivač protoka. Drugi je korolar smjer optimizacije — kako informacijski

sadržaj s brojem parametara stagnira gotovo odmah, ulaganje u kvalitetu mjerenja jednog parametra (dulje kampanje, pouzdanija procjena noćne potrošnje) obećava više od ulaganja u prikupljanje dodatnih parametara. Formalna provjera prve hipoteze naspram ovih nalaza provedena je u pogl. 6.1. Time je ujedno ispunjena i najava iz pogl. 4.2.2. LD, uveden ondje kao tlakom normalizirani srodnik ILI-jeve UARL normalizacije, ovim se analizama potvrđuje kao informacijski najbogatija pojedinačna značajka eksponenta — ne zato što bi nosio informaciju koju ostali pokazatelji iz te skupine nemaju, nego zato što je jedini iskazuje u obliku izračunljivom izravno iz triju kampanjskih mjerenja, bez godišnje bilance i bez katastarskih ulaza podložnih zastarijevanju.

Drugi sloj analize kvantificira koliko je značajki stvarno potrebno. Postupno uključivanje značajki pod grupiranom validacijom (pogl. 4.3.4) daje gotovo ravnu krivulju pogreške. Jedna značajka — Qrl/SC, najbolji pojedinačni predstavnik intenziteta gubitaka u eksplorativnoj fazi — postiže MAE 0,350, naspram $0,331 \pm 0,044$ najboljeg modela s devet značajki. Pravilom jedne standardne pogreške obranjivi minimalni skup glasi: ILI (ili njegov surogat među statistikama gubitaka), prosječni tlak zone i udjel fleksibilnog materijala — tri teorijski utemeljene značajke koje vjerno preslikavaju tri FAVAD pokretača (omjer puknuća i pozadinskih gubitaka, razinu tlaka, materijal) i postiže MAE 0,349, statistički nerazlučivo od punog modela s trinaest varijabli. Dodavanje indikatora države, logaritamskih transformacija ili preostalih deset varijabli ne poboljšava značajno točnost izvan zona. Ravna krivulja i sama je nalaz. Kandidatske varijable dijele jednu dominantnu os informacije — intenzitet gubitaka — nakon koje preostale varijable dodaju pretežno redundanciju. Pet varijabli koje tu os kodiraju (ILI, WL, Qrl/km, Qrl/SC i LD) međusobno je izrazito korelirano, zbog čega je pitanje „koja je od njih važna“ dijelom neodredivo — Rashomonov efekt opisan u pogl. 4.3.4 — a određiva je tek informacija koju nose zajednički. Da je konačna prednost pripala varijabli LD (pogl. 5.1), nije statistička slučajnost nego posljedica konstrukcije. Ona jedina normalizira gubitke i po opsegu mreže i po tlaku, sažimljući u jednoj veličini ono što ILI postiže UARL normalizacijom, ali iz veličina koje kampanja izravno mjeri; prosječni tlak pritom djeluje unutar normalizacije, što objašnjava i zašto sirovi P_0 — drugi po važnosti u korelacijskom poretku — konačnom modelu kao zaseban ulaz ne dodaje ništa. Za treći FAVAD pokretač, materijal cijevi, analiza značajki otvara pitanje koje sljedeća dva potpoglavlja rješavaju: kako pomiriti njegovu teorijsku središnjost s empirijski zanemarivim, štoviše pogrešno predznačenim koeficijentom.

5.4.1. Materijal cijevi kao uvjetna gornja granica eksponenta

Prva linija dokaza o stvarnoj ulozi materijala dolazi iz analize teorijskog pojasa, uvedene u pogl. 4.2.3 kao četvrta leća kontrole kvalitete. Postavka je jednostavna. FAVAD teorija materijala implicira za svaku zonu teorijski eksponent iz udjela plastičnih cijevi — po dijelovima linearnu krivulju kroz sidrišta 0 % → 0,5; 50 % → 0,8; 75 % → 1,5; 100 % → 2,0 — te se može ispitati koliko se terenskih mjerenja s tom implikacijom slaže unutar pojasa prihvaćanja od ± 16 %. Sidrišta krivulje nisu prilagođena ovoj bazi nego preuzeta iz FAVAD okvira dokumentiranog u pogl. 2.2 — donje sidrište odgovara hidraulici otvora nepromjenjive površine u potpuno krutoj mreži, gornje ponašanju istjecanja promjenjive površine u potpuno fleksibilnoj mreži, a nelinearan raspored među njima odražava to da fleksibilna komponenta počinje dominirati zonom tek pri visokim udjelima plastike. Napetost između gornjeg sidrišta od 2,0 i gornje granice na razini zone od 1,5 (jedn. (5.1)) pritom je namjerna i informativna. Vrijednost 2,0 opisuje što pojedinačni otvori istjecanja u plastici mogu pokazati, dok mješavina na razini zone — koja uvijek sadrži i krute elemente opreme, spojeva i priključaka — u FAVAD okviru ostaje ograničena na 1,5; zato i procjena razine 2 (pogl. 5.2.3) očitavanje krivulje ograničava tom gornjom granicom. Odnos svih 217 zapisa prema krivulji prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3. Izmjereni eksponent N1 naspram udjela plastičnih cijevi s teorijskom FAVAD krivuljom i pojasom prihvaćanja ± 16 %

Kvantitativni ishod je strog. Pojas prolaze samo 24 od 217 zapisa (11 %), iz 19 od 172 mjerne zone — 9 od 95 ekvadorskih, 13 od 104 južnoafrička i 2 od 18 kanadskih. Zadržani se uzorak dijeli u dva čista materijalna režima bez ijednog preživjelog zapisa između: miješane i krute mreže (udjel plastike do 50 %) s prosječnim eksponentom 0,67 te potpuno plastične mreže s prosjekom 1,90. Na tom je podskupu provedena usporedba modela pod validacijom izostavljanja po jedne zone — jedinom obranjivom shemom pri 19 grupa (pogl. 4.3.1) — s rezultatima u tablici 5.7. Sama teorijska krivulja, korištena izravno za predviđanje bez ikakvog prilagođavanja, postiže MAE 0,131 uz R^2 0,93 i nadmašuje svaki trenirani model; linearna regresija samo s udjelom plastike postiže 0,165, Lasso sa svih jedanaest značajki također 0,165 — pri čemu Lasso, dobivši sve kandidate, poništava sve koeficijente osim udjela plastike — slučajna šuma 0,243, a neregularizirana linearna regresija sa svih jedanaest varijabli kolabira (MAE 0,493, negativan R^2), što je karakterističan simptom prenaučivosti pri 24 zapisa. Obje naivne reference ostaju daleko iza (MAE 0,651 odnosno 0,662).

Svaki redak te usporedbe nosi zasebnu pouku. Negativan koeficijent determinacije obiju referenci (−0,20 odnosno −0,38) posljedica je bimodalne strukture zadržanog uzorka. Konstantna predikcija promašuje oba režima, stoga je gora i od prosjeka unutar svakoga od njih — što samo po sebi pokazuje da teorijski konzistentni podaci nose snažnu, materijalom posredovanu strukturu. Izjednačenost linearne regresije s jednim ulazom i Lassa sa svih jedanaest (obje 0,165) pokazuje da deset dodatnih varijabli na ovom podskupu ne sadrži ništa što udjel plastike već ne kaže — Lasso ih, dobivši ih sve, sam poništava. Slučajna šuma (0,243) zaostaje za linearnim oblikom iz istog razloga kao i na punoj bazi — pri 24 zapisa fleksibilnost se plaća varijancom. Kolaps neregulariziranog jedanaest-varijabilnog modela (0,493, negativan R^2) ogledan je primjer prenaučivosti koji u ovoj tablici ima ulogu kontrole — pokazuje da dobri rezultati ostalih modela nisu svojstvo svakog modela na malom uzorku, nego svojstvo primjerene složenosti. A prednost same neprilagođene teorijske krivulje (0,131) pred svim treniranim modelima kaže da na podacima koji prolaze kontrolu kvalitete FAVAD sidrišta nisu samo kvalitativno ispravna nego i kvantitativno kalibrirana — nijedan stupanj slobode prilagodbe nije se isplatio.

Tablica 5.7. Usporedba modela na teorijski konzistentnom podskupu pod validacijom izostavljanja po jedne zone

Model (leave-one-DMA-out)	MAE	RMSE	R^2
Referenca: prosjek(N1)	0,651	0,692	−0,20
Referenca: N1 = 1,0	0,662	0,742	−0,38
Teorijska FAVAD krivulja sama (bez strojnog učenja)	0,131	0,163	0,93

Model (leave-one-DMA-out)	MAE	RMSE	R ²
Linearna regresija, samo udjel plastike	0,165	0,191	0,91
Lasso, svih 11 značajki	0,165	0,202	0,90
Random Forest, svih 11 značajki	0,243	0,280	0,80
Linearna regresija, svih 11 značajki	0,493	0,714	-0,28

Napomena: podskup obuhvaća 24 zapisa iz 19 mjernih zona koji prolaze pojas prihvaćanja od $\pm 16\%$ oko teorijske FAVAD krivulje materijala; zbog selekcije prema slaganju s krivuljom rezultat potvrđuje unutarnju konzistentnost, a ne neovisnu prediktivnu moć (inducirana korelacija $r = 0,96$).

Ovaj rezultat traži disciplinirano čitanje, i to dvostruko, kako je metodološki obrazloženo u pogl. 4.2.3. Povoljno čitanje: kada se odstrane nepouzdana terenski testovi, procjena eksponenta svodi se na jednu, lako dostupnu varijablu iz katastra imovine, a unaprijed zadana FAVAD krivulja ne treba rekaliibraciju — podaci koji prolaze kontrolu kvalitete potvrđuju usvojena sidrišta. Oprezno čitanje: budući da su zapisi odabrani upravo prema slaganju s krivuljom, snažan učinak udjela plastike dijelom je ugrađen samom konstrukcijom — inducirana korelacija udjela plastike i eksponenta u zadržanom uzorku iznosi $r = 0,96$ — slijedom toga analiza potvrđuje unutarnju konzistentnost teorije s najkvalitetnijim mjerenjima, a ne njezinu neovisnu prediktivnu moć. Vanjski valjan zaključak jest sama stopa prolaznosti — da samo 11 % terenskih testova daje eksponent usklađen s teorijom materijala unutar $\pm 16\%$, više govori o kvaliteti terenskih mjerenja nego o teoriji ili modelu. Kad bi pojas trebao poslužiti kao test hipoteze o krivulji, morao bi se primijeniti na nove, protokolarno ispravne testove (pogl. 5.4.3) koji nisu korišteni za postavljanje sidrišta. Ta ograda ujedno ocrtava put kojim analiza pojasa može prerasti svoju sadašnju, dijagnostičku ulogu. Sidrišta krivulje, fiksirana u ovom istraživanju prije prikupljanja budućih mjerenja, imaju status unaprijed registrirane predikcije — svaki budući test proveden po protokolu iz pogl. 5.4.3, na zoni s pouzdanim katastrom materijala, bit će neovisna provjera krivulje kakvu postojeća građa, opterećena cirkularnošću selekcije, ne može pružiti. Akumulacijom takvih testova (pogl. 7.2) pojas bi se iz leće kontrole kvalitete pretvorio u provjerljivu hipotezu s poznatim uvjetima valjanosti — a njegova sadašnja stopa prolaznosti od 11 % u postojećim arhivama postala bi mjerilo napretka terenske prakse.

Struktura prolaznosti po državama dodatno osvjetljuje što pojas zapravo mjeri. Ekvadorski zapisi prolaze rijetko (9 od 95) ne zato što bi njihova mjerenja bila nepouzdana — upravo suprotno, ekvadorski se podskup validira najbolje u cijeloj bazi (pogl. 5.2.2) — nego zato što njihove zone, s ekstremnim gubicima kojima dominiraju puknuća, stvarno leže ispod granične krivulje materijala, to jest pouzdano mjere eksponent koji teorija materijala za njih i ne predviđa. Južnoafrički zapisi (13 od 104) kombiniraju oba uzroka neprolaznosti — šumovita mjerenja slabog signala i duboke korake koji eksponent potiskuju — dok kanadski podskup (2

od 18) uglavnom nema dostatan signal da bi izmjerena vrijednost išta pouzdano govorila. Ista stopa prolaznosti od 11 % time objedinjuje dva bitno različita mehanizma: zapise koji pouzdano mjere odstupanje od teorije i zapise koji nepouzdanu mjere bilo što. Upravo ta dvojnost diskvalificira pojas kao trening filter, a kvalificira ga kao dijagnostičku leću — i objašnjava zašto se bimodalna struktura zadržanog uzorka (0,67 naspram 1,90, bez zapisa između) ne smije čitati kao empirijski dokaz diskretnosti materijalnih režima jer je kontinuirani središnji dio krivulje, između 50 i 75 % plastike, u bazi naprosto slabo zastupljen zonama koje bi pojas mogle proći. Kvalitativno, oba režima leže ondje gdje ih i laboratorijska građa iz pogl. 2.2.3 smješta: kruti materijali i puknuća uz donju FAVAD granicu, neoštećene fleksibilne mreže uz gornju — s time da terenska mjerenja gornji režim dosežu samo pod uvjetima koje će identificirati dijagnozu u pogl. 5.4.2.

Za razumijevanje uloge materijala presudno je, međutim, ono što slika 5.3 pokazuje mimo statistike prolaznosti — odbačeni zapisi nisu samo šumoviti visoki ekstremi. Velika skupina potpuno plastičnih južnoafričkih zona mjeri eksponent između približno 0,5 i 1,5 — znatno ispod teorijske vrijednosti 2,0 za potpuno plastičnu mrežu. Hidraulički je to prije vjerodostojno nego anomalno. I u potpuno plastičnoj mreži gubici kojima dominira nekoliko velikih detektabilnih puknuća, ili istjecanje na krutim spojnim elementima i opremi priključaka, ponašaju se kao otvori nepromjenjive površine i vuku eksponent zone prema 0,5 — mehanizam poznat iz komponentne analize istjecanja (Van Zyl i Clayton, 2007) i eksperimentalno dokumentiran na razini pojedinačnih otvora (Van Zyl i Malde, 2017). Krivulju materijala stoga treba čitati kao gornju granicu — vrijednost koju zona danog materijalnog sastava može doseći kada njezinim istjecanjem dominira pozadinska komponenta — a ne kao središnju procjenu jer efektivni eksponent plastične mreže ovisi i o njezinu omjeru puknuća i pozadinskih gubitaka, koji ILI aproksimira, u skladu sa smjerom ILI učinka iz tablice 5.6. Upravo ta formulacija — materijal kao uvjetna gornja granica, a ne aditivan parametar — pomiruje teoriju s regresijskim nalazima. Aditivni koeficijent mjeri prosječni pomak eksponenta po jedinici udjela plastike preko svih uvjeta opažanja, a takav prosjek nema fizikalnog smisla ako materijal određuje samo gornju granicu, dok stvarnu poziciju ispod nje određuju drugi čimbenici. Koji su to čimbenici i koliko svaki pridonosi, utvrđuje kontrolirana dijagnoza u sljedećem potpoglavlju; operativna posljedica — teorijska krivulja kao izvor procjene razine 2 i kao neovisna unakrsna provjera statističkog modela ondje gdje postoji pouzdan katastar materijala — ugrađena je u dvorazinsku shemu iz pogl. 5.2.3.

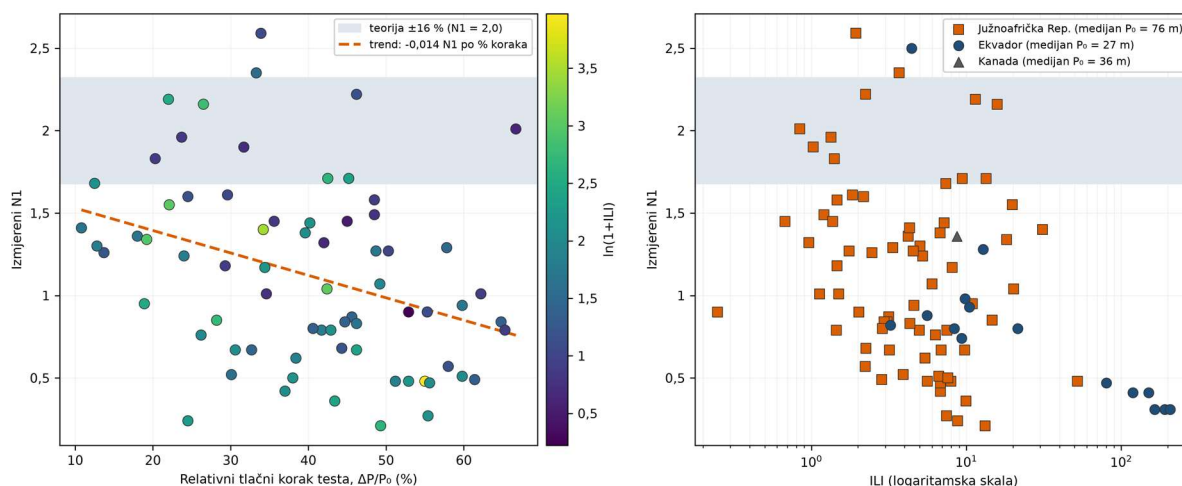
Iz analize pojasa proizlazi i praktično pravilo trostruke provjere za operatera koji raspolaže pouzdanim katastrom materijala. Za netestiranu zonu eksponent se može procijeniti izravno iz teorijske krivulje materijala, s očekivanom pogreškom od $\pm 0,13$ do $\pm 0,17$ prema zadržanom uzorku — uz ogradu da ta pogreška vrijedi za zone čija mjerenja prolaze kontrolu kvalitete, dakle za uredne zone blizu svoje materijalne gornje granice. Statistički model iz eksplorativne faze — model triju teorijski utemeljenih značajki s pogreškom oko $\pm 0,34$ — služi kao neovisna unakrsna provjera iz posve drugog izvora informacije. Krivulja čita katastar, model čita izmjereno stanje gubitaka. Slaganje dviju procjena povišuje pouzdanje u obje; a njihovo neslaganje najkorisniji je mogući ishod, jer upravo ono identificira zone u koje treba usmjeriti ograničeni proračun terenskih testova — zone u kojima se materijalni potencijal i stvarno stanje gubitaka razilaze, bilo zbog nepronađenih puknuća, bilo zbog pogrešnog katastra, bilo zbog stvarno atipičnog ponašanja. Terenski test time prestaje biti rutinski trošak raspoređen nasumično i postaje ciljani instrument razrješavanja identificiranih proturječja — preraspodjela koja iz istog proračuna izvlači višestruko veću informacijsku vrijednost.

5.4.2. Dijagnoza zona sa 100 % plastičnih cijevi

Druga linija dokaza dizajnirana je kao prirodni eksperiment — iz baze je izdvojen 101 zapis iz 92 mjerne zone sa 100 % plastičnih cijevi. U takvu podskupu materijal je konstantan, te sve što raspršuje izmjereni eksponent mora biti nešto drugo — čime se učinci uvjeta opažanja odvajaju od učinka materijala koji je u punoj bazi s njima isprepleten. Raspršenje je izrazito — naspram teorijske vrijednosti 2,0 za potpuno plastičnu mrežu, samo 9 zapisa pada unutar ± 16 % od nje; 33 zapisa leže u rasponu dominacije puknuća, ispod 0,8; 32 u miješanom rasponu 0,8 do 1,4; a ostatak je raspršen iznad, uključujući nevjerodostojne vrijednosti do 8,11. Sama ta raspodjela već isključuje jedno moguće objašnjenje. Kad bi materijal jednoznačno određivao eksponent, zone identičnog materijalnog sastava grupirale bi se oko jedne vrijednosti — umjesto toga, potpuno plastične zone pokrivaju cijeli FAVAD raspon i šire, ponašajući se u jednim slučajevima kao krute mreže s puknućima, a u drugima kao teorijske plastične mreže, ovisno o čimbenicima koji s materijalom nisu povezani. Struktura tog raspršenja, raščlanjena po dubini tlačnog koraka, ILI-ju, tlaku i državi, prikazana je na slici 5.4.

Sama raščlamba raspodjele već je nalaz. Da je odstupanje od teorije slučajni šum, zapisi bi bili raspršeni simetrično oko teorijske vrijednosti; umjesto toga, raspodjela je sustavno pomaknuta prema dolje, s većinom mase u rasponu dominacije puknuća i u miješanom rasponu — dakle prema ponašanju koje teorija predviđa za mreže drugačijeg sastava. Takav pomak ne može objasniti mjerni šum, koji nema preferirani smjer; može ga objasniti samo neki čimbenik koji

eksponent stvarno potiskuje ili ga čini prividno nižim. Dijagnostička strategija stoga je bila regresijsku analizu zamijeniti kontroliranim usporedbama unutar homogenih podskupova. Budući da je materijal u cijelom podskupu konstantan, a unutar južnoafričkog dijela konstantna i država — s njezinim mjernim konvencijama i praksom — svaka preostala varijabilnost mora dolaziti od mjerljivih razlika u stanju zone ili protokolu testa, koje se mogu ispitati jedna po jedna.



Slika 5.4. Dijagnoza zona sa 100 % plastičnih cijevi (dubina koraka, ILI, države)

Dijagnoza identificira tri konkretna čimbenika koji objašnjavaju manjak prema teoriji, dok država podrijetla djeluje tek kao njihova zbirna zamjenska varijabla.

Prvi i dominantni čimbenik jest omjer puknuća i pozadinskih gubitaka, aproksimiran ILI-jem. Unutar vjerodostojnih plastičnih zapisa eksponent korelira s ILI-jem uz Spearmanov $\rho = -0,39$ — najjače od svih ispitanih varijabli — a obrazac preživljava i unutar jedne države, čime je isključena mogućnost da ga stvara međudržavna razlika mjerne prakse. Južnoafričke plastične zone u najboljem ILI kvartilu ($ILI < 2,1$) imaju medijan eksponenta 1,45, naspram 0,79 do 1,00 za kvartile s većim gubicima. Mehanizam je onaj isti koji je analiza pojasa učinila vidljivim. Stijenka od polietilena visoke gustoće ne jamči ništa o putovima kojima gubici stvarno teku — u zoni velikih gubitaka volumen prolazi kroz nekoliko velikih puknuća te kroz fittinge, ogrlice i opremu kućnih priključaka koji se ponašaju kao otvori nepromjenjive površine, zbog čega eksponent zone kolabira prema 0,5 bez obzira na materijal. Ekvadorske plastične zone, s medijanom ILI-ja 13 i gubicima vode oko 80 % ulaznog volumena, upravo zato teorijski pojas ne dosežu nikada — nijedna od petnaest.

Drugi je čimbenik razina radnog tlaka, kvantitativno suglasan s FAVAD teorijom. Otvori istjecanja promjenjive površine trebaju tlak da se rašire. U terminologiji broja curenja iz pogl.

2.2.1, omjer promjenjivog i nepromjenjivog protoka raste s tlakom, stoga isti fizički kvar pokazuje niži prividni eksponent pri nižem tlaku. Brojke se poklapaju. Naime, kvar koji bi pri južnoafričkom medijanu tlaka od 76 m pokazivao eksponent približno 1,2 do 1,4 pokazao bi pri ekvadorskom medijanu od 27 m otprilike 0,25 manje — približno upravo onoliki jaz koliki je između plastičnih zona dviju država stvarno opažen. Posljedica je strukturna. Plastične mreže niskog tlaka nisu u stanju demonstrirati svoj teorijski eksponent u testu, ne zato što bi teorija bila pogrešna, nego zato što pri niskom tlaku promjenjiva komponenta površine ostaje neaktivirana — nalaz koji opravdava upozorenje pri tlaku ispod 30 m u dvorazinskoj shemi (pogl. 5.2.3).

Treći je čimbenik dubina tlačnog koraka testa — jedini statistički značajan razlučitelj unutar južnoafričke plastike, gdje su materijal i država konstantni. Usporedbom zona blizu teorije sa zonama niskog eksponenta unutar tog podskupa, svaka imovinska i gubitna varijabla pokazuje se beznačajnom — ali relativna dubina koraka razdvaja ih uz Spearmanovu korelaciju ranga $\rho = -0,375$ ($p = 0,035$). Zone blizu teorije testirane su medijanom relativnog koraka od 29 %, zone niskog eksponenta medijanom od 46 %. Čista dvočlana FAVAD ovisnost o rasponu tlaka objašnjava samo mali dio te razlike — približno 0,03 jedinice eksponenta između koraka od 29 % i 46 % — zbog čega veći ostatak upućuje na nelinearno zatvaranje kvarova pri dubokim sniženjima tlaka, to jest pukotine u viskoelastičnom polietilenu zatvaraju se i ostaju zatvorene, otvori istjecanja ponovno naliježu na posteljicu, a moguć je i sustavni pomak procjene legitimne noćne potrošnje pri jako sniženim tlakovima. Kakva god bila točna mješavina tih mehanizama, praktična je posljedica ista i čini jezgru protokolarnog doprinosa u pogl. 5.4.3. Vrlo duboki koraci mjere sustavno niži eksponent od onoga koji zona pokazuje blizu radnog tlaka — a upravo je potonji mjerodavan za realnu odluku o upravljanju tlakom.

Tri čimbenika nisu ravnopravna ni po snazi ni po naravi, i ta hijerarhija ima praktične posljedice. Omjer puknuća i pozadinskih gubitaka najsnažniji je i ujedno upravljiv na razini gospodarenja mrežom. Aktivnim traženjem i sanacijom puknuća zona se pomiče prema svojoj gornjoj granici — ali sporo i skupo. Razina tlaka strukturno je svojstvo zone, promjenjivo tek u granicama koje dopuštaju standardi opskrbe; njezin učinak nije mjerna pogreška nego stvarno ponašanje — zona niskog tlaka doista ima niži efektivni eksponent pri svojem radnom stanju — stoga ga ne treba „ispravljati” nego ispravno interpretirati, što dvorazinska shema čini upozorenjem umjesto korekcijom. Dubina koraka, naprotiv, isključivo je svojstvo protokola: jedini od triju čimbenika koji se može promijeniti odlukom voditelja kampanje, bez ijedne intervencije u mreži — i upravo zato je njegova identifikacija najvrjednija praktična posljedica

dijagnoze, formalizirana u pogl. 5.4.3. Statistička evidencija trećeg čimbenika počiva na jednoj signifikantnoj vezi umjerene snage ($p = 0,035$; $\rho = -0,375$) i sama za sebe ne bi bila čvrsta osnova; njezinu težinu čini konvergencija s neovisnim linijama dokaza — mehanicističkim objašnjenjem viskoelastičnog zatvaranja, kvantitativnim neslaganjem s čistom dvočlanom FAVAD ovisnošću i time što kombinirani kriterij s ograničenjem koraka teoriju reproducira, a bez njega ne — te je zaključak izveden iz suglasja, a ne iz jednoga p-iznosa, dosljedno načelu triangulacije koje se provlači kroz cijelo istraživanje.

Da tri čimbenika doista objašnjavaju pojavu, pokazuje kombinirani kriterij koji teorijske vrijednosti dosljedno reproducira. Južnoafričke plastične zone s $ILI < 2,5$ i relativnim korakom manjim od 35 % imaju medijan eksponenta 1,61, s dvije trećine zapisa iznad 1,4 — dok zone s $ILI \geq 2,5$ i dubokim koracima imaju medijan 0,79, s tek desetinom iznad 1,4. FAVAD teorija materijala, dakle, nije opovrgnuta, nego opisuje komponentu pozadinskih gubitaka dobro održavanih zona, testiranih pri dostatnom tlaku i umjerenim koracima — uvjete pod kojima se, čim su ispunjeni, teorijske vrijednosti uredno pojavljuju.

Iz dijagnoze slijedi i preciznije razumijevanje uloge države podrijetla, koje zaokružuje nalaz iz pogl. 4.2.3 da je država „prvi obrazac u prurušenom obliku”. Ekvadorske plastične zone kombiniraju visok omjer puknuća (medijan ILI-ja 13) s niskim tlakom (medijan 27 m) — dva od tri potiskujuća čimbenika — stoga njihov izostanak iz teorijskog pojasa nije ni mjerna pogreška ni nacionalna posebnost, nego fizikalno očekivan ishod. Južnoafričke plastične zone rade pri visokom tlaku (medijan 76 m), koji bi teorijskom eksponentu pogodio, ali su često testirane vrlo dubokim koracima — trećim čimbenikom — zbog čega se u njihovu podskupu nalaze i zapisi blizu teorije i zapisi daleko ispod nje, razdvojeni upravo protokolom testa. Država je, dakle, zbirna zamjenska varijabla konkretne kombinacije ILI-ja, tlaka i prakse testiranja — i čim se ta tri čimbenika izmjere izravno, državna oznaka ne dodaje ništa: isti zaključak do kojega je, neovisnim putem, došao klusterski eksperiment u pogl. 5.3. Za operatera dijagnoza ima i konstruktivno čitanje. Teorijski eksponent plastične mreže nije nedostižan ideal nego stanje koje se postiže — pronalaskom i sanacijom velikih puknuća (snižavanjem ILI-ja), primjerenim radnim tlakom i protokolarno ispravnim testiranjem — te razlika između izmjerenog eksponenta zone i gornje granice njezina materijala u načelu mjeri koliko je zona udaljena od stanja u kojem bi upravljanje tlakom davalo pune teorijske uštede.

Dijagnoza usput odgovara i na pitanje zašto konačni model ne sadrži varijablu države, iako se države u validaciji tako izrazito razlikuju. Sva tri identificirana čimbenika mjerljive su hidrauličke i protokolarne veličine, stoga državna oznaka, jednom kad su one poznate, ne nosi

dodatnu informaciju — što je analiza značajki i utvrdila (pogl. 5.4). Indikatori države nisu ušli među nositelje informacije ni u jednoj metodi selekcije. Model s državnom varijablom bio bi ne samo nepotreban nego i štetan za prenosivost jer bi naučio korekcije vezane uz imena kampanja umjesto uz veličine koje četvrta zemlja, izvan baze, uopće može dostaviti. Umjesto toga, državne razlike ulaze u analizu kroz svoje mjerljive uzroke — kroz ulaz modela (intenzitet gubitaka), kroz težine treniranja (kvaliteta protokola) i kroz granice domene (pokrivenost režima, pogl. 5.3) — a to je i razlog zašto se rezultati mogu smisleno primijeniti izvan triju zemalja podrijetla podataka.

Time je razriješen i koeficijent materijala pogrešnog predznaka koji je pratio svaku verziju modela (pogl. 5.1). U ovoj su bazi plastične zone sustavno promatrane u uvjetima koji eksponent potiskuju — ekvadorske su obilježene visokom učestalošću puknuća i niskim tlakom, južnoafričke često testirane vrlo dubokim koracima. Regresija stoga vidi obrazac „više plastike, niži eksponent" i kodira uvjete opažanja, a ne fiziku materijala — tipičan primjer isprepletenosti (konfundiranja) koji nikakva količina podataka istog sastava ne bi razriješila, nego samo kontrolirana dijagnoza koja čimbenike razdvaja. Ispravna uloga materijala u modelu stoga nije aditivni član nego uvjetna gornja granica. Materijal postavlja granicu koju zona može doseći (granična krivulja materijala iz pogl. 5.4.1), dok omjer puknuća i pozadinskih gubitaka, razina tlaka i protokol testa određuju koliko izmjerena vrijednost pada ispod nje. Za pouzdanu formalizaciju te interakcije — primjerice interakcijskim modelima $\text{gornja granica} \times \text{intenzitet gubitaka}$ — trebalo bi upravo ono što ovoj bazi nedostaje: zone miješanih materijala s niskim ILI-jem, dostatnim tlakom i protokolarno ispravnim testovima; ta je potreba uvrštena među smjernice budućih istraživanja (pogl. 7.2).

5.4.3. Protokol koraka tlaka 15–35 %

Treći rezultat istraživanja nije model nego protokol: preporučeni pojas relativnoga tlačnog koraka od 15 do 35 % za pouzdano i nepristrano terensko određivanje eksponenta N1. Doprinos je samostalan u punom smislu — vrijedi za svakog operatera koji provodi testove tlačnih koraka, neovisno o tome hoće li ikada primijeniti prediktivni model iz pogl. 5.2 — i nije proizvod samog modela, nego metodološkog aparata kontrole kvalitete i dijagnostike. Donju granicu pojasa iznjedrio je probir pravila kvalitete (pogl. 4.2.3), gornju kontrolirana dijagnoza plastičnih zona (pogl. 5.4.2). Utoliko je pojas primjer obrasca najavljenog u pogl. 4.1 — aparat discipliniranog postupanja s podacima proizvodi spoznaje koje nadžive konkretan model.

Donja granica pojasa proizlazi iz strukture šuma procjene eksponenta iz dvaju stanja tlaka. Izračun eksponenta dijeli promjenu protoka gubitaka s promjenom tlaka, zbog čega s malim nazivnikom u $\log(P_1/P_0)$ svaka pogreška u procjeni gubitaka — neizvjesnost legitimne noćne potrošnje, rezolucija mjera — biva snažno amplificirana. Tako je 29 zapisa isključenih filtrom vjerodostojnosti koncentrirano upravo u testovima s razlikama tlaka od svega 4 do 7 m (pogl. 4.2.2), a stopa nevjerodostojnih rezultata monotono pada s intenzitetom signala (pogl. 4.2.3). Relativni korak od najmanje 15 % osigurava da promjena tlaka nadmaši fiksne neizvjesnosti testa u zonama koje uopće zadovoljavaju kriterij signala. Pritom analiza filtera u tablici 4.3 pokazuje da dubina koraka nije primarna os pouzdanosti — filter utemeljen samo na koraku (isključivanje zapisa s korakom manjim od 15 %) sam po sebi ne poboljšava model — nego sekundarni čimbenik koji djeluje zajedno sa signalom gubitaka. Preduvjet pouzdanog testa najprije je dostatan signal ($L_0 \geq 2$ l/s i $LD \geq 0,02$), a tek potom ispravna dubina koraka. Zoni koja kriterij signala ne zadovoljava test se uopće ne preporučuje jer bi mjerio šum, a procjena iz granične krivulje materijala (pogl. 5.2.3) pouzdanija je od takvog mjerenja.

Gornja granica pojasa novost je ovog istraživanja i proizlazi iz nalaza koji donjoj granici nije simetričan — dok preplitki koraci mjere šumovito, preduboki koraci mjere sustavno pogrešno. Dokazni je lanac iznesen u pogl. 5.4.2. Unutar južnoafričkih plastičnih zona — s konstantnim materijalom i državom — relativna dubina koraka jedini je statistički značajan razlučitelj zona blizu teorije od zona niskog eksponenta ($p = 0,035$; $\rho = -0,375$), s medijanom koraka od 29 % za prve i 46 % za druge, a čista dvočlana FAVAD ovisnost objašnjava tek približno 0,03 jedinice te razlike. Ostatak upućuje na nelinearno zatvaranje kvarova pri dubokim sniženjima tlaka i moguću sustavnu pristranost procjene noćne potrošnje pri jako sniženim tlakovima. Posljedica za praksu je izravna. Test s vrlo dubokim korakom vraća eksponent sustavno niži od onoga koji zona pokazuje u blizini radnog tlaka — a za investicijsku odluku mjerodavan je upravo potonji, jer se stvarna redukcija tlaka provodi umjerenim koracima od postojećega radnog stanja. Duboki korak, intuitivno privlačan kao „jači signal“, zapravo mijenja mjereni objekt.

Pojas je namjerno definiran u relativnim, a ne apsolutnim jedinicama, jer se ista apsolutna redukcija tlaka hidraulički bitno razlikuje ovisno o polazištu. Korak od 10 m u zoni s radnim tlakom od 70 m relativno je sniženje od 14 % — na granici pouzdane mjerljivosti — dok je u zoni s tlakom od 25 m sniženje od 40 %, već duboko u području sustavne pristranosti. Relativna formulacija čini pravilo prenosivim preko cijelog raspona radnih tlakova u bazi, od približno 10 do 123 m. Koliko daleko stvarna praksa zna otići od preporučenog pojasa, pokazuje sama

baza. Relativni koraci u jednom testu dosežu 83 % (pogl. 4.2.2) — dubina pri kojoj zona radi na petini polaznog tlaka, mnogi otvori istjecanja fizički su zatvoreni, a procjena legitimne noćne potrošnje odnosi se na režim potrošnje koji s polaznim stanjem više nema veze. Upravo takvi zapisi, ograničeni u treningu na težinu 0,30, ilustriraju zašto shema ponderiranja i protokolarni pojas čine cjelinu — pojas propisuje kako testove provoditi ubuduće, a težine kako postupati s naslijeđem testova provedenih drugačije. Praksa vrlo dubokih koraka pritom nije anegdotalna. Dokumentirana je kao sustavno obilježje južnoafričkog podskupa (pogl. 4.2.1), stoga dio šumovitosti i niskih izmjerenih eksponenata toga podskupa nije svojstvo tamošnjih mreža nego tamošnjega protokola testiranja — razlika s izravnim posljedicama za svaku sekundarnu upotrebu takvih podataka, uključujući objavljene zbirke terenskih vrijednosti eksponenta na kojima se temelje literaturne preporuke (pogl. 3.1).

Analitička podloga za razdvajanje tih učinaka zaslužuje posebnu napomenu, jer objašnjava zašto ovakav nalaz nije mogao proizaći iz tipičnih objavljenih studija. Većina zona u bazi nosi jedan zbirni zapis cijelog testa, ali jedanaest zona nosi pojedinačne zapise uzastopnih koraka (pogl. 4.2.1) — a unutar iste zone materijal, mreža i stanje sustava konstantni su, zbog čega razlike izmjerenog eksponenta među koracima izoliraju učinak samog protokola. Upravo ta struktura podataka, u kombinaciji s veličinom baze koja dopušta usporedbe unutar homogenih podskupova, omogućila je da se učinak dubine koraka statistički razdvoji od učinaka zone — što pojedinačne kampanje s desetak zona i jednim zapisom po zoni strukturno ne mogu. Pregledana literatura nestabilnost procjena iz dvaju stanja tlaka, osjetljivost na pogrešku noćne potrošnje i varijabilnost eksponenta među koracima dokumentira kvalitativno (Marzola i sur., 2021; Schwaller i van Zyl, 2015; Jenks i sur., 2023; pogl. 3.1), a preporuke o dubini koraka svode se na donju stranu problema — dovoljno dubok korak za mjerljiv odziv; kvantificirana gornja granica, izvedena iz sustavne pristranosti a ne iz šuma, u pregledanoj literaturi nije dokumentirana. Protokolarni pojas 15–35 % stoga zaokružuje kriterij kvalitete terenskog određivanja eksponenta s obje strane — ispod pojasa mjerenjem dominira šum, iznad pojasa sustavna pristranost prema dolje.

U istraživanju je pojas operacionaliziran na tri mjesta. Prvo, u shemi ponderiranja pouzdanosti (pogl. 4.3.5). Faktor kvalitete koraka doseže vrhunac u pojasu 15–35 % i opada za dublje korake, pri čemu su najdublji koraci ograničeni na težinu 0,30 — stoga 95 zapisa s dubokim koracima informira prilagodbu smanjenom snagom umjesto da vuče koeficijente prema dolje. Drugo, u modelu treniranom na strogo filtriranom podskupu (pogl. 4.3.5), gdje trening ograničen na zapise s dostatnim signalom i korakom u pojasu ostavlja samo 23 zapisa, ali na

malom nepristranom mjerilu nadmašuje ponderiranje (MAE 0,272 naspram 0,296) — snažna indikacija da će model treniran isključivo na protokolarno ispravnim mjerenjima, kad ih se nakupi dovoljno, biti sljedeća generacija analitičkog određivanja eksponenta (pogl. 7.2). Treće, u primjenskim alatima (pogl. 6.3). Savjetnik za planiranje testa vraća za zadani izvedivi korak jednu od tri presude — pouzdan i nepristran (signal dostatan, korak u pojasu), signal dostatan ali korak predubok (smanjiti), ili slab signal (test bi mjerio šum; koristiti predviđanje) — čime protokolarni nalaz postaje operativna uputa u trenutku planiranja terena, a ne naknadna dijagnoza.

U cjelini, protokolarni doprinos ovog istraživanja terenskoj praksi može se sažeti u slijed od četiri provjere koje prethode svakom testu tlačnih koraka. Prvo, provjera signala: zona mora iskazivati noćne gubitke od najmanje 2 l/s i gustoću gubitaka od najmanje 0,02 — u protivnome test ne treba provoditi, jer bi mjerio šum, a procjena eksponenta preuzima se iz dvorazinske sheme (pogl. 5.2.3). Drugo, provjera izvedivosti koraka: redukcijski ventil mora moći ostvariti relativni korak od najmanje 15 % od radnog tlaka, uz poštovanje minimalnih tlakova opskrbe. Treće, ograničenje dubine: korak ne smije bitno premašiti 35 % — dublje snižavanje ne donosi „jači signal” nego sustavno prenizak rezultat. Četvrto, dokumentiranje uvjeta: uz izmjereni eksponent bilježe se signal gubitaka, relativna dubina koraka i procjena legitimne noćne potrošnje, jer bez njih budući korisnik zapisa ne može ocijeniti njegovu pouzdanost — upravo je nedostatak takvih metapodataka u objavljenim studijama otežao sekundarnu upotrebu literaturnih vrijednosti (pogl. 3.1). Nijedna od četiriju provjera ne zahtijeva opremu povrh one koju test ionako koristi; njihova je cijena organizacijska, a dobitak — mjerenje koje je istodobno pouzdano, nepristrano i upotrebljivo za buduću akumulaciju — nerazmjernoj cijeni.

Doseg pojasa na kraju treba omeđiti jednako transparentno kao i doseg modela. Donja granica počiva na univerzalnoj mehanici omjera signala i šuma i vrijedi za svaku mrežu neovisno o materijalu. Gornja je granica, međutim, statistički identificirana unutar plastičnih mreža, a njezin vodeći mehanizam — viskoelastično zatvaranje kvarova — svojstven je pojedinom materijalu. Za pretežno krute mreže ne postoji u ovoj bazi izravan dokaz jednake pristranosti dubokih koraka, zbog čega ondje preporuka gornje granice ima status konzervativne mjere opreza, a ne dokazanog pravila. Ta se razlika u dokaznoj podlozi ne umanjuje nego bilježi. Protokolarni pojas primjenjuje se općenito — jer trošak poštovanja gornje granice praktički ne postoji, a rizik njezina kršenja u fleksibilnim i miješanim mrežama jest dokazan — ali će tek

buduća mjerenja iz krutih mreža s koracima različitih dubina pokazati treba li i ondje gornju granicu shvaćati kao nužnost ili samo kao dobru praksu.

Konačno, pojas ima i ulogu u budućem prikupljanju podataka, formaliziranu protokolom kontinuirane rekalkibracije (pogl. 6.3). Razdoblje puštanja svakoga novougrađenog redukcijskog ventila u pogon predstavlja terenski test tlačnih koraka bez dodatnog troška, a ostvareni eksponent pridružuje se trening skupu samo ako zadovoljava kriterij kvalitete — dostatan signal i relativni korak u pojasu 15–35 %. Time protokol ne standardizira samo pojedinačno mjerenje nego i akumulaciju buduće dokazne građe — svaki novi zapis koji uđe u bazu bit će po konstrukciji pouzdan i nepristran, što je uvjet da sljedeća generacija modela nadmaši sadašnju umjesto da naslijedi šum i pristranosti postojećih terenskih praksi. Formalna provjera hipoteza naspram svih iznesenih rezultata, njihova usporedba s dosadašnjim istraživanjima te razrada praktične primjene i ograničenja predmet su pogl. 6.

6. Rasprava

6.1. Provjera hipoteza

Tri hipoteze istraživanja, iznesene u pogl. 1.3 i prihvaćene odobrenim prijedlogom teme, postavljene su tako da obuhvaćaju tri logički povezana, ali sadržajno različita pitanja: pitanje ulaznoga prostora (koje veličine nose informaciju o eksponentu i koliko ih je nužno), pitanje dostižne točnosti (može li analitička procjena zamijeniti ili racionalizirati terensko mjerenje) i pitanje metodološke izvedivosti (mogu li se takvi modeli uopće izgraditi postupcima strojnog učenja na raspoloživoj terenskoj građi). Njihova se provjera stoga provodi zasebno, kako je najavljeno u pogl. 1.4.2 — za svaku se hipotezu navodi dokazna građa dokumentirana u 4. i 5. poglavlju, kvantitativni pokazatelji na kojima provjera počiva te ocjena stupnja potvrde, uključujući granice unutar kojih potvrda vrijedi. Zajednička empirijska osnova svih triju provjera jest međunarodna baza od 217 zapisa terenskih testova tlačnih koraka u 172 mjerne zone (pogl. 4.2), a zajednički metodološki okvir vrednovanja unakrsna validacija grupirana po mjernim zonama (pogl. 4.3.1), pod kojom svaka iskazana mjera odražava generalizaciju na zone koje model tijekom učenja nije vidio.

Prije pojedinačnih provjera valja izrijekom navesti i što bi se smatralo opovrgavanjem, jer provjera hipoteza bez unaprijed zamislivoga negativnog ishoda nije provjera nego formalnost. Prva bi hipoteza bila opovrgnuta da nijedna kombinacija raspoloživih parametara pod grupiranom validacijom ne nadmašuje naivne referentne modele — upravo se to, uostalom, i dogodilo za podskup parametara imovinskog registra bez informacije o gubicima, što pokazuje da korišteni okvir negativne ishode registrira, a ne prikriva (pogl. 4.3.3, pogl. 5.1). Druga bi hipoteza bila opovrgnuta da postignuta pogreška ne dopušta razlikovanje odlučivačkih režima ponašanja zone ili da je usporediva s pogreškom trivijalnih pravila; treća da postupci strojnog učenja na raspoloživoj građi ne daju model koji je istodobno validiran, interpretabilan i primjenjiv izvan podataka na kojima je razvijen. Nijedan od tih ishoda nije nastupio, ali upravo njihova artikulacija daje potvrdama koje slijede dokaznu težinu.

Hipoteza 1 (H1): *Moguće je definirati i optimizirati parametre vodoopskrbne mreže potrebne za analitičko definiranje N1 eksponenta.*

Hipoteza je potvrđena. Dokazna građa dolazi iz triju međusobno neovisnih linija analize, dokumentiranih u pogl. 5.4 uz metodološku podlogu u pogl. 4.3.4. Prvo, triangulirana analiza važnosti parametara — filtarskim postupkom (Spearmanova korelacija ranga), ugrađenim

(putanje Lasso koeficijenata) i omotačkim (postupno uključivanje značajki pod grupiranom unakrsnom validacijom), dopunjenima permutacijskom važnošću izvan preklopa — jednoznačno je identificirala pokazatelje intenziteta gubitaka kao dominantne nositelje informacije o eksponentu, u skladu s FAVAD mehanizmom po kojem je zonski eksponent smjesa istjecanja kroz otvore nepromjenjive i promjenjive površine (pogl. 2.2.2). Visok intenzitet gubitaka označava dominaciju puknuća nepromjenjive površine i eksponent koji klizi prema 0,5, dok uredna zona zadržava pretežno pozadinsko istjecanje promjenjive površine i eksponent u blizini 1,4 do 1,5. Drugo, formalna optimizacija broja parametara — kvantifikacija marginalnog doprinosa svakog kandidata točnosti predviđanja pod grupiranom validacijom, uz pravilo jedne standardne pogreške — reducirala je ulazni prostor s trinaest kandidatskih parametara najprije na dva, a u konačnici na jednu izvedenu značajku — specifičnu gustoću stvarnih gubitaka normaliziranu tlakom LD, koja objedinjuje tri izvorna podatka: noćni protok stvarnih gubitaka L_0 , duljinu glavnih cjevovoda L_m i prosječni zonski tlak P_0 — bez statistički značajnoga gubitka točnosti u odnosu na višeparametarske alternative (pogl. 5.1, tablica 5.1). Treće, za parametre koji u konačni model nisu ušli utvrđeno je i zašto nisu. Početni tlak ne djeluje kao samostalna značajka nego kroz normalizaciju gubitaka po jedinici tlaka, a cijevni materijal — teorijski glavni pokretač eksponenta — djeluje kao uvjetna gornja granica koju zona može dosegnuti, ne kao aditivan član (pogl. 5.4.1), čime je razriješeno prividno proturječje između zanemarivoga i pogrešno predznačenog koeficijenta materijala u svim verzijama modela i FAVAD teorije.

Za ocjenu stupnja potvrde bitno je da je optimizacija dala i dva negativna rezultata znanstvene vrijednosti, jer oni definiraju granice onoga što je optimizacijom utvrđeno. Statički podaci imovinskog registra — duljine, gustoće priključaka, materijalni sastav — bez ikakve informacije o gubicima ne nadmašuju naivne referentne modele, iz čega slijedi da je mjerenje protoka na ulazu u zonu s analizom minimalnoga noćnog protoka minimalni podatkovni zahtjev analitičkog određivanja eksponenta. Skup potrebnih parametara nije samo utvrđen i minimiziran nego i hijerarhijski strukturiran prema informacijskom doprinosu, s jasno označenom donjom granicom ispod koje analitička procjena više nije moguća. Nadalje, nelinearni ansamblji sa svim raspoloživim parametrima nisu nadmašili dvoulazni, a potom ni jednoulazni linearni oblik (pogl. 5.1), što pokazuje da pri raspoloživoj veličini uzorka dodatni parametri ne nose iskoristivu informaciju — parsimonija konačnog modela statistička je nužnost, a ne estetska preferencija. Time je sadržaj hipoteze ispunjen u oba svoja dijela — parametri potrebni za analitičko određivanje eksponenta definirani su (identificirani i fizikalno

protumačeni), a njihov je broj optimiziran (sveden na minimum uz očuvanje točnosti, s dokumentiranim razlozima isključenja svakoga kandidata).

Hipoteza 2 (H2): *Moguće je analitički definirati N1 eksponent s visokom razinom preciznosti u svrhu smanjenja ili potpunog uklanjanja potrebe za terenskim ispitivanjem.*

Hipoteza je potvrđena uz kvantificirane granice — i upravo kvantificiranost tih granica, a ne bezuvjetnost tvrdnje, čini potvrdu znanstveno upotrebljivom. Postignuta točnost analitičkog određivanja, iskazana za konačni model v4.0 pod grupiranom validacijom izvan preklopa, iznosi $MAE = 0,230$ na kvalitetno filtriranim podacima, uz 64 % predikcija unutar $\pm 0,25$, 90 % unutar $\pm 0,50$ i sustavnu pristranost od $-0,035$, praktički nulu (pogl. 5.2.2). Na ekvadorskom podskupu — najčišćem dostupnom mjerilu, s kampanjama snažnog signala i protokolarno umjerenim koracima — model se validira s $MAE 0,198$ uz 92 % predikcija unutar $\pm 0,50$. Pod identičnim protokolom najbolja naivna referenca postiže $MAE 0,298$, a industrijsko pravilo $N1 = 1,0$ $MAE 0,311$ — model tipičnu pogrešku smanjuje za približno 23 % naspram najbolje reference, uz bitno povoljniju strukturu pogreške, jer gotovo nulta pristranost jamči da se procjene ušteda preko portfelja zona neće sustavno napuhavati ni potiskivati (pogl. 5.2.2). Svaka procjena k tome nosi 80-postotni interval predviđanja $[N1 - 0,32, N1 + 0,39]$, izveden iz empirijskih kvantila reziduala izvan preklopa, stoga nesigurnost ulazi u investicijsku odluku eksplicitno, a ne prešutno.

Sintagmu „visoka razina preciznosti” iz hipoteze pritom valja vrednovati naspram jedinoga smislenog mjerila — pouzdanosti samoga terenskog ispitivanja koje analitička procjena nastoji zamijeniti. U prikupljenoj bazi 13 % terenskih testova daje fizikalno nemoguće vrijednosti eksponenta, a samo je 11 % rezultata suglasno s teorijom materijala unutar pojasa od ± 16 % (pogl. 4.2.3); terenski test proveden izvan optimalnog protokola, s premalim tlačnim korakom ili slabim signalom gubitaka, daje rezultat čija pogreška nije ni poznata ni ograničena. Tipična pogreška analitičke procjene od $\pm 0,23$ na pouzdanim ciljevima time dostiže red veličine pouzdanosti terenskog mjerenja provedenog izvan optimalnog protokola — a za odluku koju procjena posluhuje ta je razina dostatna jer su režimi dominacije puknuća (eksponent približno 0,5 do 0,7) i dominacije pozadinskih gubitaka (približno 1,2 do 1,5) razdvojeni za približno 0,6 jedinica, zbog čega udjeli predikcija unutar tolerancija pokazuju da model režim zone ispravno smješta u velikoj većini slučajeva (pogl. 5.2.2). Drugim riječima, preciznost je „visoka” u odnosu na potrebe odluke i u odnosu na gornju granicu mjernog šuma — dva mjerila koja hipoteza implicira — a ne u apsolutnom smislu koji bi ignorirao prirodu mjerene veličine.

Preciznost naposljetku valja prevesti i u jedinice u kojima se odluka stvarno donosi — u relativne uštede od redukcije tlaka. Budući da je FAVAD relacija uštede, jedn. (5.2), za referentno smanjenje tlaka od 10 % monotona i glatka, pogreška eksponenta od $\pm 0,23$ pomiče procjenu relativne uštede za svega nekoliko postotnih bodova, a poredak zona po očekivanim uštedama — veličina koja upravlja redoslijedom ulaganja — mijenja se tek kada se procjene dviju zona približe unutar pogreške, što je upravo slučaj koji interval predviđanja čini vidljivim i upućuje na terensku provjeru (pogl. 5.2.2). Preciznost dostatna za odluku, dakle, nije retorička ocjena nego posljedica strukture problema. Raspon izlaza modela od 0,5 do 1,5 pokriva približno trostruki raspon očekivanih relativnih ušteda — od približno 5 % pri eksponentu 0,5 do približno 15 % pri eksponentu 1,5 za smanjenje tlaka od 10 % — čak i procjena s pogreškom od četvrtine jedinice eksponenta razdvaja isplative kandidate od neisplativih daleko pouzdanije nego paušalna vrijednost koja cijeli portfelj tretira jednako.

Drugi dio hipoteze — smanjenje ili potpuno uklanjanje potrebe za terenskim ispitivanjem — potvrđen je s razlučivanjem po vrsti primjene. U planerskoj primjeni potreba za terenskim ispitivanjem uklanja se u cijelosti. Rangiranje kandidatskih zona za upravljanje tlakom, procjena potencijala ušteda preko portfelja i trijaža prioriteta provode se iz podataka koje operater već posjeduje nakon rutinske mjerne kampanje, bez ugradnje ijednog redukcijskog ventila (pogl. 5.2.1, pogl. 6.3). U investicijski osjetljivim slučajevima — kada je odluka o ulaganju izrazito osjetljiva na eksponent ili kada procjena padne blizu granice režima — potreba za terenskim ispitivanjem se ne uklanja nego racionalizira, i to dvama samostalnim doprinosima istraživanja: predkvalifikacijskim pragom, koji unaprijed isključuje zone u kojima ni terenski test ne bi dao pouzdan rezultat (pogl. 5.2.3), i protokolarnim pojasom relativnoga tlačnog koraka od 15 do 35 %, koji jamči da će provedeni test biti i pouzdan i nepristran (pogl. 5.4.3). Granice potvrde jednako su kvantificirane. Postignuta preciznost iskazana je za validiranu domenu — režime gubitaka pokrivene bazom — dok izvan nje model degradira na dokumentiran način (MAE 0,47 do 0,70 pri izostavljanju po jedne države, pogl. 5.3) i primjenjuje se tek uz lokalnu rekalkulaciju dvaju koeficijenata, za koju je pokazano da ju stabilizira već malen broj kvalitetno filtriranih lokalnih zapisa. Potvrda H2, dakle, ne glasi „model svugdje zamjenjuje mjerenje“, nego: unutar validirane domene model mjeri s pouzdanošću dostatnom za odluke i potrebu za terenskim testom uklanja u planerskoj, a racionalizira u investicijskoj primjeni; izvan domene primjenjuje se uz eksplicitno pravilo — rekalkulirati ili ne primjenjivati.

Hipoteza 3 (H3): *Moguće je izraditi nove matematičke modele definiranja eksponenta curenja N1 bazirane na strojnom učenju.*

Hipoteza je potvrđena. U istraživanju je razvijen i međusobno vrednovan niz modela šest obitelji algoritama strojnog učenja — OLS, Ridge, Lasso, slučajne šume, gradijentno pojačavanje i ponderirani najmanji kvadrati (pogl. 4.4, pogl. 5.1) — unutar cjelovitoga metodološkog okvira koji obuhvaća unakrsnu validaciju grupiranu po mjernim zonama, trianguliran odabir značajki, naivne referentne modele kao donji prag prihvatljivosti i ponderiranje treninga s ispravkom za poznatu pristranost mjernih podataka (pogl. 4.3). Novost modela pritom je dvostruka. U odnosu na literaturu, riječ je o prvom objavljenom postupku koji eksponent curenja N1 predviđa iz značajki vodoopskrbnog sustava. Pregled od 94 izvora u pogl. 3 utvrdio je da su dosadašnji dodiri strojnog učenja i FAVAD okvira jednosmjerni — hidraulički modeli s pretpostavljenim eksponentom služe kao generatori podataka za učenje detekcijskih modela, a optimizacijski algoritmi kalibriraju eksponent kao slobodni parametar pojedinačne mreže — dok model koji bi eksponent učinio predvidivom veličinom prije ovog istraživanja nije postojao (pogl. 3.4). U odnosu na praksu, konačni proizvod nije samo prilagođena jednadžba nego zaokružen postupak: interpretabilan i fizikalno konzistentan model s kvantificiranom nesigurnošću, opremljen predkvalifikacijskim pragom, dvorazinskom shemom procjene koja i zonama izvan domene statističkog modela daje jasno označen teorijski odgovor (pogl. 5.2.3) te protokolom kontinuirane rekalkibracije kojim svako puštanje redukcijaskog ventila u pogon proširuje empirijsku osnovu modela bez dodatnog troška (pogl. 6.3).

Formulacija hipoteze traži i jednu preciznost. Konačni model v4.0 jest ponderirana linearna regresija — matematički oblik star koliko i statistika — stoga bi se moglo prigovoriti da „bazirane na strojnom učenju" opisuje više razvojni put nego konačni objekt. Prigovor promašuje bit iz dvaju razloga. Prvo, strojno učenje nije definirano složenošću funkcijskog oblika nego postupkom. Konačni je oblik odabran natjecanjem šest obitelji algoritama pod strogom validacijom, njegovi ulazi trianguliranom selekcijom značajki, njegove težine empirijski otkrivenim pravilima kvalitete mjerenja, a njegova nesigurnost kvantilima reziduala izvan preklopa — svaka sastavnica konačnog modela proizvod je učenja iz podataka pod kontrolom generalizacije, što je definicijska jezgra područja (pogl. 2.4). Drugo, upravo je nalaz da pri 143 mjerne zone u treningu nelinearni ansambli ne nadmašuju linearni oblik (pogl. 5.1) sam po sebi rezultat strojnog učenja — negativan rezultat o odnosu složenosti modela i veličine uzorka, konzistentan s poukama pregledane literature o malim terenskim skupovima (pogl.

3.3.3), do kojega se bez sustavne usporedbe algoritama ne bi moglo doći. Hipoteza je, uostalom, množinska — „modeli” — i potvrđena je množinski. Uz konačni v4.0, dokumentirani slijed verzija v1 do v3.2 (pogl. 5.1) čini obitelj validiranih modela za različite pretpostavke o raspoloživosti podataka, od kojih svaki ima definiranu domenu, točnost i ulogu.

Provjerama je zajednička još jedna disciplina koju valja učiniti izričitom — nijedna se hipoteza ne potvrđuje mjerama izračunanim na podacima koje je model vidio tijekom učenja. Sve brojke navedene u ovom potpoglavlju — od redukcije ulaznog prostora preko točnosti do granica generalizacije — potječu iz predikcija izvan preklopa pod validacijom grupiranom po mjernim zonama, dakle iz simulacije upravo one situacije u kojoj će se model koristiti: procjene eksponenta zone koju nitko prije nije mjerio. Ta razlika nije tehnička sitnica nego uvjet smislenosti provjere. Pregled literature dokumentirao je da slučajno miješanje strukturiranih podataka pri validaciji može iskazane točnosti napuhati višestruko (pogl. 3.3.1), a upravo ta opasnost u ovoj je građi strukturno prisutna. Zapisi ponovljenih koraka iste zone dijele sve značajke, zbog čega bi negrupirana validacija model ocjenjivala na zonama koje je već vidio i laskala svakom obliku prenaučenosti (pogl. 4.3.1). Hipoteze potvrđene pod tako kompromitiranim protokolom bile bi potvrđene samo prividno — stoga je izbor strogog protokola, premda daje skromnije brojke, dio dokazne vrijednosti potvrda, a ne njezina cijena. Istoj disciplini pripada i odnos dviju završnih verzija modela. Sve tri provjere oslanjaju se na konačni model v4.0. Izbor između v4.0 i v3.2 pritom ni na što ne utječe — njihove se predikcije razlikuju zanemarivo (medijan apsolutne razlike 0,018; pogl. 5.2.2), te bi svi zaključci bili jednaki i s drugom verzijom. Ta je neosjetljivost provjerena izračunom, a ne pretpostavljena.

Sažetak provjere svih triju hipoteza — s formulacijom, dokaznom građom po poglavljima, ključnim kvantitativnim pokazateljima i statusom potvrde — daje tablica 6.1.

Tablica 6.1. Sažetak provjere hipoteza (H1–H3): formulacija, dokazna građa, ključni kvantitativni pokazatelji, status potvrde

Hipoteza	Formulacija	Dokazna građa	Ključni kvantitativni pokazatelji	Status potvrde
H1	Moguće je definirati i optimizirati parametre vodoopskrbne mreže potrebne za analitičko definiranje N1 eksponenta.	Triangulirana analiza važnosti (filtarska, ugrađena i omotačka selekcija uz permutacijsku važnost izvan preklopa) — pogl. 4.3.4, 5.4; formalna optimizacija broja parametara pod grupiranom validacijom uz pravilo jedne standardne pogreške — pogl. 5.1, tablica 5.1;	Redukcija ulaznog prostora s 13 kandidatskih parametara na jednu izvedenu značajku — LD, koja objedinjuje tri izvorna podatka (L_0 , L_m i P_0) — bez statistički značajnoga gubitka točnosti; statički podaci imovinskog registra bez informacije o gubicima ne nadmašuju naivne	Potvrđena: skup parametara definiran, hijerarhijski strukturiran i optimiziran, s dokumentiranim razlozima isključenja svakoga kandidata.

Hipoteza	Formulacija	Dokazna građa	Ključni kvantitativni pokazatelji	Status potvrde
		kontrolirana dijagnoza plastičnih zona — pogl. 5.4.2	reference (minimalni podatkovni zahtjev: mjerenje protoka na ulazu u zonu); materijal cijevi djeluje kao uvjetna gornja granica, ne kao aditivni parametar	
H2	Moguće je analitički definirati N1 eksponent s visokom razinom preciznosti u svrhu smanjenja ili potpunog uklanjanja potrebe za terenskim ispitivanjem.	Validacija izvan preklopa pod grupiranom validacijom (model v4.0) — pogl. 5.2.2; usporedba s naivnim referencama — tablica 5.1; gornja granica mjernog šuma terenskih testova — pogl. 4.2.3; granice generalizacije — pogl. 5.3, tablica 5.4	MAE = 0,230 na kvalitetno filtriranim podacima (64 % unutar $\pm 0,25$; 90 % unutar $\pm 0,50$; pristranost $-0,035$); Ekvador MAE 0,198 uz 92 % unutar $\pm 0,50$; ~23 % bolja od najbolje naivne reference (0,298); 80-postotni interval $[N1 - 0,32, N1 + 0,39]$; 13 % terenskih testova fizikalno nemoguće, samo 11 % suglasno s teorijom materijala unutar ± 16 %; izvan domene MAE 0,47–0,70	Potvrđena uz kvantificirane granice: u planerskoj primjeni potreba za terenskim ispitivanjem uklanja se u cijelosti, u investicijski osjetljivim slučajevima racionalizira (predkvalifikacijski prag; protokolarni pojas koraka 15–35 %); izvan validirane domene primjena tek uz lokalnu rekaliibraciju.
H3	Moguće je izraditi nove matematičke modele definiranja eksponenta curenja N1 bazirane na strojnom učenju.	Usporedno vrednovanje šest obitelji algoritama (OLS, Ridge, Lasso, slučajne šume, gradijentno pojačavanje, WLS) — pogl. 4.4, 5.1; obitelj modela v1–v4.0 — tablica 5.2; pregled literature (94 izvora) — pogl. 3.4; dvorazinska shema procjene — pogl. 5.2.3; protokol kontinuirane rekaliibracije — pogl. 6.3	Konačni model v4.0: $N1 = 1,3375 - 0,2187 \cdot \ln(1 + 100 \cdot LD)$, ograničeno na $[0,50, 1,50]$; svaka sastavnica (oblik, ulazi, težine, nesigurnost) proizvod učenja iz podataka pod kontrolom generalizacije; nelinearni ansambl ne nadmašuju linearni oblik pri 143 mjerne zone u treningu	Potvrđena: prvi objavljeni postupak koji eksponent N1 predviđa iz značajki vodoopskrbnog sustava; obitelj validiranih, interpretabilnih modela s kvantificiranom nesigurnošću, pragom primjene i protokolom rekaliibracije.

Izvor: pogl. 6.1 disertacije; master izvješće (N1_master_report_HR), Dio V; pogl. 5.

Provjera hipoteza ujedno zatvara i petlju prema metodi odobrenoj prijedlogom teme, čijih je pet koraka — analiza literature, prikupljanje i selekcija terenskih podataka, statistička analiza s optimizacijom skupa parametara, izgradnja i ispitivanje matematičkih modela te zaključci s preporukama — disertacija provela redom u poglavljima 2 i 3 (literatura), 4.2 (prikupljanje i kritička selekcija), 4.3 s 5.4 (statistička analiza i optimizacija parametara), 5.1 s 5.2 (izgradnja i ispitivanje modela) te 6 i 7 (zaključci i preporuke). Podudarnost nije formalna nego funkcionalna. Svaka od triju hipoteza dobila je dokaznu građu upravo iz onoga koraka metode koji je za nju predviđen — H1 iz statističke analize i optimizacije, H2 iz ispitivanja modela pod strogom validacijom, H3 iz izgradnje i usporedbe modela — stoga provjera hipoteza istodobno

potvrđuje i da je odobrena metoda bila dostatna za postavljeni cilj, bez odstupanja od prijavljenog istraživačkog plana u ijednom koraku koji bi za hipoteze bio mjerodavan.

Tri potvrde na kraju valja pročitati i kao cjelinu, jer hipoteze nisu neovisne nego uzlazno povezane. H1 utvrđuje da informacija o eksponentu u rutinski dostupnim podacima postoji i gdje se nalazi, H2 kvantificira koliko se te informacije da pretvoriti u točnost odluke, a H3 potvrđuje da postupak pretvorbe — od podataka preko validacije do primjenjiva alata — postoji i da je ponovljiv. Redoslijed je pritom logički nužan — da je H1 pala (da nijedan parametar ne nosi informaciju), H2 i H3 ne bi imale predmet; da je H2 potvrđena bez granica iz pogl. 5.3, potvrda bi bila jača na papiru, a slabija u primjeni, jer bi prešutjela uvjete vlastite valjanosti. Upravo zato provjera hipoteza u ovom radu uključuje i dokumentirane negativne rezultate — parametre koji ne nose informaciju, algoritme koji ne pobjeđuju, režime u kojima model ne vrijedi — kao sastavni dio potvrde, a ne kao njezino umanjenje. Hipoteza potvrđena zajedno sa svojim granicama jedina je vrsta potvrde na kojoj se smiju temeljiti investicijske odluke i daljnja istraživanja.

6.2. Znanstveni doprinos u odnosu na dosadašnja istraživanja

Znanstveni doprinos disertacije najjasnije se očitava vraćanjem na istraživačku prazninu formuliranu u pogl. 3.4 — u korpusu od 94 pregledana izvora nijedno istraživanje nije primjenjivalo strojno učenje za određivanje eksponenta curenja N1 iz značajki vodoopskrbnog sustava, niti je postojala objedinjena baza terenskih mjerenja na kojoj bi se takav model mogao razviti i neovisno provjeriti. Rasprava koja slijedi svaki od doprinosa smješta u odnos prema toj praznini i prema konkretnim rezultatima dosadašnjih istraživanja iz pogl. 3 — jer doprinos nije ono što je napravljeno, nego ono što je napravljeno a prije nije postojalo, mjereno naspram najbližega postojećeg.

Prvi doprinos, pretpostavka svih ostalih, jest sama istraživačka baza: 217 zapisa terenskih testova tlačnih koraka u 172 mjerne zone na tri kontinenta, objedinjenih u jedinstvenu relacijsku shemu s kontrolom tipova i jedinica, standardiziranim pokazateljima učinka i eksplicitnim oznakama kvalitete svakoga zapisa (pogl. 4.2). Za mjeru toga koraka dovoljno je usporediti dosadašnje stanje. Najveće pojedinačne zbirke terenskih određivanja eksponenta broje 75 zona iz Ujedinjenog Kraljevstva, petnaest ciparskih i sedamnaest malezijskih (Schwaller i van Zyl, 2015), dvanaest zona upravljanja tlakom u KwaDabeki (Deyi i sur., 2014) i dvadesetak kanadskih zona (Jenks i sur., 2023) — raspršene po izvorima, državama i metodologijama, s različitim konvencijama svođenja tlaka i procjene noćne potrošnje, i stoga međusobno

neusporedive bez upravo one sistematizacije koja je ovdje provedena. Baza pritom nije statičan skup nego ponovljiv znanstveni instrument — cjelokupni postupak od sirovih zapisa do svake tablice rezultata kodificiran je u reproducibilnom programskom slijedu obrade (pogl. 6.3), otvorenom za proširivanje novim mjerenjima. Time je uklonjena i prva sistemska prepreka koju je pregled literature identificirao — da se zonske vrijednosti eksponenta objavljuju bez dokumentiranih tlakova, protoka i procjena noćne potrošnje, zbog čega nisu ni provjerljive ni usporedive (pogl. 3.1).

Središnji doprinos jest prvi validirani prediktivni model eksponenta N1 iz rutinski dostupnih podataka — jednadžba (5.1) s pragom primjene, intervalom predviđanja i dvorazinskom shemom procjene. Njegov najizravniji referentni okvir čini dokumentirana praksa. Primjene FAVAD okvira eksponent rutinski pretpostavljaju literaturnim pravilima — 1,2 u scenarijskoj analizi razmještaja ventila (Samir i sur., 2017), 1,5 u planiranju mjernih zona (Nanda i sur., 2023), 1,0 u upravljanju posljedicama onečišćenja (Razavi i sur., 2023) — ili ga prepuštaju optimizacijskom algoritmu bez neovisne provjere (Sebbagh i sur., 2018; Nasirian i Ahrari, 2022; Leinaes i sur., 2024), premda je cijena pogrešne pretpostavke kvantificirana na 15 do 20 % pogreške procjene istjecanja na razini sustava i do 60 % na razini čvora (Kabaasha i sur., 2016; Boian i sur., 2019), a terenski dokumentiran promašaj učinka upravljanja tlakom pri pretpostavljenom eksponentu iznosi 1,70 l/s na zoni od svega nekoliko litara u sekundi ukupnog istjecanja (Özdemir i sur., 2021). Naspram te prakse model nudi treći put, koji dosad nije postojao: procjenu specifičnu za zonu, izvedenu iz njezinih vlastitih kampanjskih podataka, s poznatom i neovisno provjerenom točnošću (MAE 0,230 na kvalitetno filtriranim podacima, 23 % bolje od najbolje naivne reference) i s intervalom koji nesigurnost čini vidljivom umjesto da je skriva. Bitno je pritom da model ne konkurira terenskim metodama iz pogl. 3.1 — testu tlačnih koraka (Dundović i Tadić, 2022), cikliranju tlaka (Jenks i sur., 2023), izolaciji dionica mobilnom opremom (Niebuhr i sur., 2019) — nego popunjava razinu odlučivanja koju one, zbog cijene fizičke intervencije po zoni, strukturno ne mogu pokriti: procjenu preko cijelog portfelja zona prije nego što se ijedan terenski zahvat isplanira.

Fizikalna interpretacija modela pritom nije naknadna racionalizacija nego točka konvergencije s neovisnim istraživačkim linijama, što joj daje dokaznu snagu kakvu sama regresija ne bi imala. Negativni nagib jednadžbe (5.1) — eksponent pada s gustoćom gubitaka — kvantitativna je empirijska potvrda mehanizma miješanja dviju skupina otvora — nepromjenjive i promjenjive površine — koji je stohastičko modeliranje predvidjelo simulacijom. Zonski eksponent određuje omjer puknuća nepromjenjive površine i pozadinskih curenja promjenjive

površine, što znači da stanje sustava, a ne materijal sam po sebi, upravlja položajem zone unutar teorijskog raspona (Schwaller i van Zyl, 2015). Ista konvergencija vrijedi i za najnovije stohastičko modeliranje po materijalima, koje je iz empirijskih razdioba tipova otvora izvelo da medijan zonskog eksponenta PVC mreža raste s razinom gubitaka — od 0,66 pri $ILI = 0,6$ do 1,27 pri $ILI = 8$ — dok metalne i azbest-cementne mreže ostaju blizu 0,5 neovisno o stanju (Beygi i van Zyl, 2024). Nalaz ove disertacije da materijal djeluje kao uvjetna gornja granica — plastika postavlja što zona može doseći, a intenzitet gubitaka, razina tlaka i protokol testa koliko ispod te granice stvarno sjedi (pogl. 5.4.1) — ista je struktura ovisnosti, dobivena posve drugim putem: ne simulacijom iz distribucija otvora, nego kontroliranom dijagnozom na terenskim mjerenjima stvarnih zona (pogl. 5.4.2). Dvije neovisne metode koje se sastaju u istoj strukturi — uvjetnoj, a ne aditivnoj ulozi materijala — čine zajedno snažniji argument nego svaka zasebno, a objašnjavaju i zašto jednostavna pravila pridruživanja eksponenta materijalu sustavno zakazuju na terenu jer plastične mreže daju i 1,0 i 1,76 i 2,4 (Amoatey i sur., 2022; Dundović i Tadić, 2022), a korelacija eksponenta s materijalom na zonskoj razini nije nađena ni u studijama koje su je izravno tražile (Jenks i sur., 2023). Praktičarske smjernice koje plastičnim mrežama paušalno pripisuju 1,5 — iste one iz kojih je izveden teorijski eksponent u vlastitom prethodnom istraživanju (Dundović i Tadić, 2022) — time su i s ove, empirijske strane potvrđene kao zastarjele, u suglasju sa zaključkom simulacijske linije (Beygi i van Zyl, 2024).

Odnos modela prema terenskim metodama određivanja vrijedi raščlaniti i s njihove, mjeriteljske strane, jer model dio svoje vrijednosti crpi upravo iz slabosti koje su terenske studije same dokumentirale. Referentna analiza pouzdanosti postupka procjene pokazala je da procjena parametara iz samo dvaju parova tlaka i curenja — upravo postupak koji u praksi prevladava — daje ekstremno varijabilne rezultate, uključujući fizikalno besmislene vrijednosti, dok stabilne koeficijente daju tek prilagodbe na cijelim vremenskim serijama kakve vodovodima u pravilu nisu dostupne (Marzola i sur., 2021). Pojedinačno terensko određivanje, drugim riječima, i samo je procjena s nezanemarivom i rijetko iskazivanom nesigurnošću — a analitički model tu nesigurnost ne nasljeđuje po zapisu, nego je usrednjuje preko 188 mjerenja iz triju sustava, uz težine koje šumovite zapise diskontiraju (pogl. 4.3.5). U tom svjetlu postaje jasno i zašto model može biti konkurentan pojedinačnom mjerenju izvan optimalnog protokola — on nije alternativa mjerenju nego destilat mnogih mjerenja, discipliniran validacijom koja jamči da destilirano vrijedi i izvan zona iz kojih potječe. S druge strane, tamo gdje terenska praksa jest došla do stabilnih vrijednosti, model ih reproducira kao posebne slučajeve svojeg

kontinuumu umjesto da im proturječi. Preporuka vrijednosti oko 0,7 za metalne mreže s malim udjelom plastike, izvedena iz detaljne talijanske kampanje (Fontana i sur., 2017), odgovara predikciji modela za zone umjerene do visoke gustoće gubitaka — a model uz to objašnjava i kada takva preporuka prestaje vrijediti, to jest čim zonom prestanu dominirati detektabilna puknuća, eksponent i metalne mreže klizi prema gornjoj granici materijala. Paušalna pravila time se pokazuju kao pojedinačne točke na kontinuiranoj ovisnosti koju model opisuje u cijelosti — naslijeđene vrijednosti nisu pogrešne, nego su posebni slučajevi općega odnosa. To je ujedno i najsazetija formulacija odnosa modela prema naslijeđenoj praksi.

Vrijedi zabilježiti i formalno-teorijski razlog zbog kojega izravniji putovi do zonskog eksponenta nisu bili dostupni, jer on doprinos modela smješta na pravu razinu. Idealan pristup — rekonstrukcija svih pojedinačnih curenja zone iz mjerenja na njezinu ulazu — načelno je nerješiv jer broj nepoznanica najmanje dvostruko premašuje broj curenja, kako je formalno pokazano u taksonomiji globalnih modela procjene istjecanja (Zheng i sur., 2016). Svaki upotrebljiv postupak stoga mora ciljati agregatnu veličinu, a ne njezine sastavnice — i tu se razilaze dva puta. Stohastičko modeliranje agregat izводи iz pretpostavljenih distribucija pojedinačnih curenja (Schwaller i van Zyl, 2015; Beygi i van Zyl, 2024), dok ga ovaj model uči izravno iz izmjerenih agregata stvarnih zona. Prvi put daje uvid u mehanizme, ali njegove distribucije ostaju vezane uz građu iz koje su izvedene; drugi daje kalibriranu procjenu s validiranom točnošću, ali mehanizme mora preuzeti iz teorije. Upravo zato njihova konvergencija u istoj strukturi ovisnosti — dokumentirana ranije u ovom potpoglavlju — nije ukras nego metodološki najjači raspoloživi oblik potvrde jer dva puta koja dijele samo FAVAD fiziku, a ne podatke ni pretpostavke, dolaze do istog odgovora.

Protokolarni pojas relativnoga tlačnog koraka od 15 do 35 % samostalan je metodološki doprinos terenskoj praksi, neovisan o samom modelu. Njegova donja granica formalizira ono što je literatura znala kvalitativno — da mali koraci daju šumovite rezultate jer mali nazivnik amplificira pogrešku procjene noćne potrošnje (Marzola i sur., 2021; Jenks i sur., 2023) — ali je gornja granica nova. Statistička identifikacija ($p = 0,035$) sustavnoga podcjenjivanja eksponenta pri koracima dubljima od približno 35 % (pogl. 5.4.3) pretvara u protokolarno pravilo pojavu koju je stohastičko modeliranje predvidjelo simulacijom, pokazavši da veliko smanjenje tlaka tijekom ispitivanja daje niži izmjereni eksponent — u baznom sustavu 0,92 pri koraku od 35 m naspram 1,12 pri infinitezimalnom koraku (Schwaller i van Zyl, 2015). Doprinos je, dakle, empirijska potvrda i operacionalizacija teorijskog predviđanja na međunarodnoj terenskoj građi, s izravnom posljedicom za svaku buduću kampanju — test izvan

pojasa nije samo manje precizan nego usmjereno pristran, stoga se njegovim rezultatom ne smije ni kalibrirati model ni verificirati teorija. Retrospektivno, isti pojas objašnjava i dio raspršenosti dosadašnjih terenskih zbirki iz pogl. 3.1. Rasponi poput 0,18 do 3,33 (Deyi i sur., 2014) ili varijabilnost 0,9 do 3,2 u zonama slabog signala (Jenks i sur., 2023) čitaju se, kroz leću ovog nalaza, dijelom kao stvarna fizikalna raznolikost, a dijelom kao artefakt protokola — razlučivanje koje prije ovog istraživanja nije imalo kvantitativan kriterij.

Kontrolirana dijagnoza zona sa 100 % plastičnih cijevi (pogl. 5.4.2) treći je samostalni doprinos, jer zatvara pitanje koje je u literaturi ostalo izrijekom otvoreno. Da terenske vrijednosti plastičnih mreža sustavno promašuju teorijska očekivanja, dokumentirano je više puta — izmjereni 2,4 naspram očekivanog 1,0 u Gani (Amoatey i sur., 2022), 1,76 naspram teorijskih 1,5 u Hrvatskoj (Dundović i Tadić, 2022), vrijednosti do 3,33 s fizikalno nemogućim negativnim sustavskim površinama u KwaDabeki (Deyi i sur., 2014) — ali bez postupka koji bi uzroke razdvojio. Dijagnoza je promašaj raščlanila na tri kvantificirana čimbenika — omjer puknuća i pozadinskog istjecanja (ILI), razinu radnog tlaka i dubinu tlačnog koraka — i time povezala dvije dosad odvojene linije objašnjenja: laboratorijsku, koja je pokazala da rubni uvjeti ispitivanja mijenjaju odziv otvora (Latchoomun i sur., 2015; Van Zyl i Malde, 2017), i terensku, koja je odstupanja bilježila bez mogućnosti kontrole uvjeta. Praktična posljedica — da se teorijskoj vrijednosti materijala smije vjerovati tek u zonama s niskim gubicima, dostatnim tlakom i protokolarno ispravnim testom — ugrađena je u dvorazinsku shemu procjene (pogl. 5.2.3) i u savjetnik za planiranje testova (pogl. 6.3), čime dijagnoza nije ostala akademski nalaz nego operativno pravilo.

Prema literaturi strojnog učenja u vodoopskrbnim sustavima doprinos je disertacije dvojak — premošćuje jaz između dvaju tokova i demonstrira metodološki standard za koji su pregledi utvrdili da u području nedostaje. Jaz je opisan u pogl. 3.4. Dodiri strojnog učenja i FAVAD okvira bili su jednosmjerni — hidraulički modeli s pretpostavljenim eksponentom kao generatori trening podataka (Taghlabi i sur., 2020; Wang i sur., 2023), optimizacija eksponenta kao slobodnog parametra pojedinačne mreže (Sebbagh i sur., 2018; Nasirian i Ahrari, 2022) — te fizika curenja i podatkovno modeliranje nisu razmjenjivali informaciju u smjeru koji bi eksponent učinio predvidivim. Ovdje je smjer obrnut i sprega potpuna — FAVAD teorija modelu daje kandidatske varijable s fizikalnim značenjem, okvire vjerodostojnosti i interpretaciju koeficijenata, a strojno učenje teoriji vraća empirijsku provjeru njezinih mehanizama na međunarodnoj terenskoj građi. Metodološki, disertacija na malom terenskom skupu dosljedno provodi upravo one prakse čiji su izostanak sustavni pregledi dokumentirali

kao kroničnu slabost područja: validaciju koja poštuje strukturu podataka umjesto slučajnog miješanja — za koje je pokazano da točnost može napuhati i višestruko (Canivete i sur., 2026) — usporedbu s naivnim referencama umjesto izoliranih brojki, izvještavanje pristranosti i nesigurnosti uz točnost, negativne rezultate uz pozitivne te potpunu reproducibilnost s objavljenim podacima i programskim kodom, koju u pregledanom području objavljuje tek 13 % studija (Canivete i sur., 2026). U području u kojem većina skupova podataka potječe iz simulacija, a terenske implementacije ostaju rijetke (Zuñiga-Urbe i sur., 2026), model razvijen i validiran isključivo na stvarnim terenskim mjerenjima — s dokumentiranim granicama valjanosti — primjer je smjera sazrijevanja koji ti pregledi zagovaraju.

U doprinos naposljetku ulaze i sami negativni rezultati istraživanja, i to ne kao nusprodukt nego kao građa koje u literaturi sustavno nedostaje. Sustavni pregledi područja dokumentirali su sklonost izvještavanju samo najboljih rezultata, bez procjene nesigurnosti i bez negativnih nalaza (Zuñiga-Urbe i sur., 2026; Canivete i sur., 2026) — praksu koja svakome tko na objavljenj gradji gradi dalje prešućuje upravo ono najskuplje: što je već isprobano i nije uspjelo. Ova disertacija dokumentira tri takva nalaza s punim kvantitativnim iskazom: da statički podaci imovinskog registra bez informacije o gubicima ne nose iskoristivu informaciju o eksponentu (pogl. 5.1) — nalaz koji buduće istraživače oslobađa ponavljanja najjeftinijega, i stoga najprimamljivijega, pristupa; da nelinearni ansambli pri ovoj veličini uzorka ne nadmašuju linearni oblik (pogl. 5.1) — nalaz koji kalibrira očekivanja od složenijih arhitektura na terenskim skupovima ovog reda veličine; te da se model ne ekstrapolira na nepokriven režim gubitaka, s dokumentiranim mehanizmom i veličinom degradacije (pogl. 5.3) — nalaz koji je za odgovornu primjenu vredniji od svake pozitivne brojke, jer definira što se s modelom ne smije. Znanstvena vrijednost negativnog rezultata mjeri se time koliko rada drugima uštedi i koliko pogrešnih primjena spriječi — a po oba mjerila ova tri nalaza stoje uz bok pozitivnima.

Pojedinačni metodološki izbori disertacije pritom nalaze neovisne paralele u najboljoj praksi susjednih zadaća strojnog učenja u vodoopskrbi, što njihovu opravdanost potvrđuje izvan konteksta u kojem su doneseni. Nalaz da mali, discipliniranom selekcijom odabran skup ulaznih varijabli nadmašuje potpuni skup dokumentiran je i u predviđanju kvarova — gdje je konfiguracija sa svega četiri varijable pobijedila potpunu, a dodatna varijabla tlaka predikciju pogoršala (Robles-Velasco i sur., 2021b) — i u akustičnoj lokalizaciji, gdje višak značajki na malom uzorku ruši validacijsku točnost s 82,50 na 37,50 % (pogl. 3.3.1); redukcija ovog istraživanja na jednu izvedenu značajku (LD) ista je pojava, dovedena do svoje statistički opravdane krajnosti, pri čemu je pokazatelj LD u ovome radu prvi put uveden i upotrijebljen

kao ulazna veličina takvih modela — srodne normalizacije u literaturi (npr. UARL) služe ocjeni razine gubitaka, ne procjeni tlačnog odziva. Validacijski protokol izostavljanja grupe strukturno je istovjetan provjeri prenosivosti modela kvalitete vode među postrojenjima, treniranog na šest i validiranog na sedmom (Lu i sur., 2023) — s tom razlikom da je ovdje ista logika primijenjena na dvjema razinama, zona i država, i da je razina države dala namjerno negativan rezultat s konstruktivnom interpretacijom. Konceptualno, cijeli je zadatak discipline surogatnog praćenja — lako dostupna veličina kao zamjena za skupu (pogl. 3.3.3) — a iskustvo te discipline da uspjeh ovisi o kvaliteti i strukturi podataka više nego o složenosti algoritma (Vries i sur., 2016; Oğuz i Ertuğrul, 2023) ovdje je potvrđeno u zadaći u kojoj dosad nije bilo provjereno: regresiji fizikalnog parametra iz malog međunarodnog terenskog uzorka. Disertacija time literaturi strojnog učenja u vodoopskrbi ne dodaje samo novu zadaću nego i novu evidencijsku točku za njezine metodološke zakonitosti — točku koja je, za razliku od većine postojećih, u cijelosti terenska, reproducibilna i s dokumentiranim negativnim rezultatima.

Konačno, doprinos ima i svoju domaću dimenziju. Hrvatski pregledni radovi utvrdili su da primjena metoda umjetne inteligencije u domaćem građevinarstvu i vodnom sektoru zaostaje za mogućnostima, ponajprije zbog oskudnih podataka komunalnih poduzeća i malog broja radova s provjerljivim rezultatima (Grčić i Šperac, 2024; Obradović i sur., 2019). Disertacija tom kontekstu ne nudi samo gotov alat primjenjiv na hrvatske sustave — s dokumentiranim gubicima blizu polovice ulaznog volumena i vrijednostima ILI pokazatelja do 44,2 na 23 analizirane zone (Dundović, 2017) — nego i dokumentiran obrazac puta od terenskih mjerenja, preko kritičke kontrole njihove kvalitete, do transparentno validiranog modela s poznatim granicama: obrazac prenosiv na srodne probleme analitičkog određivanja pogonskih parametara iz rutinski dostupnih podataka i koji odgovara upravo na prepreku koju su domaći pregledi identificirali. U tom je smislu vlastito prethodno istraživanje (Dundović, 2017; Dundović i Tadić, 2022) — jedna zona, jedno mjerenje, usporedba s teorijom — ovom disertacijom dovedeno do svoje logičke posljedice: od pojedinačne terenske verifikacije do modela koji terensku verifikaciju čini planibilnom, a njezinu potrebu iznimkom umjesto pravila.

6.3. Praktična primjena

Praktična vrijednost istraživanja ne iscrpljuje se u jednadžbi. Rezultati su operacionalizirani u cjelovit lanac primjene — od kampanjskog mjerenja do investicijske odluke — implementiran u dvama alatima za krajnje korisnike i jednom istraživačkom alatu, uz definiran postupak

primjene i protokol dugoročnog održavanja modela. Ovo potpoglavlje prikazuje taj lanac redoslijedom kojim ga prolazi krajnji korisnik u praktičnoj primjeni.

6.3.1. Alati za primjenu

Polazište primjene jest standardna mjerna kampanja: zapisivači protoka i tlaka u zoni uz analizu minimalnoga noćnog protoka, bez ugradnje redukcijskog ventila (pogl. 2.3). Iz kampanje se preuzimaju četiri sirove veličine — noćni protok stvarnih gubitaka L_0 , duljina glavnih cjevovoda L_m iz katastra, prosječni zonski tlak P_0 te, za potrebe druge razine procjene, udio plastičnih cijevi iz registra imovine — a izvedenu veličinu, jedini ulaz modela LD, računaju alati automatski. Ta podjela rada nije kozmetička. Pogreške u jedinicama i konvencijama izračuna najbanalniji su i najčešći način na koji se dobar model u praksi pokvari, stoga je mogućnost takve pogreške uklonjena konstrukcijom (pogl. 5.2.1).

Prvi alat za praktičnu primjenu jest proračunski kalkulator, radna knjiga s jednim listom organiziranim u šest blokova: ulazi iz kampanje, automatski izračunate statistike, predkvalifikacijske provjere, dvorazinski rezultat, savjetnik za test tlačnih koraka i tablica za očitavanje predviđenih vrijednosti. Kalkulator provodi žive provjere valjanosti — fizikalnu ispravnost ulaza kao blokirajući kriterij, prag signala gubitaka ($L_0 \geq 2$ l/s i $LD \geq 0,02$) kao granicu između razina procjene, upozorenje pri radnom tlaku ispod 30 m koje nikad ne blokira — i vraća procjenu eksponenta s pripadajućim intervalom, epistemičkom oznakom razine te FAVAD uštedom za referentno smanjenje tlaka od 10 %, u razini 2 izračunanom konzervativno na donjoj granici intervala (pogl. 5.2.3). Kalkulator time nije „formula u ćeliji” nego implementacija cjelokupne discipline primjene iz pogl. 5.2. Nijedna valjana zona ne ostaje bez odgovora, nijedan odgovor bez oznake svoje vrste, a pravila koja odlučuju o razini procjene ista su ona empirijski izvedena u pogl. 4.2.3 — izračun se uskraćuje zbog nevaljanosti ulaza, nikad zbog naravi zone.

Drugi je alat programski modul `predict_n1.py`, implementacija istog dvorazinskog procjenitelja bez ijedne vanjske ovisnosti, prikladna za skupno ocjenjivanje stotina zona ili ugradnju u postojeće informacijske sustave operatera. Modul je samodokumentirajući, s identičnim pravilima usmjeravanja i identičnim izlazima kao kalkulator — procjena, interval, razina, ušteda, presuda o smislenosti terenskog testa — a njegova je unutarnja arhitektura podređena održivosti. Svi koeficijenti modela, granice odsijecanja i kvantili intervala izdvojeni su kao imenovane konstante, zbog čega se rekalkibracija na novim podacima svodi na promjenu nekoliko brojeva, bez zadiranja u logiku. Uz dva primjenska alata, istraživanju pripada i treći,

istraživački: programski slijed obrade `n1_pipeline.py`, koji iz sirove baze reproducira cjelokupnu analizu — parsiranje, filter vjerodostojnosti, grupiranu validaciju svih kandidatskih modela, tri mjere važnosti značajki i svaku tablicu rezultata citiranu u ovom radu. On za primjenu modela nije potreban, ali je uvjet znanstvene provjerljivosti i temelj svake buduće nadogradnje baze. Sva tri alata registrirana su kao prilozi disertaciji (prilozi A do C), zajedno s tablicama rezultata koje čine revizijski trag istraživanja (prilog D).

Dva su sporedna primjenska proizvoda istraživanja upotrebljiva i posve neovisno o modelu. Prvi je savjetnik za planiranje testova tlačnih koraka, ugrađen u oba alata. Za zadanu zonu i izvediv relativni korak vraća jednu od tri presude — test pouzdan i nepristran (signal dostatan, korak u pojasu 15 do 35 %), korak predubok (mjerio bi sustavno prenizak eksponent — smanjiti), odnosno signal preslab (test bi mjerio šum — koristiti analitičku procjenu). Time se protokolarni doprinos iz pogl. 5.4.3 isporučuje u obliku koji terenski inženjer koristi prije izlaska na teren, a proračun kampanja usmjerava na mjerenja koja će imati dokaznu vrijednost. Drugi je proizvod dijagnostički predložak za trijažu postojećih arhiva terenskih testova, izveden iz raščlambe validacije po podskupovima (pogl. 5.2.2). Korisnik sa zatečenim arhivom testova može, primjenom istih kriterija signala i pojasa koraka, razdvojiti zapise s dokaznom vrijednošću od indikativnih — postupak demonstriran na južnoafričkom podskupu baze, gdje prividni neuspjeh modela dijagnosticira kvalitetu arhive, a ne modela. U oba slučaja disertacija ne isporučuje samo rezultate nego i mjerila kojima korisnik samostalno ocjenjuje vlastite podatke.

Uz alate za izračun, primjeni pripada i sloj komunikacije rezultata, jer procjenu eksponenta u pravilu ne koristi onaj tko ju je izračunao — kampanju provodi mjerni tim, procjenu čita planer, a odluku donosi uprava. Oba alata stoga uz svaku procjenu isporučuju i njezino izravno tumačenje — tablicu za očitavanje predviđenih vrijednosti preko raspona gustoće gubitaka i interpretacijsku napomenu koja eksponent prevodi u strategiju. Vrijednost blizu 0,5 znači prioritet aktivnom traženju i sanaciji kvarova, vrijednost blizu 1,5 prioritet upravljanju tlakom. Time se izbjegava najčešći način na koji kvantitativni alati u operativnoj praksi zakažu — ne pogrešnim brojkama, nego brojkama koje primatelj ne zna pročitati — a epistemička oznaka razine procjene, koja putuje uz svaku brojku (pogl. 5.2.3), jamči da se ni pri prijenosu rezultata kroz organizaciju ne gubi informacija o tome koje je vrste procjena na kojoj se odluka temelji. Za upravu koja odlučuje o programu upravljanja tlakom to konkretno znači da uz svaki prijedlog ulaganja stoji i njegova dokazna kategorija: validirana statistička procjena s

intervalom, teorijska procjena s konzervativnom ušedom ili preporuka terenske provjere — tri kategorije s tri različite težine, vidljive na prvi pogled.

6.3.2. Primjena na razini zone i portfelja

Preporučeni postupak primjene, definiran u pogl. 5 i ovdje sažet operativno, ima četiri koraka. Prvo, za promatranu zonu provodi se standardna mjerna kampanja i iz nje izračunavaju ulazi. Drugo, primjenom modela dobiva se procjena eksponenta s 80-postotnim intervalom, koja se uvrštava u FAVAD relaciju, jedn. (2.5), radi procjene očekivanih ušteda kandidatskih zahvata upravljanja tlakom. Treće, kandidatske se zone rangiraju, a prioritet ugradnje redukcijskih ventila dobivaju zone u kojima je predviđeni eksponent visok i u kojima uštede ostaju ekonomski opravdane i na donjoj granici intervala — čime nesigurnost procjene ulazi u odluku eksplicitno i konzervativno. Četvrto, razdoblje puštanja svakoga ugrađenog ventila u pogon iskorištava se kao terenski test tlačnih koraka bez dodatnog troška — bilježenjem odziva gubitaka tijekom početnog snižavanja tlaka izračunava se ostvareni eksponent koji se, zadovolji li kriterije kvalitete (dostatan signal i relativni korak u pojasu 15 do 35 %), pridružuje trening skupu. Budući da je oblik modela stabilan, rekalkibracija se svodi na ponovnu regresiju dvaju koeficijenata — stoga svaki pušteni ventil poboljšava sposobnost modela u odabiru sljedeće zone. Taj protokol kontinuirane rekalkibracije pretvara odnos modela i terena iz jednokratne kalibracije u trajnu povratnu petlju — model usmjerava gdje mjeriti, mjerenja pooštravaju model.

Za upravljanje sustavom model mijenja i samu ekonomiku informacije o eksponentu. Dosad je zonska vrijednost eksponenta bila skupa pojedinačna informacija — jedan test, jedna zona, uz fizičku intervenciju i noćni rad (pogl. 3.1) — zbog čega su odluke o upravljanju tlakom preko portfelja zona nužno počivale na paušalnim vrijednostima, s dokumentiranim posljedicama (pogl. 3.2, pogl. 6.2). S modelom eksponent postaje besplatan nusproizvod svake već provedene kampanje. Operator sa stotinu zona i arhivom kampanja dobiva stotinu procjena s intervalima u jednoj skupnoj obradi, a s njima i ono što nijedan pojedinačni test ne može dati — konzistentno rangiranje cijelog portfelja po očekivanoj isplativosti redukcije tlaka, prije ijednog terenskog zahvata. Poruka procjene pritom je dvosmjerna, kako je razrađeno u pogl. 5.2, to jest visok eksponent upućuje na prioritet upravljanja tlakom, ali nizak eksponent nije izostanak rezultata nego jednako vrijedna uputa da u zoni dominiraju detektabilna puknuća i da prednost imaju aktivno traženje i sanacija kvarova — model, dakle, ne rangira samo kandidatne zone za ugradnju redukcijskih ventila nego raspodjeljuje zone među dvjema temeljnim strategijama smanjenja gubitaka (pogl. 2.2.2).

Kako procjena eksponenta konkretno mijenja investicijski račun, najlakše je vidjeti na brojčanoj ilustraciji rangiranja dviju kandidatskih zona. Zona kojom dominiraju detektabilna puknuća, s predviđenim eksponentom pri donjoj granici raspona izlaza (0,5), od smanjenja tlaka za 10 % može očekivati smanjenje istjecanja od približno 5 %; uredna zona s dominacijom pozadinskih gubitaka i eksponentom pri gornjoj granici (1,5) od istog zahvata očekuje približno 15 % — trostruko više, uz isti trošak ventila. Paušalna vrijednost $N1 = 1,0$, primijenjena na obje zone, tu razliku briše u potpunosti. Obje bi zone dobile istu očekivanu uštedu od približno 10 %, stoga bi redoslijed ulaganja odredili sekundarni kriteriji, slijepi za stvarni potencijal. S procjenama modela redoslijed se određuje iz stvarnoga hidrauličkog stanja zona, a konzervativna varijanta računa — ušteda na donjoj granici intervala, dakle pri eksponentu umanjenom za 0,32 — jamči da zona zadržava prioritet samo ako joj je isplativost otporna i na nepovoljan kraj nesigurnosti. Preko portfelja zona ista logika daje i ono što pojedinačne procjene ne mogu: procjenu ukupnoga dostižnog potencijala ušteda upravljanja tlakom u sustavu, s gotovo nultom sustavnom pristranošću (pogl. 5.2.2), dakle bez sklonosti ni napuhavanju ni potiskivanju zbroja — svojstvo presudno za odluke na razini programa, u kojima se pogreške pojedinačnih zona zbrajaju.

Na razini godišnjeg planiranja investicija isti se elementi slažu u zaokružen ciklus. Na početku planskog razdoblja skupnom se obradom arhive kampanja — jednim pokretanjem programskog modula nad svim zonama — dobiva ažuriran portfelj procjena s intervalima, iz kojega se kandidati za ugradnju redukcijskih ventila rangiraju konzervativno. Prednost dobivaju zone čija isplativost opstaje i pri uštedi izračunanoj na donjoj granici intervala predviđanja, čime godišnji plan ne počiva na očekivanim nego na obranljivim vrijednostima. Tijekom godine svako puštanje ventila u pogon, provedeno po protokolu iz pogl. 5.4.3, vraća u bazu nov kvalitetno dokumentiran zapis, te se na kraju razdoblja koeficijenti modela rekalibriraju i sljedeći planski ciklus započinje s pooštrenim procjenama — povratna petlja kontinuirane rekalibracije time dobiva i svoj prirodni administrativni ritam, usklađen s godišnjim proračunskim ciklusom operatera. Zone koje pritom ispadnu iz prioriteta ne nestaju iz plana — procjene s niskim eksponentom preusmjeravaju sredstva prema aktivnom traženju i sanaciji kvarova, stoga godišnji plan raspodjeljuje proračun između dviju temeljnih strategija smanjenja gubitaka na temelju istoga skupa procjena, umjesto da svaku strategiju planira odvojeno.

U širem okviru upravljanja gubicima model se uklapa u standardnu IWA metodologiju iz pogl. 2.1 kao karika koja je dosad nedostajala između godišnje bilance vode i planiranja upravljanja tlakom. Bilanca i pokazatelji izvedeni iz nje — stvarni gubici, ILI — odgovaraju na pitanje

koliko sustav gubi i koliko je to loše naspram neizbježnoga minimuma, ali ne i na pitanje koji je alat za smanjenje najdjelotvorniji u kojoj zoni. Za to je potreban upravo eksponent, jer on kvantificira polugu tlaka nad gubicima. Dosad je ta karika popunjavana inženjerskom odlukom s dokumentiranim posljedicama (pogl. 6.2); s modelom se popunjava procjenom specifičnom za zonu, izvedenom iz istih kampanjskih podataka iz kojih se računaju i sami pokazatelji bilance. Praktično, to znači da korisnik koji već provodi kampanje po IWA metodologiji — a to je preduvjet i svake ozbiljne strategije smanjenja neprihodovane vode — sve ulaze modela već posjeduje. Model ne dodaje nijedan novi mjerni zahtjev, nego iz postojećih mjerenja izvlači informaciju koja je u njima dosad ležala neiskorištena. Tipične scenarije praktične primjene — s potrebnim ulaznim podacima, izlazom te razinom pouzdanosti i ograničenjem svakoga — sažima tablica 6.2.

Tablica 6.2. Scenariji praktične primjene

Scenarij	Potrebni ulazni podaci	Izlaz	Razina pouzdanosti i ograničenje
plansko rangiranje portfelja zona	arhiva mjernih kampanja svih zona (skupna obrada programskim modulom)	portfelj procjena eksponenta s intervalima; rangiranje po očekivanoj isplativosti redukcije tlaka i raspodjela zona među dvjema strategijama smanjenja gubitaka	konzervativno rangiranje donjom granicom intervala; gotovo nulta sustavna pristranost zbroja ušteda preko portfelja (pogl. 5.2.2)
investicijska odluka za zonu s dostatnim signalom ($LD \geq 0,02$)	kampanjska mjerenja zone: L_0 , L_m , P_0 (LD izračunavaju alati automatski)	procjena razine 1: eksponent prema jedn. (5.1) s 80-postotnim intervalom [$N_1 - 0,32$, $N_1 + 0,39$] i FAVAD uštedom	validirana statistička procjena (MAE 0,230 na kvalitetno filtriranim podacima); ulaganje opravdano samo ako ušteda opstaje i na donjoj granici intervala
zona ispod praga signala	udio plastičnih (fleksibilnih) cijevi iz katastra imovine	procjena razine 2: teorijska procjena iz granične krivulje materijala, interval [$N_1 - 0,30$, $N_1 + 0,10$], ušteda konzervativno s donje granice	teorijska procjena izvan validirane domene, izrijekom označena; terenski test se ne preporučuje jer bi mjerio šum (pogl. 5.2.3)
zona izvan validirane domene (niski gubici s dubokim koracima; isprekidana opskrba)	nekoliko kvalitetno filtriranih lokalnih mjerenja (dostatan signal, relativni korak u pojasu 15–35 %)	lokalna rekalkibracija dvaju koeficijenata jednadžbe (5.1) na lokalnim zapisima, zatim procjena razine 1	bez lokalne prilagodbe procjena je nepoznate pouzdanosti (pogl. 5.3); već dva zapisa ciljnog režima sprječavaju kvalitativni slom nagiba

6.3.3. Protokol kontinuirane rekalkibracije i uvođenje u praksu

Prijenos u nove kontekste — nove države, tipove sustava ili režime gubitaka slabo pokrivene bazom — ima definiran i kvantitativno utemeljen postupak (pogl. 5.3). Model se u novi kontekst ne prenosi kao gotova istina nego kao kalibrirana apriorna procjena. Prikupi se nekoliko kvalitetno filtriranih lokalnih mjerenja, provjeri slaganje izmjerenih eksponenata s predikcijama i, pri sustavnom odstupanju, dva koeficijenta jednadžbe (5.1) ponovno prilagode na lokalnim zapisima — regresijski zadatak rješiv u proračunskoj tablici. Klasterski eksperiment iz pogl. 5.3 tom postupku daje kvantitativno jamstvo — već su dva zapisa ciljnog režima u treningu bila dovoljna da spriječe kvalitativni slom nagiba, zbog čega cijena sidrenja modela u novom režimu iznosi nekoliko noćnih mjerenja, ne istraživački projekt. Za hrvatski kontekst, u kojem je motivacija istraživanja i začeta (pogl. 1.1), to znači konkretan put uvođenja. Postojeće kampanje mjernih zona — kakve su dokumentirane na 23 zone s rasponom ILI pokazatelja od 0,0 do 44,2 (Dundović, 2017) — već sadrže sve ulaze modela, a prva domaća mjerenja provedena protokolom iz pogl. 5.4.3, počevši od zone verificirane u vlastitom prethodnom istraživanju (Dundović i Tadić, 2022), poslužila bi istodobno za provjeru prijenosa i za lokalno sidrenje koeficijenata.

Granice primjene, razrađene u pogl. 5.2.3 i 5.3, u operativnom sažetku glase: model se primjenjuje kao statistička procjena samo u zonama s dostatnim signalom gubitaka; zone ispod praga dobivaju jasno označenu teorijsku procjenu iz krivulje gornje granice eksponenta prema materijalu cijevi, konzervativnu po konstrukciji; radni tlak ispod 30 m proizvodi upozorenje o interpretaciji, nikad uskratu; a primjena izvan režima gubitaka pokrivenih bazom traži lokalnu rekalkulaciju. Nijedna od tih granica nije ograda od odgovornosti nego dio isporuke. Alati ih provode automatski, stoga korisnik ne mora poznavati metodološku pozadinu da bi bio zaštićen od primjene procjene izvan njezine domene — što je, u konačnici, i razlika između objavljene jednadžbe i primjenjivog inženjerskog alata.

6.4. Ograničenja istraživanja

Ograničenja istraživanja iskazuju se otvoreno i, gdje god je to moguće, kvantificirano — ne kao formalna ograda, nego zato što su granice valjanosti sastavni dio svakoga od iznesenih rezultata. Procjena bez poznate domene valjanosti nije manje pouzdana procjena nego procjena nepoznate pouzdanosti, što je za investicijsku primjenu neprihvatljiva kategorija (pogl. 5.2.1). Ograničenja se mogu razvrstati u četiri skupine: ona koja proizlaze iz podrijetla podataka, ona koja postavlja šum mjerila, ona koja definiraju granicu generalizacije te ona koja se tiču pojedinačnih sastavnica isporučenog postupka.

Prvo i temeljno ograničenje jest podrijetlo trening podataka. Mreže u bazi pretežno su mreže velikih gubitaka — medijan gubitaka vode iznosi približno 68 % ulaza u sustav — zbog čega se predikcije za dobro održavane sustave s gubicima ispod približno 15 % oslanjaju na tanko zastupljen dio domene i valja ih čitati kvalitativno, kao „eksponent je visok, približno 1,3 do 1,5”, a ne kao preciznu vrijednost (pogl. 5.2.2). To ograničenje nije nedostatak provedbe nego svojstvo svjetske empirijske građe. Terenski testovi tlačnih koraka provode se ondje gdje su gubici problem, stoga uredne mreže u svakoj bazi terenskih određivanja ostaju podzastupljene — no za primjenu je bitno da upravo u tim zonama dvorazinska shema procjenu preusmjerava na graničnu krivulju materijala s konzervativnim izračunom ušteda (pogl. 5.2.3), čime se tanki dio domene ne prikriva statističkom procjenom koja ondje nema pokriće. S podrijetlom podataka povezana je i struktura baze po državama. Tri države baze, naime, tri su hidraulička režima (pogl. 5.3), te baza ne pokriva kontinuum režima nego tri njegove točke s prazninama među njima — okolnost koja ograničava fino razlučivanje unutar slabo pokrivenih međupodručja i koja se popunjava tek akumulacijom mjerenja iz sustava umjerenih gubitaka.

Drugo ograničenje postavlja šum mjerila. Znatan dio varijance izmjerenih vrijednosti eksponenta u bazi čini mjerni šum terenskih testova — pogreške procjene legitimne noćne potrošnje, premali tlačni koraci, propusne granice zona — koji nijedna ulazna varijabla ne može objasniti i koji postavlja gornju granicu dostižnom koeficijentu determinacije neovisno o kvaliteti modela. Otuda R^2 od 0,201 na kvalitetno filtriranom podskupu uz MAE od 0,230 (pogl. 5.2.2). Posljedice su dvije. Prva je metodološka — kao primarna mjera uspjeha usvojena je apsolutna pogreška u jedinicama eksponenta, a ne koeficijent determinacije, jer investicijska odluka treba apsolutnu točnost, a determinaciju u ovakvoj građi ograničava mjerilo, ne model (pogl. 4.3.6). Druga je epistemička i važnija. Model je kalibrirana apriorna procjena — najbolja dostupna procjena prije mjerenja — a ne zamjena za kvalitetan terenski test ondje gdje je on priuštiv, protokolarno ispravan i proveden na zoni s dostatnim signalom. Gornja granica šuma pritom se ne uklanja ni većim uzorkom ni složenijim algoritmom, nego jedino boljim mjerenjima — zbog čega je put prema točnijoj sljedećoj generaciji modela definiran kroz akumulaciju protokolarno ispravnih testova (pogl. 7.2), a ne kroz daljnju algoritamsku razradu postojeće građe. S tim je povezana i granica same validacijske statistike. Kvalitetno filtrirani podskup broji 100 zapisa, a najstroži nepristrani podskup — signal uz korak u pojasu 15 do 35 % — svega 32, zbog čega su mjere na užim podskupovima procijenjene s ograničenom statističkom preciznošću, što je i razlog zbog kojega je model strogo filtriranog podskupa (23 zapisa), premda na nepristranom mjerilu bolji od usvojenoga (MAE 0,272 naspram 0,296),

odgođen do akumulacije dostatnog broja takvih mjerenja umjesto da bude usvojen na 23 trening zapisa (pogl. 5.1).

Treće ograničenje jest granica generalizacije, utvrđena namjernim negativnim eksperimentima u pogl. 5.3. Validacija izostavljanjem po jedne države pokazala je da se model ne ekstrapolira na potpuno nepokriven režim gubitaka. Izvandržavna pogreška raste na MAE 0,47 do 0,70 naspram 0,230 unutar domene, a s izostavljenim Ekvadorom prilagođeni nagib mijenja predznak, stoga bi model propusnim zonama sustavno pripisivao visok eksponent — s prosječnom pristranošću do +0,66 — i time upravljanje tlakom preporučivao upravo ondje gdje mu FAVAD mehanika daje najmanji učinak. Klusterski eksperiment proveden bez uporabe državnih oznaka pokazao je da je ta granica hidraulička, a ne geografska: pokrivenost domene u prostoru intenziteta gubitaka, ne popis država. Iz toga slijede i doseg i zaključak. Model nije univerzalni zakon nego kalibrirani odnos s definiranom domenom, njegova se primjena u novom kontekstu provodi uz provjeru slaganja i lokalnu rekalkulaciju dvaju koeficijenata, a kvantificirano jamstvo da je za sidrenje dovoljan malen broj kvalitetno filtriranih lokalnih zapisa (pogl. 5.3) pretvara ograničenje iz zabrane u uputu. Ograničenje, međutim, ostaje stvarno. Za režime koje baza ne pokriva — primjerice sustave s isprekidanom opskrbom, kakvi su u literaturi zabilježeni kao zasebna kategorija s vlastitim mehanizmima (Leinaes i sur., 2024) — model bez lokalnog sidrenja nema valjani zaključak.

Četvrtu skupinu čine ograničenja pojedinačnih sastavnica isporučenog postupka, redom kako su sastavnice uvedene. Procjene druge razine — teorijsko očitavanje granične krivulje materijala za zone ispod praga signala — po konstrukciji su nevalidabilne. Za takve zone ne postoji pouzdano terensko mjerilo naspram kojega bi se procjena provjerila, jer bi i sam test mjerio šum; shema to priopćuje širim intervalom, konzervativnim izračunom ušteda i izričitom oznakom, ali oznaka ne uklanja činjenicu da je riječ o teoriji, a ne o validiranoj statistici (pogl. 5.2.3). Sama granična krivulja materijala interpolira kroz četiri sidrišta izvedena iz teorijskih vrijednosti i kontrolirane dijagnoze na ograničenom podskupu zona, te je njezin središnji dio — mreže miješanog sastava cijevnog materijala — slabije empirijski poduprt od krajeva; formalizacija uvjetne uloge materijala interakcijskim modelima ostaje zadaća za građu koja će sadržavati dovoljno zona miješanih materijala s niskim gubicima, dostatnim tlakom i protokolarno ispravnim testovima (pogl. 7.2). Analiza teorijskog pojasa od $\pm 16\%$ oko krivulje materijala dokumentirana je kao unutarinja konzistentnost, s induciranom korelacijom $r = 0,96$ kao dokazom cirkularnosti selekcije prema teoriji (pogl. 4.2.3) — ona kontrolira kvalitetu podataka, ali ne predstavlja neovisnu prediktivnu moć teorije materijala i ne smije se tako

navoditi. Protokolarni pojas 15 do 35 % statistički je identificiran na razini značajnosti $p = 0,035$ na podskupu ograničene veličine. Nalaz je konzistentan s neovisnim teorijskim predviđanjem (pogl. 6.2), ali bi njegove granice — osobito gornju — trebalo doraditi na većoj građi protokolarno dokumentiranih testova. Interval predviđanja konstantne je širine preko cijele domene prve razine, jer raspoloživa veličina uzorka ne dopušta obranjivu procjenu uvjetnih kvantila po gustoći gubitaka; nesigurnost je zbog toga u dijelovima domene vjerojatno iskazana šire, a u dijelovima uže nego što stvarno jest, pri čemu nominalna pokrivenost od 80 % vrijedi u prosjeku (pogl. 5.2.2). Konačno, prostor kandidatskih parametara, premda je obuhvatio cjelokupnu građu dostupnu na razini mjerne zone, nije mogao uključiti veličine za koje je literatura pokazala da na istjecanje utječu, ali koje operateri na zonskoj razini rutinski ne evidentiraju — svojstva okolnog tla (Latifi i sur., 2018), geometriju i starosnu strukturu pukotina, raspon nadmorskih visina unutar zone (Schwaller i van Zyl, 2015) — stoga se optimalnost utvrđenoga minimalnog skupa parametara odnosi na dostupnu, a ne na zamislivu građu.

Domenu isporučenog postupka omeđuje i razina agregacije na kojoj je definiran — model procjenjuje eksponent mjerne zone kao cjeline, ne pojedinačnih cijevi ni pojedinačnih curenja. Za odluke kojima je namijenjen — rangiranje zona za upravljanje tlakom — to je ispravna razina, ali iz nje slijede dvije granice primjene koje valja izreći. Prvo, zonska procjena ne prenosi se na magistralne cjevovode, koji u zonskim analizama u pravilu i ne sudjeluju, a za koje je razvijena zasebna terenska metodologija karakterizacije izoliranih dionica (Niebuhr i sur., 2019); baza ovog istraživanja magistralne vodove ne obuhvaća, zbog čega o njihovim eksponentima model ne govori ništa. Drugo, unutar zone model ne razlučuje prostorni raspored curenja ni njihove tipove — on procjenjuje agregatni odziv mješavine, ne njezine sastojke — te za zadaće lokalizacije i dijagnostike pojedinačnih curenja ostaju mjerodavne metode iz pogl. 3.3.1, prema kojima se ovaj model odnosi komplementarno, ne konkurentski.

Uz navedene skupine, tri ograničenja zaslužuju zaseban iskaz jer se tiču samog načina na koji model vidi zonu. Prvo, model razine 1 za materijal je slijep po konstrukciji. Dvije zone s jednakom gustoćom gubitaka dobivaju jednaku procjenu eksponenta neovisno o materijalnom sastavu, jer je materijal iz modela isključen na temelju dokaza — njegov je koeficijent u svim verzijama bio zanemariv do pogrešno predznačen, a dijagnoza je pokazala da djeluje kao uvjetna gornja granica, ne kao aditivni član (pogl. 5.4.1). Ta je sljepoća, dakle, evidencijski opravdana na raspoloživoj građi, ali ostaje ograničenje tamo gdje bi pouzdan katastar materijala mogao nositi dodatnu informaciju. Formalizacija uvjetne uloge materijala interakcijskim

oblicima, moguća tek na građi s dovoljno zona miješanih materijala u niskogubitnom režimu, mogla bi dio te informacije vratiti u model — princip razrađen u pogl. 7.2. Drugo, model je statičan u vremenu — trenirani zapisi snimke su stanja zona u trenutku kampanje, stoga i procjena vrijedi za to stanje. Eksponent zone, međutim, nije konstanta — mijenja se sa sanacijama, starenjem mreže i promjenama tlačnog režima, a dokumentirana je i povratna sprega kojom popravci curenja podižu radni tlak i šire postojeće pukotine u plastičnim cijevima (pogl. 3.1) — zbog čega procjenu nakon većih zahvata u zoni treba obnoviti iz svježije kampanje, što alati čine trivijalnim, ali automatski ne nadziru. Treće, model pretpostavlja točnost vlastitih ulaza, a najosjetljiviji među njima — noćni protok gubitaka L_0 — i sam je procjena, ovisna o pretpostavljenoj legitimnoj noćnoj potrošnji čija pogrešna vrijednost može gubitak iskriviti i višestruko (pogl. 3.1). Interval predviđanja modela kalibriran je na rezidualima naspram kvalitetno filtriranih mjerenja, te uobičajenu razinu takvih pogrešaka implicitno sadrži, ali grube pogreške ulaza — pogrešnu duljinu mreže iz zastarjelog katastra, nereprezentativnu točku mjerenja tlaka, promašenu procjenu noćne potrošnje u zoni s netipičnim noćnim korisnicima — ne može ni otkriti ni apsorbirati. Kvaliteta procjene ostaje omeđena kvalitetom kampanje, što je granica zajednička svim analitičkim postupcima nad kampanjskim podacima, ali je transparentno iskazati da je model ne uklanja.

Popis ograničenja završava onim koje je istodobno i nalaz — istraživanje je pokazalo da značajan dio onoga što se u literaturi vodi kao „vrijednost eksponenta zone” nosi otisak protokola kojim je izmjerena (pogl. 5.4.3), stoga su i sva ovdje iskazana ograničenja formulirana naspram mjerila koje ni samo nije savršeno. Ta okolnost ne relativizira rezultate — upravo suprotno, ona je razlog zbog kojega su svi zaključci vezani uz kvalitetno filtrirane podatke, uz eksplicitne kriterije filtriranja i uz mjere kojih se pouzdanost može braniti — ali određuje ispravan način čitanja svake brojke u ovom radu: kao procjene s dokumentiranom domenom, dokumentiranim mjerilom i dokumentiranim postupkom, otvorene za pooštavanje kako bude rasla građa protokolarno ispravnih mjerenja. Granice iznesene u ovom potpoglavlju stoga nisu popis nedostataka nego specifikacija uvjeta pod kojima rezultati vrijede — i, jednako važno, program rada kojim se te granice sustavno pomiču, razrađen u smjernicama u pogl. 7.2. Svako od navedenih ograničenja ima ondje svoj protulijek, od akumulacije protokolarno ispravnih mjerenja preko ciljanog popunjavanja slabo pokrivenih režima do formalizacije uloge materijala, zbog čega rasprava o ograničenjima prirodno prelazi u raspravu o smjerovima daljnjeg istraživanja.

7. Zaključak

7.1. Glavni nalazi i doprinos

Disertacija je pošla od praktičnog problema s jasno mjerljivom cijenom. Eksponent curenja N_1 , veličina koja odlučuje o isplativosti upravljanja tlakom u svakoj mjernoj zoni, dosad se mogao pouzdano odrediti samo skupim noćnim terenskim testom tlačnih koraka uz ugrađen ventil za redukciju tlaka — stoga su investicijske odluke preko portfelja zona u praksi počivale na paušalnim literaturnim vrijednostima, s dokumentiranim promašajima (pogl. 3.2, pogl. 6.2). Postavljeni cilj bio je eksponent učiniti analitički odredivom veličinom: iz podataka koje operater već posjeduje nakon rutinske mjerne kampanje, postupcima strojnog učenja, s poznatom i neovisno provjerenom točnošću. Taj je cilj ostvaren, a putanja do njega — od objedinjavanja svjetske terenske građe, preko strogog validacijskog okvira, do interpretabilnog modela s kvantificiranom nesigurnošću i primjenskih alata — dala je uz glavni rezultat i niz samostalnih nalaza čija vrijednost nadilazi konkretni model. Ovo potpoglavlje sažima te nalaze redoslijedom kojim su izgrađeni; potpuna dokazna građa iznesena je u poglavljima 4 i 5, provjera hipoteza u pogl. 6.1, a odnos prema dosadašnjim istraživanjima u pogl. 6.2.

Prvi je rezultat sama istraživačka baza. Prikupljeno je i u jedinstvenu relacijsku shemu objedinjeno 217 zapisa terenskih testova tlačnih koraka iz 172 mjerne zone triju država na trima kontinentima — Ekvadora, Južnoafričke Republike i Kanade — s kontrolom tipova i jedinica, standardiziranim pokazateljima učinka i eksplicitnim oznakama kvalitete svakoga zapisa (pogl. 4.2). Kritička kontrola kvalitete pokazala se jednako važnom kao samo prikupljanje — 13 % terenskih testova daje fizikalno nemoguće vrijednosti eksponenta, a filtri vjerodostojnosti i signala sveli su građu na 188 upotrebljivih zapisa, od kojih 100 kvalitetno filtriranih čini mjerilo kojemu se smije vjerovati (pogl. 4.2.3). Baza je pritom konstruirana kao ponovljiv znanstveni instrument, a ne statičan skup. Cjelokupni postupak od sirovih zapisa do svake tablice rezultata kodificiran je u reproducibilnom programskom slijedu obrade, otvorenom za proširivanje novim mjerenjima (pogl. 6.3) — čime je uklonjena prepreka koju je pregled literature identificirao kao sistemsku: da se zonske vrijednosti eksponenta objavljuju bez dokumentiranih tlakova, protoka i procjena noćne potrošnje, te nisu ni provjerljive ni usporedive (pogl. 3.1).

Drugi skup nalaza odgovara na pitanje koje veličine nose informaciju o eksponentu i koliko ih je nužno. Triangulirana analiza važnosti parametara — filtarskim, ugrađenim i omotačkim postupkom, uz permutacijsku važnost izvan preklopa — jednoznačno je identificirala intenzitet

gubitaka kao dominantnu os informacije, razinu tlaka kao djelatnu kroz normalizaciju, a materijal cijevi kao uvjetnu gornju granicu umjesto aditivnog člana (pogl. 5.4). Formalna optimizacija broja parametara reducirala je ulazni prostor s trinaest kandidatskih parametara na jednu izvedenu značajku — specifičnu gustoću stvarnih gubitaka normaliziranu tlakom LD, koja objedinjuje tri izvorna podatka: noćni protok stvarnih gubitaka L_0 , duljinu glavnih cjevovoda L_m i prosječni zonski tlak P_0 — bez statistički značajnoga gubitka točnosti. Jednako su vrijedna dva negativna nalaza te optimizacije. Statički podaci katastra imovine bez informacije o gubicima ne nadmašuju naivne referentne modele, zbog čega je mjerenje protoka na ulazu u zonu s analizom minimalnoga noćnog protoka minimalni podatkovni zahtjev analitičkog određivanja; a nelinearni ansamblji sa svim raspoloživim parametrima ne nadmašuju jednoulazni linearni oblik, stoga je parsimonija konačnog modela statistička nužnost pri raspoloživoj veličini uzorka, a ne estetski izbor (pogl. 5.1). Skup potrebnih parametara time nije samo utvrđen i minimiziran nego i hijerarhijski strukturiran, s označenom donjom granicom ispod koje analitička procjena više nije moguća.

Središnji rezultat istraživanja jest konačni model v4.0 — jedn. (5.1): ponderirana linearna regresija s jednim ulazom, $N1 = 1,3375 - 0,2187 \cdot \ln(1 + 100 \cdot LD)$, ograničena na raspon $[0,50, 1,50]$, isporučena nedjeljivo s pragom primjene i intervalom predviđanja. Pod unakrsnom validacijom grupiranom po mjernim zonama — u kojoj svako predviđanje potječe od modela koji zonu nikad nije vidio — model na kvalitetno filtriranim podacima postiže MAE = 0,230, uz 64 % predikcija unutar $\pm 0,25$, 90 % unutar $\pm 0,50$ i sustavnu pristranost od $-0,035$, praktički nulu; na ekvadorskom podskupu, najčišćem dostupnom mjerilu, MAE iznosi 0,198 uz 92 % predikcija unutar $\pm 0,50$ (pogl. 5.2.2). Pod identičnim protokolom najbolja naivna referenca postiže MAE 0,298, a industrijsko pravilo $N1 = 1,0$ MAE 0,311 — model tipičnu pogrešku smanjuje za približno 23 % naspram najbolje reference, uz gotovo nultu pristranost koja jamči da se procjene ušteda preko portfelja zona ne napuhavaju ni ne potiskuju sustavno. Svaka procjena nosi 80-postotni interval predviđanja $[N1 - 0,32, N1 + 0,39]$, izveden iz empirijskih kvantila reziduala izvan preklopa, te nesigurnost u investicijsku odluku ulazi eksplicitno. Za primjenu je jednako važna i forma rezultata: zatvorena formula s dva koeficijenta, izračunljiva bez ikakve programske ovisnosti, s ulazima koje daje svaka standardna mjerna kampanja — bez ugradnje redukcijskog ventila (pogl. 5.2.1).

Model je operacionaliziran dvorazinskom shemom procjene, koja osigurava da nijedna valjana zona ne ostane bez odgovora i nijedan odgovor bez epistemičke oznake (pogl. 5.2.3). Zone s dostatnim signalom gubitaka ($L_0 \geq 2$ l/s i $LD \geq 0,02$) dobivaju validiranu statističku procjenu s

intervalom; zone ispod praga — u kojima eksponent nije mjerljiva veličina ni za model ni za teren — dobivaju jasno označenu teorijsku procjenu iz krivulje gornje granice eksponenta prema materijalu cijevi, sa širim intervalom i konzervativnim izračunom ušteda na donjoj granici; potpuna uskrata izračuna rezervirana je isključivo za fizikalno neispravne ulaze. Granica među razinama nije konvencija nego empirijski nalaz do kojega su neovisno konvergirala dva puta. Ispod praga signala stopa fizikalno nevjerodostojnih terenskih rezultata naglo raste, a isti prag najviše od svih ispitanih filtara poboljšava točnost modela (pogl. 5.2.3). Shema je, zajedno sa savjetnikom za planiranje testova, implementirana u dvama primjenskim alatima — proračunskom kalkulatoru i programskom modulu bez vanjskih ovisnosti — te dopunjena istraživačkim programskim slijedom obrade koji reproducira cjelokupnu analizu; sva tri alata s tablicama revizijskog traga čine priloge disertacije (pogl. 6.3).

Fizikalna interpretacija rezultata dala je nalaz koji je i sam znanstveni doprinos. Materijal cijevi, teorijski glavni pokretač eksponenta, na razini mjerne zone ne djeluje kao aditivan parametar nego kao uvjetna gornja granica — ona koju zona danog materijalnog sastava može doseći kada njezinim istjecanjem dominira pozadinska komponenta, dok stvarni položaj ispod te granice određuju omjer puknuća i pozadinskih gubitaka, razina radnog tlaka i protokol testa (pogl. 5.4.1). Kontrolirana dijagnoza na 92 zone sa 100 % plastičnih cijevi — prirodni eksperiment s konstantnim materijalom — kvantificirala je sva tri potiskujuća čimbenika i pokazala da država podrijetla djeluje tek kao njihova zbirna zamjenska varijabla; kombinirano pravilo reproducira teoriju u odgovarajućim uvjetima. Južnoafričke plastične zone s niskim omjerom puknuća i umjerenim koracima imaju medijan eksponenta 1,61, one s velikim gubicima i dubokim koracima 0,79 (pogl. 5.4.2). Time je razriješeno prividno proturječje između FAVAD teorije i zanemarivoga, štoviše pogrešno predznačenog koeficijenta materijala u regresiji, a nalaz konvergira — posve drugim putem, terenskom dijagnozom umjesto simulacije — s neovisnom linijom stohastičkog modeliranja, koja je istu uvjetnu strukturu ovisnosti izvela iz distribucija tipova otvora (Schwaller i van Zyl, 2015; Beygi i van Zyl, 2024). Dvije neovisne metode koje se sastaju u istoj strukturi čine argument jači nego svaka zasebno — i objašnjavaju zašto jednostavna pravila pridruživanja eksponenta materijalu na terenu sustavno zakazuju.

Uz model, istraživanje je dalo i samostalan metodološki doprinos terenskoj praksi: protokolarni pojas relativnoga tlačnog koraka od 15 do 35 % za pouzdano i nepristrano određivanje eksponenta (pogl. 5.4.3). Donja granica formalizira zahtjev da promjena tlaka nadmaši fiksne neizvjesnosti noćnog mjerenja; gornja je granica novost — statistička identifikacija ($p = 0,035$) sustavnoga podejnjivanja eksponenta pri koracima dubljima od približno 35 %, empirijska

potvrda i operacionalizacija pojave koju je stohastičko modeliranje predvidjelo simulacijom. Posljedica za praksu je izravna. Test izvan pojasa nije samo manje precizan nego usmjereno pristran, zbog čega se njegovim rezultatom ne smije ni kalibrirati model ni verificirati teorija — a dio raspršenosti objavljenih terenskih zbirki eksponenta kroz tu se leću čita kao artefakt protokola, razlučivanje koje prije ovog istraživanja nije imalo kvantitativan kriterij. Pojas je operacionaliziran u shemi ponderiranja treninga, u modelu strogo filtriranog podskupa, treniranom isključivo na protokolarno ispravnim zapisima i u savjetniku za planiranje testova, koji za svaku zonu unaprijed presuđuje hoće li test imati dokaznu vrijednost.

Granice valjanosti modela utvrđene su namjernim negativnim eksperimentima i pripadaju rezultatima jednako kao i točnost (pogl. 5.3). Validacija izostavljanjem po jedne države pokazala je da se model ne ekstrapolira na potpuno nepokriven režim gubitaka. Izvandržavna pogreška raste na MAE 0,47 do 0,70, a s izostavljenim Ekvadorom prilagođeni nagib mijenja predznak, stoga bi model propusnim zonama sustavno pripisivao visok eksponent — s prosječnom pristranošću do +0,66 — i upravljanje tlakom preporučivao upravo ondje gdje mu FAVAD mehanika daje najmanji učinak. Klasterski eksperiment proveden bez uporabe državnih oznaka pokazao je da je ta granica hidraulička, a ne geografska — „države” u bazi jesu hidraulički režimi, a pokrivenost domene mjeri se u prostoru intenziteta gubitaka, ne popisom zemalja. Isti eksperiment dao je i konstruktivan korolar. Već su dva zapisa ciljnog režima u treningu bila dovoljna da spriječe kvalitativni slom nagiba, zbog čega se model u novi kontekst prenosi kao kalibrirana apriorna procjena s definiranim postupkom provjere i lokalnog sidrenja — regresijom dvaju koeficijenata na malenom broju kvalitetno filtriranih lokalnih zapisa. Epistemički status modela time je iskazan precizno: najbolja dostupna procjena prije mjerenja, s dokumentiranom domenom u kojoj vrijedi bez ograda i eksplicitnim pravilom izvan nje — rekalibrirati ili ne primjenjivati.

Naspram tako iskazanih rezultata provjerene su tri hipoteze istraživanja, formalno u pogl. 6.1 — sve su tri potvrđene, druga uz kvantificirane granice. Potvrđeno je da se parametri potrebni za analitičko određivanje eksponenta mogu definirati i optimizirati — identificirani su, fizikalno protumačeni, hijerarhijski strukturirani i svedeni na jedan uz dokumentirane razloge isključenja svakoga kandidata. Potvrđeno je da se eksponent može analitički odrediti s preciznošću dostatnom za odluku — mjerenom naspram potreba investicijskog rangiranja i naspram pouzdanosti samoga terenskog mjerenja — čime se potreba za terenskim ispitivanjem u planerskoj primjeni uklanja, a u investicijski osjetljivim slučajevima racionalizira predkvalifikacijskim pragom i protokolarnim pojasom. I potvrđeno je da se takvi modeli mogu

izgraditi postupcima strojnog učenja. Konačni je oblik odabran natjecanjem šest obitelji algoritama pod strogom validacijom, njegovi ulazi trianguliranom selekcijom, njegova nesigurnost kvantilima reziduala izvan preklopa — a dokumentirani slijed verzija čini obitelj validiranih modela za različite pretpostavke o raspoloživosti podataka. Nijedna od potvrda ne počiva na podacima koje je model vidio tijekom učenja, a svaka uključuje i svoje granice — što je, kako je obrazloženo u pogl. 6.1, jedina vrsta potvrde na kojoj se smiju temeljiti investicijske odluke i daljnja istraživanja.

Potvrde hipoteza ujedno znače da su ispunjeni ciljevi istraživanja u obliku u kojem ih je definirao odobreni prijedlog teme, i to odobrenom metodom u svih pet njezinih koraka. Analiza literature provedena je u poglavljima 2 i 3, prikupljanje i kritička selekcija terenskih podataka u pogl. 4.2, statistička analiza s optimizacijom skupa parametara u pogl. 4.3 i 5.4, izgradnja i ispitivanje matematičkih modela u pogl. 5.1 i 5.2, a zaključci s preporukama u ovom poglavlju. Podudarnost koraka metode i dokazne građe pritom nije formalna nego funkcionalna — svaka je hipoteza potvrđena građom iz upravo onoga koraka metode koji je za nju predviđen (pogl. 6.1) — stoga disertacija zatvara puni luk od odobrenoga istraživačkog plana do njegova ispunjenja, bez odstupanja u ijednom koraku mjerodavnom za hipoteze. Opći ciljevi — prikupljanje i objedinjavanje svjetske terenske građe, njezina kritička ocjena, utvrđivanje parametara potrebnih za analitičko određivanje eksponenta i njihova optimizacija — ispunjeni su rezultatima sažetima u prethodnim odlomcima; specifični cilj, razvoj modela za određivanje eksponenta bez terenskog ispitivanja, ispunjen je konačnim modelom s dvorazinskom shemom procjene i definiranom domenom valjanosti.

U sažetku, znanstveni doprinos disertacije trostruk je, kako je detaljno pozicionirano u pogl. 6.2. Prvo, zatvorena je istraživačka praznina utvrđena pregledom od 94 izvora. Razvijen je prvi poznati validirani model koji eksponent curenja N1 predviđa iz rutinski dostupnih značajki vodoopskrbnog sustava, čime je dosad jednosmjerni dodir strojnog učenja i FAVAD okvira pretvoren u potpunu spregu — teorija modelu daje varijable i interpretaciju, model teoriji vraća empirijsku provjeru njezinih mehanizama na međunarodnoj terenskoj građi. Drugo, isporučena su dva samostalna doprinosa neovisna o modelu: protokolarni pojas 15–35 % kao kriterij kvalitete terenskog određivanja s obiju strana i kontrolirana dijagnoza koja je raščlanila uzroke sustavnog promašaja teorijskih vrijednosti u plastičnim mrežama. Treće, na malom terenskom skupu dosljedno je proveden metodološki standard čiji su izostanak sustavni pregledi područja dokumentirali kao kroničnu slabost — validacija koja poštuje strukturu podataka, naivne reference, iskazivanje pristranosti i nesigurnosti, negativni rezultati s punim kvantitativnim

iskazom i potpuna reproducibilnost — zbog čega disertacija području ne dodaje samo novu zadaću nego i evidencijsku točku za njegove metodološke zakonitosti, u cijelosti terensku. Praktični pandan tih doprinosa jest promjena ekonomike informacije o eksponentu. Iz skupe pojedinačne veličine — jedan test, jedna zona, fizička intervencija — eksponent postaje besplatan nusproizvod svake već provedene kampanje, dostupan preko cijelog portfelja zona s intervalom i epistemičkom oznakom, čime FAVAD okvir upravljanja tlakom prvi put dobiva ulaz svojstven pojedinoj zoni bez terenskog troška po zoni.

7.2. Preporuke i smjernice za daljnja istraživanja

Preporuke koje slijede iz istraživanja dijele se na one upućene praksi — operaterima vodoopskrbnih sustava i provoditeljima mjernih kampanja — i na smjernice daljnjih istraživanja. Granica među njima namjerno je propusna — središnja preporuka praksi, akumulacija protokolarno ispravnih mjerenja, ujedno je i preduvjet najvažnijega istraživačkog smjera, stoga preporuke čine jedinstven program u kojem svaka primjena modela proizvodi građu za njegovu sljedeću generaciju.

Praksi se preporučuje, prvo, da analitičku procjenu eksponenta usvoji kao standardni korak obrade svake mjerne kampanje jer su ulazi modela već sadržani u kampanjskim mjerenjima, te skupna obrada arhive kampanja daje procjene s intervalima za cijeli portfelj zona bez ijednog dodatnog mjernog zahtjeva (pogl. 6.3). Rangiranje kandidata za upravljanje tlakom pritom treba provoditi konzervativno — uz uštede izračunane na donjoj granici intervala predviđanja — a niske procjene čitati kao jednako vrijednu uputu da u zoni prednost imaju aktivno traženje i sanacija kvarova. Model raspodjeljuje zone među dvjema temeljnim strategijama smanjenja gubitaka, ne samo među kandidatima za ventile. Drugo, svaki budući test tlačnih koraka valja planirati unutar protokolarnog pojasa — provjera signala, izvedivosti koraka od najmanje 15 %, ograničenje dubine na približno 35 % — i dokumentirati uz izmjereni eksponent i uvjete mjerenja: signal gubitaka, relativnu dubinu koraka i procjenu legitimne noćne potrošnje, bez kojih zapis za svaku buduću upotrebu ostaje neocjenjiv (pogl. 5.4.3). Treće, postojeće arhive terenskih testova valja trijažirati istim kriterijima — razdvojiti zapise s dokaznom vrijednošću od indikativnih — umjesto da se prosuđuju zbirno (pogl. 5.2.2). Četvrto, razdoblje puštanja svakoga novougrađenog redukcijskog ventila u pogon valja iskoristiti kao terenski test bez dodatnog troška, a protokolom kontinuirane rekalkibracije nove kvalitetne zapise vraćati u bazu i periodički obnavljati dva koeficijenta modela — čime primjena i mjerenje ulaze u trajnu povratnu petlju s prirodnim godišnjim ritmom planiranja investicija (pogl. 6.3). Model

usmjerava gdje mjeriti, mjerenja pooštavaju model. Peto, budući da kvaliteta procjene ostaje omeđena kvalitetom kampanje (pogl. 6.4), ulaganja u mjernu praksu valja usmjeriti prema najosjetljivijem ulazu — noćnom protoku gubitaka L_0 , čija pouzdanost ovisi o procjeni legitimne noćne potrošnje. Analiza značajki pokazala je da informacijski sadržaj s brojem parametara stagnira gotovo odmah, zbog čega ulaganje u kvalitetu mjerenja jednoga parametra — dulje kampanje, pouzdanija procjena noćne potrošnje, reprezentativna točka mjerenja tlaka, ažuran katastar duljina — obećava više od prikupljanja dodatnih parametara (pogl. 5.4); to je izravna, kvantitativno utemeljena uputa za raspodjelu proračuna mjernih kampanja. Grube pogreške ulaza model ne može ni otkriti ni apsorbirati (pogl. 6.4), stoga je disciplina ulaza — jedinice, konvencije izračuna, svježina katastra — dio same primjene. Primjenski je alati automatiziraju do granice do koje je to konstrukcijski moguće, a ostatak ostaje odgovornost mjerne prakse.

Za hrvatski kontekst, u kojem je istraživanje i motivirano, put uvođenja konkretan je i kratak. Postojeće kampanje mjernih zona — kakve su dokumentirane na 23 zone s rasponom vrijednosti ILI pokazatelja od 0,0 do 44,2 (Dundović, 2017) — već sadrže sve ulaze modela, što znači da je skupna obrada domaćih arhiva izvediva odmah, bez novih mjerenja. Prva domaća mjerenja provedena protokolom iz pogl. 5.4.3, počevši od zone verificirane u vlastitom prethodnom istraživanju (Dundović i Tadić, 2022), poslužila bi istodobno dvjema svrhama: provjeri prijenosa modela u domaći hidraulički kontekst i lokalnom sidrenju koeficijenata — postupku za koji je pokazano da ga stabilizira već malen broj kvalitetno filtriranih zapisa (pogl. 5.3). Time bi hrvatski sustavi, s gubicima blizu polovice ulaznog volumena, dobili podlogu svojstvenu pojedinoj zoni za prioritizaciju upravljanja tlakom upravo ondje gdje je poluga tlaka nad gubicima najveća — a domaća praksa obrazac puta od terenskih mjerenja do transparentno validiranog modela, prenosiv na srodne probleme (pogl. 6.2).

Prvi i najvažniji istraživački smjer jest akumulacija protokolarno ispravnih mjerenja i prijelaz na sljedeću generaciju modela. Istraživanje je pokazalo da model treniran isključivo na protokolarno ispravnim zapisima — dostatan signal i korak u pojasu 15–35 % — već pri svega 23 raspoloživa trening zapisa nadmašuje usvojeni model na nepristranom mjerilu (MAE 0,272 naspram 0,296), ali je njegovo usvajanje odgođeno upravo zato što 23 zapisa nisu dostatna statistička osnova (pogl. 4.3.5, pogl. 5.4.3). Gornju granicu točnosti sadašnje generacije ne postavlja algoritam nego šum mjerila, te se ne pomiče ni većim uzorkom postojeće kvalitete ni složenijim modelom — nego jedino boljim mjerenjima (pogl. 6.4). Svaki test proveden po protokolu, uključujući testove koje protokol kontinuirane rekalkibracije pribavlja besplatno pri

ugradnji ventila, približava trenutak u kojem će model strogo filtriranog podskupa biti obranjivo prilagođen; ista će građa omogućiti i doradu granica samog pojasa — osobito gornje, identificirane na podskupu ograničene veličine i statistički potvrđene unutar plastičnih mreža, dok za pretežno krute mreže zadržava status konzervativne mjere opreza (pogl. 5.4.3) — te, kad zapisa bude dovoljno, procjenu uvjetnih kvantila intervala predviđanja po gustoći gubitaka umjesto sadašnje konstantne širine (pogl. 6.4).

Drugi smjer proizlazi iz statusa koji je granična krivulja materijala stekla u ovom istraživanju. Njezina sidrišta — 0 % plastike → 0,5; 50 % → 0,8; 75 % → 1,5; 100 % → 2,0 — fiksirana su prije prikupljanja budućih mjerenja i time imaju status unaprijed registrirane predikcije (pogl. 5.4.1). Postojeća građa, opterećena cirkularnošću selekcije prema samoj krivulji, može posvjedočiti samo njezinu unutarnju konzistentnost; svaki budući test proveden po protokolu, na zoni s pouzdanim katastrom materijala, bit će neovisna provjera kakvu sadašnja baza ne može pružiti. Akumulacijom takvih testova analiza pojasa prerasla bi iz dijagnostičke leće u provjerljivu hipotezu s poznatim uvjetima valjanosti — a sadašnja stopa prolaznosti od 11 % u postojećim arhivama postala bi mjerilo napretka terenske prakse. Rast te stope značio bi da se testovi provode protokolarno ispravnije, na zonama bliže svojoj gornjoj granici.

Treći je smjer formalizacija uvjetne uloge materijala. Nalaz da materijal postavlja gornju granicu, a intenzitet gubitaka, tlak i protokol određuju položaj ispod nje, u ovom je istraživanju utvrđen kontroliranom dijagnozom, ali ne i formaliziran u prediktivnom obliku — primjerice interakcijskim modelima gornja granica $\times$ intenzitet gubitaka — jer postojećoj bazi nedostaje upravo građa koja bi takvu formalizaciju poduprla: zone miješanih materijala s niskim omjerom puknuća, dostatnim tlakom i protokolarno ispravnim testovima (pogl. 5.4.2, pogl. 6.4). Središnji dio krivulje materijala, između čistih režima, iz istog je razloga empirijski najslabije poduprt. Ciljano prikupljanje mjerenja iz takvih zona omogućilo bi i formalizaciju interakcije i popunjavanje središnjega dijela krivulje — a uspije li, dio informacije o materijalu, iz modela sada isključene na temelju dokaza, mogao bi se vratiti u statističku procjenu i suziti njezin interval.

Četvrti smjer jest popunjavanje slabo pokrivenih režima domene. Trening mreže pretežno su mreže velikih gubitaka — medijan gubitaka vode u bazi iznosi približno 68 % ulaznog volumena — stoga se predikcije za dobro održavane sustave s gubicima ispod približno 15 % oslanjaju na donji rub domene i čitaju kvalitativno (pogl. 5.3); baza k tome pokriva tri točke kontinuuma režima, s prazninama među njima (pogl. 6.4). Akumulacija mjerenja iz sustava umjerenih gubitaka najizravniji je put širenja validirane domene prema zonama koje su za

upravljanje tlakom često najperspektivnije. Zaseban i posve nepokriven režim čine sustavi s isprekidanom opskrbom, u literaturi zabilježeni kao kategorija s vlastitim mehanizmima istjecanja — za njih model bez lokalnog sidrenja nema što reći, zbog čega bi njihova obrada zahtijevala i vlastitu terensku građu i provjeru samog oblika modela (pogl. 6.4). U isti smjer pripada i vremenska dimenzija, koju sadašnja baza — snimke stanja zona u trenutku kampanje — ne zahvaća. Ponovljena mjerenja istih zona kroz vrijeme, prije i nakon sanacija ili promjena tlačnog režima, omogućila bi da se eksponent prati kao dinamična veličina i da se kvantificira brzina njegove promjene sa starenjem i održavanjem mreže.

Peti smjer nadilazi pojedinačne analize: razvoj baze kao trajnoga, otvorenog instrumenta discipline. Vrijednost objedinjene građe raste brže od njezina opsega — svaki novi kvalitetno dokumentiran zapis ne poboljšava samo model nego i svaku buduću sekundarnu analizu — a reproducibilni programski slijed obrade jamči da se svaka nadogradnja provodi istim, provjerljivim postupkom (pogl. 6.2, pogl. 6.3). Preduvjet takvog razvoja jest standard metapodataka koji je ovo istraživanje operacionaliziralo — eksponent bez signala gubitaka, dubine koraka i procjene noćne potrošnje nije upotrebljiv podatak nego brojka nepoznate pouzdanosti. Bude li se buduća terenska građa — vlastita i objavljena — dokumentirala tim standardom, disciplina će prvi put raspolagati rastućom zbirkom međusobno usporedivih mjerenja eksponenta; upravo je nedostatak takve zbirke, utvrđen pregledom literature (pogl. 3.1), bio prva prepreka koju je ovo istraživanje moralo ukloniti.

Zaključno, disertacija je pokazala da eksponent curenja $N1$ — veličina koja je u dosadašnjoj praksi bila ili skupo mjerena ili paušalno pretpostavljana — može biti analitički određena veličina: predvidiva iz rutinskih kampanjskih podataka, s validiranom točnošću, kvantificiranom nesigurnošću i dokumentiranom domenom valjanosti. Time se mijenja način na koji se informacija o osjetljivosti gubitaka na tlak proizvodi i koristi. Umjesto iznimke dostupne rijetkim zonama, ona postaje standardna značajka svake zone u portfelju, a terensko mjerenje — usmjereno predkvalifikacijom, disciplinirano protokolom i iskorišteno rekalkulacijom — prestaje biti rutinski trošak i postaje ciljani instrument razrješavanja identificiranih proturječja. Model, protokol i baza pritom nisu tri odvojena rezultata nego jedan mehanizam sa svojom povratnom petljom — model usmjerava mjerenja, protokol jamči njihovu kvalitetu, baza ih akumulira u sljedeću generaciju modela. U tom je mehanizmu i najtrajniji doprinos rada — jer će konkretne brojke ovoga istraživanja s rastom građe biti nadmašene, i to je predviđeno njegovom konstrukcijom; ali put kojim su dobivene — od kritički kontrolirane terenske građe, preko validacije koja poštuje strukturu podataka, do procjene koja

uz svaku brojku isporučuje i njezinu vrstu, granice i cijenu — ostaje obrazac za analitičko određivanje pogonskih parametara vodoopskrbnih sustava iz podataka koje operateri već posjeduju.

Dodaci

Prilog A — Proračunski kalkulator za procjenu eksponenta N1

Prilog A sadržava opis i upute za upotrebu interaktivnoga proračunskog kalkulatora (N1_kalkulator_HR.xlsx), koji implementira konačni model v4.0 s dvorazinskom shemom procjene. Radna knjiga ima jedan list organiziran u šest blokova: ulazi iz mjerne kampanje (jedine ćelije koje korisnik uređuje; bilančne veličine — godišnji ulaz vode i fakturirana ovlaštena potrošnja — neobvezna su polja koja služe samo informativnom iskazu WL i nisu ulaz modela), izračunate statistike kampanje (WL i LD — korisnik ih nikad ne računa ručno), predkvalifikacija (provjera valjanosti ulaza i dostatnosti signala gubitaka), dvorazinski rezultat (statistička procjena s 80-postotnim intervalom i FAVAD uštedom, odnosno jasno označena teorijska procjena iz krivulje gornje granice eksponenta prema materijalu cijevi), savjetnik za planiranje testa tlačnih koraka (presuda o pouzdanosti planiranog koraka) i tablica za očitavanje predviđenih vrijednosti.

Digitalni artefakt: N1_kalkulator_HR.xlsx (engleska inačica: N1_calculator.xlsx).

Napomena: u konačnoj inačici rada biti će prikazani izvadci iz kalkulatora.

Prilog B — Programski modul predict_n1.py

Prilog B sadržava opis programskog modula predict_n1.py — implementacije konačnog modela v4.0 bez vanjskih ovisnosti (isključivo standardna biblioteka Pythona), prikladne za skupno ocjenjivanje zona ili ugradnju u druge alate. Modul sadrži konstante modela (koeficijenti, granice odsijecanja, kvantili intervala), funkciju granične krivulje materijala za razinu 2, dvorazinski procjenitelj s provjerom ulaza i eksplicitnom epistemičkom oznakom svake procjene te savjetnika za planiranje testa tlačnih koraka; upotrebljiv je i iz naredbenog retka.

Digitalni artefakt: predict_n1.py.

Prilog C — Istraživački programski slijed obrade n1_pipeline.py

Prilog C sadržava opis istraživačkoga programskog slijeda obrade n1_pipeline.py, kojim je osigurana potpuna ponovljivost istraživanja: modul parsira izvornu bazu u europskom CSV formatu, primjenjuje filtar vjerodostojnosti, provodi unakrsnu validaciju grupiranu po mjernim zonama preko svih kandidatskih modela, računa tri mjere važnosti značajki i putanju postupnog

uključivanja značajki te zapisuje svaku tablicu rezultata citiranu u disertaciji. Zahtijeva biblioteke pandas i scikit-learn; za primjenu modela (Prilog B) nije potreban.

Digitalni artefakt: n1_pipeline.py.

Prilog D — Dodatne tablice rezultata i revizijski trag

Prilog D dokumentira podatkovnu osnovu istraživanja u tri dijela.

D.1 — Opisna statistika ulaznih podataka. Tablica D.1 donosi opisnu statistiku (n, medijan, min–maks) svih ulaznih varijabli po državama i ukupno, izračunanu nad očišćenom bazom od 217 zapisa.

D.2 — Potpuni ispis očišćene baze. Tablica D.2 donosi potpuni ispis svih 217 zapisa očišćene baze (anonimizirane oznake zona, država, oznaka koraka, ulazne varijable, izmjereni N1, oznaka vjerodostojnosti i težina pouzdanosti); pri sklapanju se prelama u vodoravnoj orijentaciji.

Tablica D.1. Opisna statistika ulaznih podataka po državama i ukupno

Varijabla	Skupina	n	Medijan	Min–maks
Duljina mreže Lm (km)	Ekvador	95	16,2	0,9–62,1
Duljina mreže Lm (km)	Južnoafrička Republika	104	7,3	0,2–114,5
Duljina mreže Lm (km)	Kanada	18	9,9	4,8–22,8
Duljina mreže Lm (km)	Ukupno	217	9,6	0,2–114,5
Broj priključaka Nc (—)	Ekvador	95	1370	148–9820
Broj priključaka Nc (—)	Južnoafrička Republika	104	371	5–4826
Broj priključaka Nc (—)	Kanada	18	448	1–934
Broj priključaka Nc (—)	Ukupno	217	685	1–9820
Udio fleksibilnih cijevi (%)	Ekvador	95	75	8–100
Udio fleksibilnih cijevi (%)	Južnoafrička Republika	104	100	81–100
Udio fleksibilnih cijevi (%)	Kanada	18	36	2–100
Udio fleksibilnih cijevi (%)	Ukupno	217	98	2–100
Noćni protok gubitaka Lo (l/s)	Ekvador	95	29,60	0,80–209,60
Noćni protok gubitaka Lo (l/s)	Južnoafrička Republika	104	3,90	0,10–67,80
Noćni protok gubitaka Lo (l/s)	Kanada	18	1,90	0,60–7,20
Noćni protok gubitaka Lo (l/s)	Ukupno	217	8,30	0,10–209,60
Prosječni tlak zone P ₀ (m)	Ekvador	95	23,5	10,0–54,0
Prosječni tlak zone P ₀ (m)	Južnoafrička Republika	104	67,4	26,6–122,8
Prosječni tlak zone P ₀ (m)	Kanada	18	55,0	35,7–89,0
Prosječni tlak zone P ₀ (m)	Ukupno	217	49,3	10,0–122,8

Varijabla	Skupina	n	Medijan	Min–maks
Gubici vode WL (% ulaza)	Ekvador	95	84,0	39,0–97,0
Gubici vode WL (% ulaza)	Južnoafrička Republika	104	59,0	15,0–108,0
Gubici vode WL (% ulaza)	Kanada	0	—	—
Gubici vode WL (% ulaza)	Ukupno	199	77,0	15,0–108,0
ILI (—)	Ekvador	95	57,93	3,24–206,53
ILI (—)	Južnoafrička Republika	104	4,43	0,25–52,20
ILI (—)	Kanada	18	2,33	0,48–13,21
ILI (—)	Ukupno	217	9,32	0,25–206,53
Qlr/km/P (l/s/km/m)	Ekvador	95	0,110	0,010–0,370
Qlr/km/P (l/s/km/m)	Južnoafrička Republika	104	0,010	< 0,001–0,060
Qlr/km/P (l/s/km/m)	Kanada	18	< 0,001	< 0,001–0,010
Qlr/km/P (l/s/km/m)	Ukupno	217	0,010	< 0,001–0,370
Relativni tlačni korak (%)	Ekvador	95	42,4	1,8–83,3
Relativni tlačni korak (%)	Južnoafrička Republika	104	34,1	7,3–66,7
Relativni tlačni korak (%)	Kanada	18	22,6	11,2–33,6
Relativni tlačni korak (%)	Ukupno	217	32,8	1,8–83,3
Izmjereni N1 (—)	Ekvador	95	0,80	0,30–3,06
Izmjereni N1 (—)	Južnoafrička Republika	104	1,31	-0,99–8,11
Izmjereni N1 (—)	Kanada	18	0,66	0,00–2,27
Izmjereni N1 (—)	Ukupno	217	0,89	-0,99–8,11

Napomena: oznaka Qlr/km/P artefakt je baze podataka; u tekstu disertacije ta veličina nosi oznaku LD (jedn. (4.1)). Statistike su izračunane nad svih 217 zapisa očišćene baze (prije filtra vjerodostojnosti); $n < 217$ kod pojedinih varijabli odražava strukturno nedostajuće vrijednosti opisane u pogl. 4.2.2. Medijan gubitaka vode treninga ($\approx 68\%$, pogl. 4.2.3 i 6.4) odnosi se na upotrebljive trening zapise, dok ova tablica prikazuje svih 217 zapisa baze (WL dostupan za 199); analogno, medijani tlaka od 27 m i 76 m u pogl. 4.2.1 odnose se na plastične zone, a ovdje su iskazani državni medijani.

Tablica D.2. Potpuni ispis očišćene baze terenskih testova tlačnih koraka (217 zapisa)

Zona	Država	Korak	Lm (km)	Fleks. (%)	Lo (l/s)	Po (m)	WL (%)	ILI (—)	Qrl/km/P	Korak $\Delta P/P_o$ (%)	N1 (—)	Vjerod.	Težina
CRO-02-03	Ekvador	S1	32,2	77	56,50	16,0	83,0	75,56	0,110	12,5	0,89	da	0,833
CRO-02-03	Ekvador	S2	32,2	77	50,10	14,0	82,0	79,93	0,110	14,3	0,50	da	0,952
CRO-02-03	Ekvador	S3	32,2	77	46,40	12,0	81,0	83,23	0,120	16,7	0,62	da	1,000
CRO-02-03	Ekvador	S4	32,2	77	41,40	10,0	79,0	92,69	0,130	10,0	0,71	da	0,667
CRO-02-03	Ekvador	UK	32,2	77	56,50	16,0	83,0	57,93	0,110	43,8	0,67	da	0,755
CRO-006	Ekvador	S1	7,7	15	35,10	27,6	91,0	126,01	0,170	1,8	0,82	da	0,200
CRO-006	Ekvador	S2	7,7	15	34,60	27,1	91,0	118,57	0,170	11,4	0,65	da	0,763
CRO-006	Ekvador	S3	7,7	15	31,90	24,0	90,0	124,11	0,170	12,9	0,55	da	0,861
CRO-006	Ekvador	S4	7,7	15	29,60	20,9	90,0	118,64	0,180	23,9	0,67	da	1,000
CRO-006	Ekvador	UK	7,7	15	35,10	27,6	91,0	89,84	0,170	42,4	0,64	da	0,793
CRO-10-11	Ekvador	S1	27,0	24	69,50	18,5	87,0	88,07	0,140	18,9	0,82	da	1,000
CRO-10-11	Ekvador	S2	27,0	24	58,50	15,0	85,0	94,41	0,140	13,3	0,98	da	0,889
CRO-10-11	Ekvador	S3	27,0	24	50,80	13,0	83,0	94,90	0,140	15,4	0,83	da	1,000
CRO-10-11	Ekvador	S4	27,0	24	44,30	11,0	81,0	97,65	0,150	9,1	1,45	da	0,606
CRO-10-11	Ekvador	UK	27,0	24	69,50	18,5	87,0	58,06	0,140	45,9	0,96	da	0,694
CTC-12-13	Ekvador	S1	25,5	15	36,40	21,5	82,0	77,89	0,070	7,0	0,30	da	0,465
CTC-12-13	Ekvador	S2	25,5	15	35,60	20,0	81,0	75,36	0,070	10,0	1,00	da	0,667
CTC-12-13	Ekvador	S3	25,5	15	32,00	18,0	80,0	76,21	0,070	11,1	0,80	da	0,741
CTC-12-13	Ekvador	S4	25,5	15	29,20	16,0	78,0	74,35	0,070	12,5	1,07	da	0,833
CTC-12-13	Ekvador	S5	25,5	15	25,30	14,0	75,0	77,25	0,070	14,3	0,62	da	0,952
CTC-12-13	Ekvador	UK	25,5	15	36,40	21,5	82,0	50,30	0,070	44,2	0,79	da	0,743
CTC-17-18-19	Ekvador	S1	30,5	11	65,30	17,0	84,0	97,12	0,130	14,1	1,08	da	0,941
CTC-17-18-19	Ekvador	S2	30,5	11	55,40	14,6	81,0	103,70	0,120	11,0	0,75	da	0,731
CTC-17-18-19	Ekvador	S3	30,5	11	50,80	13,0	80,0	105,01	0,130	11,5	0,84	da	0,769
CTC-17-18-19	Ekvador	S4	30,5	11	45,80	11,5	78,0	95,39	0,130	22,6	0,85	da	1,000
CTC-17-18-19	Ekvador	UK	30,5	11	65,30	17,0	84,0	64,53	0,130	47,6	0,89	da	0,646
CTC-032-033-034-052-053-093-094	Ekvador	S1	62,1	33	209,60	20,0	91,0	118,64	0,170	35,0	0,74	da	1,000
CTC-032-033-034-052-053-093-094	Ekvador	S2	62,1	33	152,40	13,0	88,0	159,29	0,190	15,4	0,81	da	1,000
CTC-032-033-034-052-053-093-094	Ekvador	S3	62,1	33	133,00	11,0	87,0	160,66	0,190	18,2	0,79	da	1,000
CTC-032-033-034-052-053-093-094	Ekvador	UK	62,1	33	209,60	20,0	91,0	88,36	0,170	55,0	0,77	da	0,440
CTP-005ST	Ekvador	S1	32,2	60	62,90	16,0	93,0	97,56	0,120	12,5	0,79	da	0,833

Zona	Država	Korak	Lm (km)	Fleks. (%)	Lo (l/s)	Po (m)	WL (%)	ILI (—)	Qrl/km/P	Korak $\Delta P/P_o$ (%)	N1 (—)	Vjerod.	Težina
CTP-005ST	Ekvador	S2	32,2	60	56,50	14,0	92,0	104,14	0,130	14,3	0,44	da	0,952
CTP-005ST	Ekvador	S3	32,2	60	52,80	12,0	92,0	110,02	0,140	16,7	0,54	da	1,000
CTP-005ST	Ekvador	S4	32,2	60	47,80	10,0	91,0	123,79	0,150	10,0	0,61	da	0,667
CTP-005ST	Ekvador	UK	32,2	60	62,90	20,0	93,0	61,90	0,100	55,0	0,42	da	0,440
N50-305-306-308-309-311-312-313-314-315	Ekvador	S1	39,4	15	94,40	32,5	82,0	59,66	0,070	3,1	1,39	da	0,205
N50-305-306-308-309-311-312-313-314-315	Ekvador	S2	39,4	15	90,40	31,5	81,0	57,47	0,070	4,8	1,41	da	0,317
N50-305-306-308-309-311-312-313-314-315	Ekvador	S3	39,4	15	84,40	30,0	80,0	55,34	0,070	6,7	1,25	da	0,444
N50-305-306-308-309-311-312-313-314-315	Ekvador	S4	39,4	15	77,40	28,0	79,0	53,93	0,070	10,7	0,84	da	0,714
N50-305-306-308-309-311-312-313-314-315	Ekvador	UK	39,4	15	94,40	32,5	82,0	46,46	0,070	23,1	1,12	da	1,000
N72-387-388-389	Ekvador	S1	32,2	100	85,60	54,0	80,0	12,85	0,050	7,4	1,28	da	0,494
N72-387-388-389	Ekvador	S2	32,2	100	77,60	50,0	78,0	10,48	0,050	26,0	0,93	da	1,000
N72-387-388-389	Ekvador	S3	32,2	100	58,60	37,0	73,0	9,32	0,050	43,2	0,74	da	0,769
N72-387-388-389	Ekvador	S4	32,2	100	38,60	21,0	64,0	8,34	0,060	57,1	0,80	da	0,380
N72-387-388-389	Ekvador	UK	32,2	100	85,60	54,0	80,0	3,24	0,050	83,3	0,82	da	0,300
S72-129	Ekvador	S1	3,2	99	17,40	27,0	97,0	118,78	0,200	25,9	0,41	da	1,000
S72-129	Ekvador	S2	3,2	99	15,40	20,0	96,0	149,97	0,240	15,0	0,41	da	1,000
S72-129	Ekvador	S3	3,2	99	14,40	17,0	96,0	164,22	0,260	20,6	0,31	da	1,000
S72-129	Ekvador	S4	3,2	99	13,40	13,5	96,0	191,41	0,310	22,2	0,31	da	1,000
S72-129	Ekvador	S5	3,2	99	12,40	10,5	96,0	206,53	0,370	42,9	0,31	da	0,780
S72-129	Ekvador	UK	3,2	99	17,40	27,0	97,0	80,32	0,200	66,7	0,47	da	0,300
S72-195	Ekvador	S1	4,3	92	17,10	27,0	95,0	121,04	0,150	22,2	0,69	da	1,000
S72-195	Ekvador	S2	4,3	92	14,40	21,0	94,0	138,42	0,160	14,3	0,76	da	0,952
S72-195	Ekvador	S3	4,3	92	12,80	18,0	93,0	140,67	0,160	16,7	0,76	da	1,000
S72-195	Ekvador	S4	4,3	92	11,10	15,0	92,0	143,82	0,170	20,0	0,72	da	1,000
S72-195	Ekvador	UK	4,3	92	17,10	27,0	95,0	79,90	0,150	55,6	0,73	da	0,424
CTP-001	Ekvador	UK	35,2	99	45,80	20,4	68,0	13,31	0,060	73,5	3,06	ne	—

Zona	Država	Korak	Lm (km)	Fleks. (%)	Lo (l/s)	Po (m)	WL (%)	ILI (—)	Qrl/km/P	Korak $\Delta P/P_o$ (%)	N1 (—)	Vjerod.	Težina
CTP-005	Ekvador	UK	16,9	63	8,30	16,3	45,0	9,91	0,030	61,3	0,58	da	0,180
CRO-010	Ekvador	UK	18,0	30	64,20	23,5	86,0	37,75	0,150	63,8	0,98	da	0,300
CRO-011	Ekvador	UK	8,4	18	20,20	20,4	81,0	24,06	0,120	73,5	0,98	da	0,300
CTP-072	Ekvador	UK	12,7	95	41,60	26,5	93,0	41,96	0,120	56,6	0,74	da	0,395
CTP-075-078-079-080	Ekvador	UK	27,9	87	53,20	20,4	79,0	12,54	0,090	73,5	0,70	da	0,300
S72-108	Ekvador	UK	3,4	8	22,60	32,6	93,0	95,33	0,210	46,0	0,93	da	0,692
SRO-112	Ekvador	UK	5,9	20	6,10	35,7	64,0	8,11	0,030	42,0	2,61	ne	—
S72-113	Ekvador	UK	7,4	91	27,10	25,8	92,0	61,97	0,140	58,1	0,66	da	0,352
SRO-118	Ekvador	UK	1,8	10	4,50	32,6	82,0	26,15	0,080	46,0	2,61	ne	—
SRO-132	Ekvador	UK	10,6	73	23,90	26,5	82,0	23,17	0,080	56,6	0,86	da	0,395
S72-133	Ekvador	UK	4,5	83	6,50	28,6	64,0	12,33	0,050	52,4	0,98	da	0,511
S72-134	Ekvador	UK	2,7	20	5,30	28,6	87,0	34,61	0,070	52,4	0,93	da	0,511
S72-136	Ekvador	UK	4,4	62	10,90	27,5	83,0	21,15	0,090	54,5	0,86	da	0,453
S72-137	Ekvador	UK	6,3	69	10,50	25,5	77,0	15,11	0,070	58,8	0,58	da	0,333
S72-138	Ekvador	UK	7,2	92	9,80	24,5	79,0	15,65	0,060	61,2	0,98	da	0,300
S72-139	Ekvador	UK	3,3	87	12,40	27,5	91,0	44,87	0,140	54,5	0,98	da	0,453
S72-140	Ekvador	UK	4,5	89	11,10	27,5	88,0	25,83	0,090	54,5	0,98	da	0,453
S72-141	Ekvador	UK	6,2	95	6,90	24,5	73,0	8,35	0,050	61,2	0,98	da	0,300
S72-142	Ekvador	UK	7,2	100	8,90	24,5	78,0	9,82	0,050	61,2	0,98	da	0,300
S72-143	Ekvador	UK	5,4	92	19,10	32,6	90,0	31,24	0,110	46,0	0,72	da	0,692
S72-144	Ekvador	UK	4,6	74	10,30	24,5	82,0	26,62	0,090	61,2	0,75	da	0,300
S72-145	Ekvador	UK	5,5	98	12,50	30,5	90,0	36,58	0,070	49,2	0,62	da	0,603
S72-146	Ekvador	UK	7,1	93	15,50	20,4	86,0	13,91	0,110	73,5	0,75	da	0,300
S72-147	Ekvador	UK	0,9	75	0,80	35,7	65,0	7,29	0,020	42,0	0,70	da	0,321
S72-148	Ekvador	UK	9,1	97	21,30	28,6	90,0	37,99	0,080	52,4	0,54	da	0,511
S72-151	Ekvador	UK	4,0	98	13,70	32,7	90,0	34,79	0,100	45,9	0,55	da	0,696
S72-152	Ekvador	UK	5,6	92	26,80	32,6	91,0	40,24	0,150	46,0	0,80	da	0,692
SRO-154	Ekvador	UK	5,0	73	28,80	25,5	93,0	54,81	0,230	58,8	0,54	da	0,333
SGU-164	Ekvador	UK	16,2	97	17,60	20,4	83,0	14,30	0,050	73,5	0,90	da	0,300
SGU-173	Ekvador	UK	27,9	91	21,10	23,5	79,0	10,48	0,030	63,8	1,52	da	0,180
SGU-186	Ekvador	UK	6,7	86	11,60	27,5	87,0	22,12	0,060	54,5	1,00	da	0,453
SGU-189	Ekvador	UK	26,0	95	27,60	26,5	86,0	14,90	0,040	56,6	0,89	da	0,316
SGU-190	Ekvador	UK	10,1	99	17,50	28,6	88,0	21,52	0,060	52,4	0,80	da	0,511
S72-198	Ekvador	UK	8,4	95	7,80	19,4	72,0	7,78	0,050	77,3	0,83	da	0,300
N72-388	Ekvador	UK	17,7	100	8,00	52,0	64,0	5,59	0,010	28,8	0,88	da	0,200
N72-390	Ekvador	UK	7,6	100	4,00	42,8	42,0	4,44	0,010	35,0	2,50	da	0,200
NRO-401	Ekvador	UK	10,1	97	4,40	14,3	39,0	6,04	0,030	69,9	1,97	da	0,180
N72-494	Ekvador	UK	9,4	96	34,40	33,0	92,0	44,56	0,110	45,5	0,61	da	0,707

Zona	Država	Korak	Lm (km)	Fleks. (%)	Lo (l/s)	Po (m)	WL (%)	ILI (—)	Qrl/km/P	Korak $\Delta P/P_o$ (%)	N1 (—)	Vjerod.	Težina
P1	Kanada	UK	10,0	30	6,10	45,3	—	13,21	0,010	15,2	0,52	da	0,200
P2	Kanada	UK	22,1	9	2,00	57,2	—	1,47	0,000	14,9	0,93	da	0,099
P3	Kanada	UK	16,2	21	7,20	55,3	—	6,75	0,010	18,3	0,38	da	0,200
P5	Kanada	UK	15,8	90	4,80	65,3	—	3,09	0,000	24,2	0,75	da	0,100
P6	Kanada	UK	13,2	82	1,40	48,2	—	1,72	0,000	12,2	1,91	da	0,082
P7	Kanada	UK	9,9	98	1,80	47,6	—	3,06	0,000	24,4	0,17	ne	—
P8	Kanada	UK	9,6	57	5,80	62,1	—	8,26	0,010	20,3	0,49	da	0,200
P9	Kanada	UK	5,8	5	0,90	50,5	—	1,75	0,000	26,7	1,39	da	0,100
P10	Kanada	UK	6,2	4	1,90	89,0	—	3,18	0,000	27,8	0,63	da	0,100
P11	Kanada	UK	7,0	20	0,60	74,6	—	0,85	0,000	22,1	0,93	da	0,100
P12	Kanada	UK	9,7	37	0,90	57,5	—	1,17	0,000	25,0	0,15	ne	—
P13	Kanada	UK	9,8	86	1,60	61,3	—	2,72	0,000	33,6	0,00	ne	—
P14	Kanada	UK	22,8	23	1,90	54,6	—	1,03	0,000	23,1	0,68	da	0,100
P16	Kanada	UK	20,5	34	2,30	50,1	—	1,84	0,000	23,8	0,61	da	0,100
P17	Kanada	UK	18,5	39	3,00	46,7	—	1,94	0,000	17,8	2,27	da	0,100
P18	Kanada	UK	6,5	100	3,10	35,7	—	8,68	0,010	11,2	1,36	da	0,149
P19	Kanada	UK	4,8	2	1,70	54,5	—	4,40	0,010	29,0	0,23	da	0,200
P20	Kanada	UK	18,2	69	1,50	82,7	—	0,48	0,000	20,3	1,70	da	0,100
Zone 1	Južnoafrička Republika	UK	47,8	100	23,90	84,6	61,0	7,44	0,010	55,4	0,27	da	0,086
Zone 2	Južnoafrička Republika	UK	16,3	100	5,20	79,0	32,0	3,16	0,000	45,6	0,87	da	0,070
Zone 3	Južnoafrička Republika	UK	2,1	100	1,80	67,0	67,0	13,23	0,010	49,3	0,21	da	0,120
Zone 4	Južnoafrička Republika	UK	7,4	100	0,80	57,0	16,0	1,34	0,000	23,7	1,96	da	0,100
Zone 5	Južnoafrička Republika	UK	5,8	100	4,70	55,0	31,0	15,81	0,010	7,3	3,53	ne	—
Zone 6	Južnoafrička Republika	UK	4,8	100	0,70	74,0	15,0	1,41	0,000	20,3	1,83	da	0,100
Zone 7	Južnoafrička Republika	UK	3,8	100	0,60	78,6	66,0	0,25	0,000	52,9	0,90	da	0,050
Zone 8	Južnoafrička Republika	UK	2,2	100	7,10	80,0	43,0	52,20	0,040	55,0	0,48	da	0,352
Zone 9	Južnoafrička Republika	UK	10,4	100	1,70	58,2	23,0	2,46	0,000	13,7	1,26	da	0,092
Zone 10	Južnoafrička Republika	UK	1,3	100	0,40	96,0	52,0	0,84	0,000	66,7	2,01	da	0,030
Zone 11	Južnoafrička Republika	UK	4,4	100	2,10	66,7	32,0	6,81	0,010	37,0	0,42	da	0,189
Zone 12	Južnoafrička Republika	UK	12,0	100	3,70	115,0	32,0	1,84	0,000	29,6	1,61	da	0,100
Zone 13	Južnoafrička Republika	UK	1,9	100	0,20	52,4	18,0	1,33	0,000	12,2	4,61	ne	—
Zone 14	Južnoafrička Republika	UK	4,3	100	1,80	77,4	29,0	3,08	0,010	44,7	0,84	da	0,146
Zone 15	Južnoafrička Republika	UK	3,1	100	2,10	60,5	48,0	6,86	0,010	30,6	0,67	da	0,200
Zone 16	Južnoafrička Republika	UK	11,7	100	2,30	70,7	31,0	3,91	0,000	30,1	0,52	da	0,100
Zone 17	Južnoafrička Republika	UK	2,1	100	1,50	101,3	54,0	6,80	0,010	55,6	0,47	da	0,085
Zone 18	Južnoafrička Republika	UK	30,6	100	15,90	53,0	34,0	8,79	0,010	24,5	0,24	da	0,200
Zone 19	Južnoafrička Republika	UK	10,5	100	4,00	95,2	29,0	1,50	0,000	62,2	1,01	da	0,030
Zone 20	Južnoafrička Republika	UK	0,4	100	0,50	94,2	86,0	5,60	0,010	51,2	0,48	da	0,109

Zona	Država	Korak	Lm (km)	Fleks. (%)	Lo (l/s)	Po (m)	WL (%)	ILI (—)	Qrl/km/P	Korak $\Delta P/P_o$ (%)	N1 (—)	Vjerod.	Težina
Zone 21	Južnoafrička Republika	UK	0,2	100	0,10	77,2	108,0	6,63	0,010	59,8	0,51	da	0,061
Zone 22	Južnoafrička Republika	UK	6,0	100	2,40	76,2	76,0	4,98	0,010	41,7	0,79	da	0,162
Zone 24	Južnoafrička Republika	UK	1,3	100	1,30	77,2	90,0	9,41	0,010	45,2	1,71	da	0,143
Zone 25	Južnoafrička Republika	UK	2,0	100	0,70	102,8	61,0	2,84	0,000	61,4	0,49	da	0,030
Zone 26	Južnoafrička Republika	UK	7,4	100	3,70	58,5	66,0	3,69	0,010	33,3	2,35	da	0,200
Zone 27	Južnoafrička Republika	UK	2,5	100	0,60	56,5	63,0	2,67	0,000	20,5	3,96	ne	—
Zone 29	Južnoafrička Republika	UK	2,1	100	0,90	101,6	62,0	1,75	0,000	50,3	1,27	da	0,057
Zone 30	Južnoafrička Republika	UK	2,5	100	1,30	69,0	65,0	7,49	0,010	42,9	0,79	da	0,156
Zone 31	Južnoafrička Republika	UK	5,1	100	1,00	80,0	39,0	2,18	0,000	24,5	1,60	da	0,100
Zone 32	Južnoafrička Republika	UK	3,9	100	10,70	93,3	63,0	13,43	0,030	42,5	1,71	da	0,474
Zone 33	Južnoafrička Republika	UK	1,1	100	1,10	94,1	61,0	2,24	0,010	46,2	2,22	da	0,137
Zone 35	Južnoafrička Republika	UK	7,4	100	0,80	117,6	55,0	0,68	0,000	45,0	1,45	da	0,072
Zone 36	Južnoafrička Republika	UK	5,6	100	3,80	122,8	85,0	2,94	0,010	64,8	0,84	da	0,060
Zone 37	Južnoafrička Republika	UK	2,3	100	0,80	88,9	59,0	1,46	0,000	48,5	1,58	da	0,062
Zone 38	Južnoafrička Republika	UK	5,9	100	1,20	109,1	54,0	1,47	0,000	29,3	1,18	da	0,100
Zone 39	Južnoafrička Republika	UK	4,7	100	6,10	91,3	80,0	7,21	0,010	40,2	1,44	da	0,171
Zone 40	Južnoafrička Republika	UK	8,9	100	1,30	49,7	20,0	2,88	0,000	40,6	0,80	da	0,084
Zone 41	Južnoafrička Republika	UK	29,6	100	5,50	42,4	30,0	6,31	0,000	26,2	0,76	da	0,100
Zone 42	Južnoafrička Republika	UK	6,0	100	1,90	45,9	29,0	4,88	0,010	15,7	3,63	ne	—
Zone 43	Južnoafrička Republika	UK	49,0	100	49,50	75,4	77,0	8,10	0,010	34,4	1,17	da	0,200
Zone 44	Južnoafrička Republika	UK	2,3	100	2,20	45,6	57,0	15,83	0,020	26,5	2,16	da	0,400
Zone 45	Južnoafrička Republika	UK	20,7	100	2,40	44,5	25,0	1,03	0,000	31,7	1,90	da	0,100
Zone 46	Južnoafrička Republika	UK	5,7	100	4,80	92,3	63,0	7,95	0,010	52,9	0,48	da	0,100
Zone 47	Južnoafrička Republika	UK	6,4	100	0,90	81,7	52,0	5,41	0,000	38,4	0,62	da	0,090
Zone 48	Južnoafrička Republika	UK	16,4	100	7,50	41,9	54,0	11,43	0,010	22,0	2,19	da	0,200
Zone 49	Južnoafrička Republika	UK	8,6	100	2,40	97,7	47,0	2,03	0,000	55,3	0,90	da	0,043
Zone 50	Južnoafrička Republika	UK	18,7	100	33,80	49,4	75,0	31,03	0,040	34,2	1,40	da	0,800
Zone 51	Južnoafrička Republika	UK	5,5	100	0,50	75,9	32,0	1,45	0,000	65,3	0,79	da	0,030
Zone 52	Južnoafrička Republika	UK	27,9	100	11,70	44,2	55,0	6,72	0,010	20,1	4,60	ne	—
Zone 53	Južnoafrička Republika	UK	7,6	100	1,00	49,5	20,0	2,23	0,000	58,0	0,57	da	0,036
Zone 54	Južnoafrička Republika	UK	9,8	100	6,30	66,2	30,0	6,78	0,010	39,6	1,38	da	0,174
Zone 55	Južnoafrička Republika	UK	6,6	100	2,40	60,3	22,0	7,62	0,010	38,0	0,50	da	0,183
Zone 56	Južnoafrička Republika	UK	12,8	99	21,70	61,8	89,0	2,12	0,030	32,8	5,60	ne	—
Zone 57	Južnoafrička Republika	UK	18,3	100	2,90	38,6	21,0	1,93	0,000	33,9	2,59	da	0,100
Zone 58	Južnoafrička Republika	UK	26,4	100	4,30	72,6	36,0	1,21	0,000	48,5	1,49	da	0,062
Zone 59	Južnoafrička Republika	UK	64,1	100	20,20	58,6	74,0	3,04	0,010	23,4	3,94	ne	—
Zone 60	Južnoafrička Republika	UK	21,5	100	7,70	67,9	43,0	9,33	0,010	28,7	-0,99	ne	—
Zone 61	Južnoafrička Republika	UK	21,5	100	28,20	66,3	53,0	26,97	0,020	27,1	-0,44	ne	—

Zona	Država	Korak	Lm (km)	Fleks. (%)	Lo (l/s)	Po (m)	WL (%)	ILI (—)	Qrl/km/P	Korak $\Delta P/P_o$ (%)	N1 (—)	Vjerod.	Težina
Zone 62	Južnoafrička Republika	UK	68,8	100	27,90	52,6	68,0	10,95	0,010	18,9	0,95	da	0,200
Zone 63	Južnoafrička Republika	UK	47,6	100	11,10	56,1	48,0	4,22	0,000	18,0	1,36	da	0,100
Zone 64	Južnoafrička Republika	UK	26,3	100	20,30	78,5	66,0	6,02	0,010	49,2	1,07	da	0,121
Zone 65	Južnoafrička Republika	UK	59,4	100	67,80	44,8	79,0	18,18	0,030	19,2	1,34	da	0,600
Zone 66	Južnoafrička Republika	UK	21,2	100	7,30	50,4	67,0	14,70	0,010	28,2	0,85	da	0,200
Zone 67	Južnoafrička Republika	UK	50,8	100	34,80	67,0	65,0	19,80	0,010	22,1	1,55	da	0,200
Zone 68	Južnoafrička Republika	UK	32,5	100	10,00	50,3	24,0	3,05	0,010	13,9	4,29	ne	—
Zone 69	Južnoafrička Republika	UK	46,4	100	11,70	61,6	49,0	5,23	0,000	24,0	1,24	da	0,100
Zone 70	Južnoafrička Republika	UK	114,5	100	27,50	70,9	46,0	5,03	0,000	12,8	1,30	da	0,086
Zone 71	Južnoafrička Republika	UK	91,3	100	6,40	59,1	53,0	4,29	0,000	10,8	1,41	da	0,072
Zone 72	Južnoafrička Republika	UK	43,9	100	1,20	59,3	40,0	1,13	0,000	34,6	1,01	da	0,100
Zone 73	Južnoafrička Republika	UK	47,7	100	32,20	82,4	52,0	20,19	0,010	42,4	1,04	da	0,159
Zone 74	Južnoafrička Republika	UK	30,0	100	8,50	54,7	69,0	3,35	0,010	57,8	1,29	da	0,072
Zone 75	Južnoafrička Republika	UK	30,0	100	14,20	76,3	63,0	9,98	0,010	43,4	0,36	da	0,153
Zone 76	Južnoafrička Republika	UK	36,2	100	2,40	90,1	60,0	2,25	0,000	44,3	0,68	da	0,074
Zone 77	Južnoafrička Republika	UK	12,9	90	6,10	43,5	59,0	8,89	0,010	13,8	1,57	da	0,184
Zone 78	Južnoafrička Republika	UK	22,2	95	6,90	67,5	60,0	2,45	0,000	30,7	1,59	da	0,100
Zone 79	Južnoafrička Republika	UK	13,3	100	7,40	65,7	67,0	3,20	0,010	32,7	0,67	da	0,200
Zone 80	Južnoafrička Republika	UK	34,4	81	15,80	51,0	63,0	7,10	0,010	16,1	0,95	da	0,200
Zone 81	Južnoafrička Republika	UK	27,6	100	4,50	85,5	47,0	1,37	0,000	35,6	1,45	da	0,098
Zone 82	Južnoafrička Republika	UK	2,1	100	1,10	42,2	51,0	9,78	0,010	46,2	0,67	da	0,137
Zone 83	Južnoafrička Republika	UK	3,2	100	0,80	51,3	43,0	4,55	0,000	17,9	2,87	ne	—
Zone 84	Južnoafrička Republika	UK	7,2	100	7,10	76,3	70,0	7,39	0,010	12,5	1,68	da	0,166
Zone 85	Južnoafrička Republika	UK	4,2	100	0,60	93,4	23,0	0,96	0,000	42,0	1,32	da	0,080
Zone 86	Južnoafrička Republika	UK	15,0	87	21,30	83,3	59,0	18,42	0,020	29,5	0,77	da	0,400
Zone 87	Južnoafrička Republika	UK	9,1	99	7,50	81,0	94,0	4,59	0,010	59,8	0,94	da	0,061
Zone 88	Južnoafrička Republika	UK	5,5	98	5,20	77,9	89,0	1,61	0,010	26,7	5,64	ne	—
Zone 89	Južnoafrička Republika	UK	6,0	100	3,10	80,8	41,0	4,32	0,010	46,2	0,83	da	0,137
Zone 90	Južnoafrička Republika	UK	14,6	97	18,70	68,0	103,0	16,37	0,020	49,3	0,69	da	0,240
Zone 91	Južnoafrička Republika	UK	5,8	83	4,20	61,8	59,0	7,58	0,010	27,2	0,96	da	0,200
Zone 92	Južnoafrička Republika	UK	12,3	96	6,80	55,1	58,0	2,60	0,010	29,9	3,72	ne	—
Zone 93	Južnoafrička Republika	UK	1,3	100	0,90	52,1	85,0	1,51	0,010	25,3	8,11	ne	—
Zone 94	Južnoafrička Republika	UK	6,3	98	2,00	49,8	68,0	1,59	0,010	33,3	3,26	ne	—
Zone 95	Južnoafrička Republika	UK	18,0	99	6,80	67,6	74,0	4,56	0,010	48,7	1,27	da	0,123
Zone 96	Južnoafrička Republika	UK	2,6	96	1,60	63,4	68,0	2,73	0,010	26,5	4,38	ne	—
Zone 97	Južnoafrička Republika	UK	1,9	95	5,40	49,0	82,0	6,82	0,060	35,9	2,18	da	0,974
Zone 98	Južnoafrička Republika	UK	7,1	86	3,30	63,1	60,0	1,99	0,010	42,3	1,52	da	0,159
Zone 99	Južnoafrička Republika	UK	6,6	98	2,80	67,3	74,0	2,84	0,010	24,4	4,44	ne	—

Zona	Država	Korak	Lm (km)	Fleks. (%)	Lo (l/s)	Po (m)	WL (%)	ILI (—)	Qrl/km/P	Korak $\Delta P/P_o$ (%)	N1 (—)	Vjerod.	Težina
Zone 100	Južnoafrička Republika	UK	3,1	97	1,60	80,0	71,0	1,47	0,010	38,9	3,19	ne	—
Zone 101	Južnoafrička Republika	UK	2,4	96	5,70	56,0	68,0	15,83	0,040	32,7	1,22	da	0,800
Zone 102	Južnoafrička Republika	UK	5,4	98	2,70	82,8	86,0	3,87	0,010	11,6	6,32	ne	—
Zone 103	Južnoafrička Republika	UK	2,5	96	2,60	64,3	75,0	3,04	0,020	44,9	2,23	da	0,289
Zone 104	Južnoafrička Republika	UK	7,7	99	7,60	84,3	95,0	14,91	0,010	20,6	2,87	ne	—
Zone 105	Južnoafrička Republika	UK	3,3	97	4,90	26,6	95,0	0,72	0,060	54,1	4,90	ne	—
Zone 106	Južnoafrička Republika	UK	2,1	95	6,70	49,3	94,0	5,13	0,060	29,8	6,67	ne	—
Zone 107	Južnoafrička Republika	UK	5,2	98	10,90	68,3	98,0	11,33	0,030	31,8	3,95	ne	—

Napomena: oznaka stupca Qrl/km/P artefakt je baze podataka; u tekstu disertacije ta veličina nosi oznaku LD (jedn. (4.1)). Vrijednosti su doslovno prenesene iz očišćene baze uz pretvorbu u decimalni zarez; udjeli i relativni koraci iskazani su u postocima. Stupac "Vjerod." označava fizikalnu vjerodostojnost ($0,2 \leq N1 \leq 2,6$); težina pouzdanosti definirana je samo za vjerodostojne zapise (188).

Literatura

- Aitken, A.C. (1936) 'On Least Squares and Linear Combination of Observations', *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 55, str. 42–48. DOI: 10.1017/S0370164600014346.
- Amoatey, P.K., Obiri-Yeboah, A.A. i Akosah-Kusi, M. (2022) 'Impact of Active Night Population and Leakage Exponent on Leakage Estimation in Developing Countries', *Water Practice and Technology*, 17(1), str. 14–25. DOI: 10.2166/wpt.2021.124.
- Anderson-Sprecher, R. (1994) 'Model Comparisons and R²', *The American Statistician*, 48(2), str. 113–117. DOI: 10.1080/00031305.1994.10476036.
- Antunes, A., Andrade-Campos, A., Sardinha-Lourenço, A. i Oliveira, M.S. (2018) 'Short-Term Water Demand Forecasting Using Machine Learning Techniques', *Journal of Hydroinformatics*, 20(6). DOI: 10.2166/hydro.2018.163.
- Beckman, N.E., Nori, A.V., Rajamani, S.K. i Simmons, R.J. (2008) 'Proofs from Tests', *Proceedings ISSTA*, str. 3–14. DOI: 10.1145/1390630.1390634.
- Berardi, L., Simone, A., Laucelli, D.B., Ugarelli, R.M. i Giustolisi, O. (2018) 'Relevance of Hydraulic Modelling in Planning and Operating Real-Time Pressure Control: Case of Oppegård Municipality', *Journal of Hydroinformatics*, 20(3), str. 535–550. DOI: 10.2166/hydro.2017.052.
- Beygi, S. i van Zyl, J.E. (2024) 'Towards More Realistic Stochastic Modelling of Leakage in Water Distribution Systems', *Water Supply*, 24(11), str. 3831–3847. DOI: 10.2166/ws.2024.230.
- Boian, R.F., Macedo, D.O., de Oliveira, P.J.A. i Janzen, J.G. (2019) 'Comparison between FAVAD and General Equations to Evaluate the Leakage Lost Flow in Urban Water Distribution Systems', *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(6), str. 1073–1080. DOI: 10.1590/s1413-41522019195402.
- Bozkurt, C., Firat, M. i Ateş, A. (2022a) 'Development of a new comprehensive framework for the evaluation of leak management components and practices', *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71(5), str. 642–663. DOI: 10.2166/aqua.2022.031.

- Bozkurt, C., Firat, M., Yilmaz, S. i Ates, A. (2022b) 'Development of Current Condition Assessment and Target Definition Model for Water Balance Practices in Sustainable Water Loss Management', *Water Supply*, 22(5), str. 5028–5043. DOI: 10.2166/ws.2022.176.
- Breiman, L. (2001) 'Random Forests', *Machine Learning*, 45(1), str. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, C.J. i Olshen, R.A. (1984) *Classification and Regression Trees*. Wadsworth / Chapman & Hall/CRC. DOI: 10.1201/9781315139470.
- Canivete, C.R.C., Chitauro, M., Flörke, M. i Okorie, M.E. (2026) 'Deep Learning Applications for Leak Detection and Localisation in Water Distribution Systems: A Systematic Literature Review', *Intelligent Infrastructure and Construction*, 2(3), 10. DOI: 10.3390/iic2030010.
- Cassa, A.M. i van Zyl, J.E. (2014) 'Predicting the leakage exponents of elastically deforming cracks in pipes', *Procedia Engineering*, 70, str. 302–310. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.034.
- Chai, T. i Draxler, R.R. (2014) 'Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature', *Geoscientific Model Development*, 7(3), str. 1247–1250. DOI: 10.5194/gmd-7-1247-2014.
- Chatterjee, S., Ghumkar, S., Ahbab, M.M., Ramachandran, A., Tenbrinck, D., Maier, A., Semmelmann, K. i Bayer, S. (2026) 'Early Detection of DMA-Level Leaks in Water Networks Using Robust Regression Ensemble Framework', *Water*, 18(5), 563. DOI: 10.3390/w18050563.
- De Souza Groppo, G., Costa, M.A. i Libânio, M. (2019) 'Predicting Water Demand: A Review of the Methods Employed and Future Possibilities', *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(8). DOI: 10.2166/ws.2019.122.
- Deyi, M., Van Zyl, J. i Shepherd, M. (2014) 'Applying the FAVAD Concept and Leakage Number to Real Networks: A Case Study in Kwadabeka, South Africa', *Procedia Engineering*, 89, str. 1537–1544. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.450.
- Dundović, I. (2017) *Model Optimizacije Tlakova u Svrhu Smanjenja Vodnih Gubitaka u Vodoopskrbnom Sustavu*. Specijalistički rad. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 90 str.

- Dundović, I. i Tadić, L. (2022) 'A Field Experiment Verification of Theoretical Exponent N1 for FAVAD Method in Defining the Relationship of Pressure and Water Losses', *Water*, 14(13), 2067. DOI: 10.3390/w14132067.
- Evangelista, L.A., Brentan, B.M. i Lima, G.M. (2023) 'Rehabilitation of Water Distribution Networks: When and How to Rehabilitate', *Journal of Hydroinformatics*, 25(4), str. 1329–1340. DOI: 10.2166/hydro.2023.206.
- Fang, S., Sun, W. i Huang, L. (2019) 'Anomaly Detection for Water Supply Data Using Machine Learning Technique', *Journal of Physics: Conference Series*, 1345(2). DOI: 10.1088/1742-6596/1345/2/022054.
- Fisher, A., Rudin, C. i Dominici, F. (2019) 'All Models are Wrong, but Many are Useful: Learning a Variable's Importance by Studying an Entire Class of Prediction Models Simultaneously', *Journal of Machine Learning Research*, 20, str. 1–81.
- Fontana, N., Giugni, M. i Marini, G. (2017) 'Experimental Assessment of Pressure-Leakage Relationship in a Water Distribution Network', *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(3), str. 726–732. DOI: 10.2166/ws.2016.171.
- Friedman, J.H. (2001) 'Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine', *The Annals of Statistics*, 29(5), str. 1189–1232. DOI: 10.1214/aos/1013203451.
- Fuchs-Hanusch, D., Steffelbauer, D., Günther, M. i Muschalla, D. (2016) 'Systematic Material and Crack Type Specific Pipe Burst Outflow Simulations by Means of EPANET2', *Urban Water Journal*, 13(2), str. 108–118. DOI: 10.1080/1573062X.2014.994006.
- Garmendia, M., Almandoz, J., Arrizabalaga, A. i Arregui, F. (2019) 'Pressure Management and Residential Consumption Reduction', *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(1), str. 236–244. DOI: 10.2166/ws.2018.071.
- Grčić, E. i Šperac, M. (2024) 'Application of Expert Systems in Civil Engineering', *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 76(09), str. 839–852. DOI: 10.14256/JCE.4027.2024.
- Greyvenstein, B. i Van Zyl, J.E. (2007) 'An Experimental Investigation into the Pressure – Leakage Relationship of Some Failed Water Pipes', *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 56(2), str. 117–124. DOI: 10.2166/aqua.2007.065.
- Guyon, I. i Elisseeff, A. (2003) 'An Introduction to Variable and Feature Selection', *Journal of Machine Learning Research*, 3, str. 1157–1182.

- Hastie, T., Tibshirani, R. i Friedman, J. (2009) *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction (2nd Edition)*. Springer Series in Statistics. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.
- Hoerl, A.E. i Kennard, R.W. (1970) 'Ridge Regression: Biased Estimation for Nonorthogonal Problems', *Technometrics*, 12(1), str. 55–67. DOI: 10.1080/00401706.1970.10488634.
- Jenks, B., Papa, F. i Karney, B.W. (2023) 'Mobile DMA Testing for Leakage Assessment: Perspectives from Ontario, Canada', *Water Supply*, 23(5), str. 1843–1858. DOI: 10.2166/ws.2023.085.
- Kabaasha, A.M., van Zyl, J.E. i Piller, O. (2016) 'Modelling Pressure: Leakage Response in Water Distribution Systems Considering Leak Area Variation', *14th CCWI international conference, Computing and Control in Water Industry*. HAL: hal-01549955.
- Kaufman, S., Rosset, S., Perlich, C. i Stitelman, O. (2012) 'Leakage in Data Mining: Formulation, Detection, and Avoidance', *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 6(4), str. 1–21. DOI: 10.1145/2382577.2382579.
- Kvålseth, T.O. (1985) 'Cautionary Note about R²', *The American Statistician*, 39(4), str. 279–285. DOI: 10.1080/00031305.1985.10479448.
- Lambert, A., Fantozzi, M. i Shepherd, M. (2017) 'Pressure: Leak Flow Rates Using FAVAD: An Improved Fast-Track Practitioner's Approach', *CCWI 2017 – 15th International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, rujan.
- Lambert, A. i Thornton, J. (2011) 'The Relationships between Pressure and Bursts – a 'State-of-the-Art' Update', *IWA Water 21 Journal*, travanj, str. 37–38.
- Latchoomun, L., Ah King, R.T.F., Busawon, K., Mawooa, D. i Kaully, R.G. (2015) 'Laboratory Investigation of the Leakage Characteristics of Unburied HDPE Pipes', *13th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2015*, 119(1), str. 91–100. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.858.
- Latifi, M., Naeeni, S.T. i Mahdavi, A. (2018) 'Experimental Assessment of Soil Effects on the Leakage Discharge from Polyethylene Pipes', *Water Supply*, 18(2), str. 539–554. DOI: 10.2166/ws.2017.134.
- Laucelli, D.B., Enriquez, L.V., Ariza, A.D., Ciliberti, F.G., Berardi, L. i Giustolisi, O. (2023) 'A Digital Water Strategy Based on the Digital Water Service Concept to Support Asset

- Management in a Real System', *Journal of Hydroinformatics*, 25(5), str. 2004–2016. DOI: 10.2166/hydro.2023.313.
- Leinaes, A., Simukonda, K. i Farmani, R. (2024) 'Calibration of Intermittent Water Supply Systems Hydraulic Models under Data Scarcity', *Water Supply*, 24(5), str. 1626–1644. DOI: 10.2166/ws.2024.075.
- Liang, J. i Kong, X. (2023) 'Leakage Control of Urban Water Supply Network and Mathematical Analysis and Location of Leakage Points Based on Machine Learning', *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 8(1). DOI: 10.2478/amns.2022.2.0141.
- Little, R.J.A. i Rubin, D.B. (2019) *Statistical Analysis with Missing Data (3rd Edition)*. Wiley Series in Probability and Statistics. DOI: 10.1002/9781119482260.
- Liu, Y., Ma, X., Li, Y., Tie, Y., Zhang, Y. i Gao, J. (2019) 'Water Pipeline Leakage Detection Based on Machine Learning and Wireless Sensor Networks', *Sensors (Switzerland)*, 19(23). DOI: 10.3390/s19235086.
- Liu, X., Sang, X., Chang, J., Zheng, Y. i Han, Y. (2022) 'Sensitivity Analysis and Prediction of Water Supply and Demand in Shenzhen Based on an ELRF Algorithm and a Self-Adaptive Regression Coupling Model', *Water Supply*, 22(1). DOI: 10.2166/ws.2021.272.
- Lu, H., Ding, A., Zheng, Y., Jiang, J., Zhang, J., Zhang, Z., Xu, P., Zhao, X., Quan, F., Gao, C. i sur. (2023) 'Securing Drinking Water Supply in Smart Cities: An Early Warning System Based on Online Sensor Network and Machine Learning', *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(5). DOI: 10.2166/aqua.2023.007.
- Mann, H.B. i Whitney, D.R. (1947) 'On a Test of Whether One of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other', *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), str. 50–60. DOI: 10.1214/aoms/1177730491.
- Marzola, I., Alvisi, S. i Franchini, M. (2021) 'Analysis of MNF and FAVAD Models for Leakage Characterization by Exploiting Smart-Metered Data: The Case of the Gorino Ferrarese (Fe-Italy) District', *Water (Switzerland)*, 13(5). DOI: 10.3390/w13050643.
- Mathye, R.P., Scholz, M. i Nyende-Byakika, S. (2022) 'Optimal Pressure Management in Water Distribution Systems: Efficiency Indexes for Volumetric Cost Performance, Consumption and Linear Leakage Measurements', *Water*, 14(5), 805. DOI: 10.3390/W14050805.

- May, J. (1994) 'Pressure dependent leakage', *World Water & Environmental Engineering*, listopad 1994.
- McKenzie, R. i Seago, C. (2005) 'Assessment of real losses in potable water distribution systems: some recent developments', *Water Supply*, 5(1), str. 33–40. DOI: 10.2166/ws.2005.0005.
- Meleshko, A. V., Desnitsky, V.A. i Kotenko, I. V. (2020) 'Machine Learning Based Approach to Detection of Anomalous Data from Sensors in Cyber-Physical Water Supply Systems', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 709(3). DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033034.
- Mora-Rodríguez, J., Delgado-Galván, X., Ortiz-Medel, J., Ramos, H.M., Fuertes-Miquel, V.S. i López-Jiménez, P.A. (2015) 'Pathogen intrusion flows in water distribution systems: according to orifice equations', *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 64(8), str. 857–869. DOI: 10.2166/aqua.2015.121.
- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A. i Sá Marques, A. (2014) 'Pressure-Dependent Demand and Leakage Modelling with an EPANET Extension – WaterNetGen', *Procedia Engineering*, 89, str. 632–639. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.488.
- Nanda, F.A., Masduqi, A., Ahyar, A. i Rachman, A.S. (2023) 'Analysis of Non-Revenue Water Reduction Using the FAVAD Method in DMA Planning: Case Study in Palangka Raya Drinking Water Supply System', *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, 7(3), str. 248–265. DOI: 10.22515/sustinerejes.v7i3.364.
- Nasirian, A. i Ahrari, M. (2022) 'Leakage Detection in Water Distribution Networks Using Space Search Reduction and Local Fitness in Steady-State and EPS (Case Study: Water Distribution Network of Birjand)', *Water Supply*, 22(4), str. 4558–4570. DOI: 10.2166/ws.2022.117.
- Niebuhr, D., Nsanzubuhoro, R. i van Zyl, J.E. (2019) 'Field Experience with Pressure-Based Leakage Characterisation of Bulk Water Pipelines', *Urban Water Journal*, 16(10), str. 709–717. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1726411.
- Obradović, D., Šperac, M. i Marenjak, S. (2019) 'Possibilities of using expert methods for sewer system maintenance optimisation', *Građevinar*, 71(9), str. 769–779. DOI: 10.14256/JCE.2589.2018.

- Oğuz, A. i Ertuğrul, Ö.F. (2023) 'A Survey on Applications of Machine Learning Algorithms in Water Quality Assessment and Water Supply and Management', *Water Supply*, 23(2). DOI: 10.2166/ws.2023.033.
- Özdemir, Ö., Firat, M., Yılmaz, S. i Usluer, M. (2021) 'Analysis of the Effect of Pressure Control on Leakages in Distribution Systems by Favad Equation and Field Applications', *Water Practice and Technology*, 16(2), str. 320–332. DOI: 10.2166/wpt.2021.024.
- Piller, O. i Van Zyl, J.E. (2014) 'Incorporating the FAVAD Leakage Equation into Water Distribution System Analysis', *Procedia Engineering*, 89, str. 613–617. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.485.
- Price, E. i Ostfeld, A. (2014) 'Battle of Background Leakage Assessment for Water Networks Using Successive Linear Programing', *Procedia Engineering*, 89. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.158.
- Razavi, S.G., Nazif, S. i Ghorbani, M. (2023) 'Optimal Consequence Management of Pollution Intrusion into Water Distribution Networks Considering Demand Variation and Pipeline Leakage: A Case Study', *Journal of Hydroinformatics*, 25(6), str. 2177–2194. DOI: 10.2166/hydro.2023.003.
- Roberts, D.R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M.S., Elith, J., Guillera-Arroita, G., Hauenstein, S., Lahoz-Monfort, J.J., Schröder, B., Thuiller, W., Warton, D.I., Wintle, B.A., Hartig, F. i Dormann, C.F. (2017) 'Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure', *Ecography*, 40(8), str. 913–929. DOI: 10.1111/ecog.02881.
- Robles-Velasco, A., Muñuzuri, J., Onieva, L. i Rodríguez-Palero, M. (2021a) 'Trends and Applications of Machine Learning in Water Supply Networks Management', *Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(1). DOI: 10.3926/jiem.3280.
- Robles-Velasco, A., Ramos-Salgado, C., Muñuzuri, J. i Cortés, P. (2021b) 'Artificial Neural Networks to Forecast Failures in Water Supply Pipes', *Sustainability (Switzerland)*, 13(15). DOI: 10.3390/su13158226.
- Rubin, D.B. (1976) 'Inference and Missing Data', *Biometrika*, 63(3), str. 581–592. DOI: 10.1093/biomet/63.3.581.

- Samir, N., Kansoh, R., Elbarki, W. i Fleifle, A. (2017) 'Pressure Control for Minimizing Leakage in Water Distribution Systems', *Alexandria Engineering Journal*, 56(4). DOI: 10.1016/j.aej.2017.07.008.
- Schwaller, J. i van Zyl, J.E. (2015) 'Modeling the Pressure-Leakage Response of Water Distribution Systems Based on Individual Leak Behavior', *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(5), 04014089. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000984.
- Schwaller, J., Van Zyl, J.E. i Kabaasha, A.M. (2015) 'Characterising the Pressure-Leakage Response of Pipe Networks Using the FAVAD Equation', *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(6), str. 1373–1382. DOI: 10.2166/ws.2015.101.
- Sebbagh, K., Safri, A. i Zabot, M. (2018) 'Pre-Localization Approach of Leaks on a Water Distribution Network by Optimization of the Hydraulic Model Using an Evolutionary Algorithm', *3rd EWaS International Conference on "Insights on the Water-Energy-Food Nexus"*, 588. DOI: 10.3390/proceedings2110588.
- Sharma, A.N., Dongre, S.R. i Gupta, R. (2023) 'Many-objective optimisation tool for the design of district metered areas in pumped water distribution networks', *Water Supply*, 23(9), str. 3789–3804. DOI: 10.2166/ws.2023.232.
- Sousa, D.P., Du, R., da Silva Jr., J.M.B., Cavalcante, C.C. i Fischione, C. (2023) 'Leakage detection in water distribution networks using machine-learning strategies', *Water Supply*, 23(3), str. 1115–1126. DOI: 10.2166/ws.2023.054.
- Spearman, C. (1904) 'The Proof and Measurement of Association between Two Things', *The American Journal of Psychology*, 15(1), str. 72–101. DOI: 10.2307/1412159.
- Stone, M. (1974) 'Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions', *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 36(2), str. 111–147. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x.
- Taghlabi, F., Sour, L. i Agoumi, A. (2020) 'Prelocalization and Leak Detection in Drinking Water Distribution Networks Using Modeling-Based Algorithms: A Case Study for the City of Casablanca (Morocco)', *Drink. Water Eng. Sci*, 13, str. 29–41. DOI: 10.5194/dwes-13-29-2020.
- Thornton, J. (2003) 'Managing Leakage by Managing Pressure', *Water21 (IWA Water Loss Task Force series, 3rd article)*, listopad, str. 43–44.

- Tibshirani, R. (1996) 'Regression Shrinkage and Selection via the Lasso', *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 58(1), str. 267–288. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x.
- Tuhovcak, L., Suchacek, T. i Rucka, J. (2018) 'The Dependence of Water Consumption on the Pressure Conditions and Sensitivity Analysis of the Input Parameters', *3rd EWaS International Conference on "Insights on the Water-Energy-Food Nexus"*, 592. DOI: 10.3390/proceedings2110592.
- Van Zyl, J.E. (2014) 'Theoretical Modeling of Pressure and Leakage in Water Distribution Systems', *Procedia Engineering*, 89. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.187.
- van Zyl, J.E. i Cassa, A.M. (2014) 'Modeling Elastically Deforming Leaks in Water Distribution Pipes', *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), str. 182–189. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000813.
- Van Zyl, J.E. i Clayton, C.R.I. (2007) 'The Effect of Pressure on Leakage in Water Distribution Systems', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 160(2), str. 109–114. DOI: 10.1680/wama.2007.160.2.109.
- van Zyl, J.E., Lambert, A.O. i Collins, R. (2017) 'Realistic Modeling of Leakage and Intrusion Flows through Leak Openings in Pipes', *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 04017030. DOI: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001346.
- Van Zyl, J.E. i Malde, R. (2017) 'Evaluating the Pressure-Leakage Behaviour of Leaks in Water Pipes', *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 66(5), str. 287–299. DOI: 10.2166/AQUA.2017.136.
- Vovk, V., Gammerman, A. i Shafer, G. (2005) *Algorithmic Learning in a Random World*. Springer. DOI: 10.1007/b106715.
- Vries, D., Van Den Akker, B., Vonk, E., De Jong, W. i Van Summeren, J. (2016) 'Application of Machine Learning Techniques to Predict Anomalies in Water Supply Networks', *Water Science and Technology: Water Supply*, 16(6). DOI: 10.2166/ws.2016.062.
- Wang, H., Liu, T. i Zhang, L. (2023) 'Pipeline-Burst Detection on Imbalanced Data for Water Supply Networks', *Water (Switzerland)*, 15(9). DOI: 10.3390/w15091662.
- Willmott, C.J. i Matsuura, K. (2005) 'Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance', *Climate Research*, 30(1), str. 79–82. DOI: 10.3354/cr030079.

- Winarni, W. (2009) 'Infrastructure Leakage Index (ILI) as Water Losses Indicator', *Civil Engineering Dimension*, 11(2), str. 126–134.
- Yussif, A.M., Sadeghi, H. i Zayed, T. (2023) 'Application of Machine Learning for Leak Localization in Water Supply Networks', *Buildings*, 13(4). DOI: 10.3390/buildings13040849.
- Zhang, B., Zhang, J. i Xiong, J. (2024) 'Leakage assessment of water supply networks in a university based on WB-Easy Calc and night minimum flow: a case study in Xi'an', *Water Supply*, 24(8), str. 2781–2796. DOI: 10.2166/ws.2024.163.
- Zheng, C., Gao, J. i He, W. (2016) 'Leakage Discharge Separation from the Total Water Supply Flow in Water Distribution System by Constrained Independent Component Analysis (CICA)', *Water Science and Technology: Water Supply*, 16(3), str. 611–619. DOI: 10.2166/ws.2015.169.
- Zuñiga-Uribe, M., Rojas-Galván, R., Álvarez-Alvarado, J.M., Aviles, M., Pérez-Soto, G.I. i Pérez-Moreno, V. (2026) 'Artificial Intelligence in Water Distribution Networks: A Systematic Review of Models, Input Variables, Databases, and Output Strategies for Leak Detection', *Smart Cities*, 9(3), 45. DOI: 10.3390/smartcities9030045.

Životopis

[FOTOGRAFIJA]

Igor Dundović rođen je 24. lipnja 1983. u Osijeku. Prirodoslovno-matematičku gimnaziju u Osijeku završio je 2002. godine i iste godine upisao Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, na kojem je u akademskoj godini 2010./2011. stekao zvanje diplomiranog inženjera građevinarstva. Pedagoško-psihološko-didaktičko-metodičku izobrazbu završio je 2011./2012. na Filozofskom fakultetu u Osijeku. Poslijediplomski specijalistički studij Građevinarstvo, smjer Zaštita okoliša u građevinarstvu, završio je 2017. godine obranom specijalističkog rada „Model optimizacije tlakova u svrhu smanjenja vodnih gubitaka u vodoopskrbnom sustavu“ (Dundović, 2017), a u akademskoj godini 2017./2018. upisao je Poslijediplomski sveučilišni studij Građevinarstvo, modul Hidrotehnika, na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek, u sklopu kojega je izrađena ova disertacija.

Stručni ispit za obavljanje poslova prostornog uređenja i graditeljstva položio je 2014. godine i iste godine postao ovlašteni inženjer građevinarstva i član Hrvatske komore inženjera građevinarstva, u kojoj vodi radnu skupinu za vodne gubitke pri Hidrotehničkom odjelu. Stručno se usavršavao u području hidrauličkog modeliranja vodoopskrbnih sustava i analize vodnih gubitaka (Bentley Institute, Exton, SAD, 2015.; ovlašteni predavač Bentley Systems za OpenFlows WaterGEMS, 2023.–2024.) te u upravljanju ugovorima o građenju prema FIDIC-ovim uvjetima ugovora (modul 4, 2015.). Član je Specijalističke skupine za vodne gubitke Međunarodne vodne udruge (IWA Water Loss Specialist Group), u kojoj obnaša dužnosti člana upravnog odbora i koordinatora inicijativa.

Profesionalnu karijeru započeo je u studenom 2008. u projektantskom i inženjerskom društvu Hidroing d.o.o. Osijek, u kojem je do veljače 2023., od 2017. kao voditelj projekata, radio na projektiranju i stručnom nadzoru hidrotehničkih građevina, hidrauličkom modeliranju, pripremi i provedbi mjernih kampanja te izradi studija izvodljivosti i planova razvoja vodoopskrbnih sustava. Od 2023. djeluje samostalno kao konzultant za vodoopskrbne sustave u vlastitom obrtu Hidromodel. Kao stručnjak za hidrauličko modeliranje sudjeluje u projektima smanjenja vodnih gubitaka temeljenima na učinku koje provodi Miya Water — u Addis Abebi (Etiopija, 2022.–2026., financiranje Svjetske banke) i u vodoopskrbnom sustavu Suva–Nausori (Fidži, od 2025., financiranje Azijske razvojne banke).

Od listopada 2025. sudjeluje u nastavi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao asistent na sveučilišnom specijalističkom studiju Upravljanje vodnim gubicima. Prethodno je predavao stručne predmete iz građevinarstva na Pučkom otvorenom učilištu Obris u Osijeku (2012.–2020.) i vodio obuku za računalno projektiranje (2003.–2012.). Sudjelovao je na više od dvadeset stručnih i znanstvenih skupova u zemlji i inozemstvu. Govori engleski (C1) i njemački (B1–B2) jezik.