



Universitatea
Transilvania
din Brașov

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor

Ing. Vlad COJANU

Monitorizarea și controlul indicatorilor de performanță din sistemul urban de alimentare cu apă potabilă

Monitoring and control of performance indicators in the urban drinking water supply system

REZUMAT

Conducător științific:

Prof. Dr. Ing. Elena HELEREA

BRAȘOV, 2025

Mulțumiri

În primul rând, doresc să îmi exprim profunda gratitudine față de conducătorul meu de doctorat, doamna Prof. Dr. Ing. Elena HELEREA, pentru perseverența, profesionalismul și competența remarcabilă demonstrate pe parcursul întregii perioade de cercetare și redactare a acestei teze de doctorat. Îi mulțumesc pentru răbdarea, exigența științifică și îndrumarea constantă oferite în toate etapele: de la elaborarea cadrului conceptual, desfășurarea experimentelor, până la redactarea și publicarea rezultatelor. Rigoarea sa academică, viziunea interdisciplinară și experiența vastă în domeniul ingineriei au constituit un sprijin esențial în dezvoltarea acestei lucrări. Abordarea riguroasă și încurajarea unui demers științific interdisciplinar au contribuit semnificativ la progresul meu intelectual și profesional.

Adresez mulțumiri deosebite membrilor comisiei de îndrumare științifică: Prof. Dr. Ing. Gheorghe MANOLEA, Prof. Dr. Ing. Aurel FRATU, Prof. Dr. Ing. Paul BORZA și Șef lucr. Dr. Ing. Marius Daniel CALIN, pentru sugestiile științifice valoroase, comentariile constructive și disponibilitatea de a sprijini îmbunătățirea calității acestei teze intitulate *„Monitorizarea și controlul indicatorilor de performanță din sistemul urban de alimentare cu apă potabilă”*. Aprecierile, observațiile critice și recomandările domniilor lor au contribuit semnificativ la consolidarea fundamentului metodologic și experimental al cercetării.

Exprim, de asemenea, recunoștința mea sinceră tuturor celor care au sprijinit realizarea campaniilor de măsurători, activitate esențială în cadrul acestei cercetări. Le mulțumesc operatorilor economici din sectorul de apă și canalizare pentru deschiderea instituțională și colaborarea profesionistă, personalului tehnic și de operare pentru sprijinul logistic și disponibilitatea în teren, precum și colegilor mei din cadrul Facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, dar și celor din alte facultăți ale Universității Transilvania din Brașov, pentru asistența oferită în configurarea, instalarea și monitorizarea sistemelor experimentale. Contribuția acestor colaboratori a fost indispensabilă în colectarea și validarea datelor necesare pentru consolidarea bazei experimentale a lucrării.

Le mulțumesc, în egală măsură, tuturor coautorilor implicați în lucrările științifice publicate în perioada desfășurării doctoratului. Contribuțiile lor valoroase au susținut efortul comun de diseminare a rezultatelor și au avut un impact direct asupra calității și vizibilității cercetării întreprinse.

În final, exprim întreaga mea recunoștință față de familia mea, pentru susținerea emoțională necondiționată, înțelegerea, răbdarea și încurajările constante, chiar și în momentele dificile sau în fața obstacolelor inerente procesului de cercetare. Fără sprijinul lor afectiv și moral, acest demers nu ar fi putut fi dus la bun sfârșit.

Cercetarea doctorală a reprezentat o experiență complexă, caracterizată prin provocări științifice substanțiale, dar și prin satisfacții intelectuale deosebite. A fost un proces formativ de maturizare profesională, prin care am dobândit cunoștințe aprofundate și am stabilit colaborări academice durabile. Tutoeur celor care au contribuit în mod direct sau indirect la realizarea acestei teze, le adresez mulțumiri sincere și aprecierea mea deplină.

Vlad COJANU

CUPRINS

	Pag. teză	Pag. rezumat
Listă abrevieri:	7	
Listă figurilor	9	
Lista tabelelor	11	
1. Introducere	13	4
1.1. Necesitatea și justificarea tezei	13	4
1.2. Scopul tezei și obiective	14	5
1.3. Metodologia cercetării	14	5
1.4. Conținutul tezei	15	6
1.5. Importanța cercetării și noi direcții	18	6
2. Analiza sistemelor urbane de alimentare cu apă	19	6
2.1. Elemente introductive	19	6
2.2. Analiza sistemelor de alimentare cu apă a așezărilor umane	19	7
2.3. Analiza particularităților sistemelor moderne urbane de alimentare cu apă	23	7
2.4. Provocări actuale în domeniul alimentării cu apă	25	8
2.5. Analiza sistemelor urbane de alimentare cu apă din punct de vedere energetic	28	9
2.5.1. Evoluția cererii și consumului de apă și energie	28	9
2.5.2. Modele integrate pentru descrierea dependenței consumurilor de apă și energie	30	9
2.5.3. Analiza factorilor care influențează conexiunea apă- energie	32	10
2.6. Analiza politicilor de mediu și tranziția energetică	35	11
2.7. Concluzii	39	12
3. Contribuții privind monitorizarea și controlul în sistemele urbane de alimentare cu apă	41	12
3.1. Elemente introductive	41	12
3.2. Indicatori de monitorizare a performanței	41	12
3.2.1. Analiza integrată a performanței sistemului	42	13
3.2.2. Definirea și caracterizarea claselor de indicatori	44	13
3.2.3. Eficiența energetică și indicatori specifici	49	16
3.3. Propuneri privind monitorizarea sistemelor urbane de alimentare cu apă	52	18
3.3.1. Capabilități la sistemele SCADA	52	18
3.3.2. Structura sistemului SCADA la sistemele de alimentare cu apă din Brașov	58	18
3.3.3. Problematika implementării sistemelor SCADA	62	18
3.4. Aplicații și studii de caz	64	18

3.4.1. Analiza variației indicatorilor de calitate ai apei potabile	64	18
3.4.2. Studiu de caz - consumul de apă pentru alimentarea hidranților exteriori	65	20
3.4.3. Studiu comparativ al indicatorilor energetici pentru două stații de pompare a apei	68	21
3.5. Concluzii	79	27
4. Contribuții privind creșterea eficienței energetice la stații de pompare a apei	81	27
4.1. Elemente introductive	81	27
4.2. Analiza caracteristicilor de performanță și a randamentului la unitățile de pompare	81	28
4.2.1. Analiza fluxului energetic la unitățile de pompare apă	81	28
4.2.2. Analiza performanței și pierderilor în pompa centrifugă și cuplajul motor-pompă	82	28
4.2.3. Analiza pierderilor în sistemul de alimentare și acționare electrică a pompei	85	30
4.2.4. Randamentul unității de pompare – Discuții și perspective	89	32
4.3. Determinarea consumului de energie și a intensității energetice la stația de pompe Măgurele	91	32
4.3.1. Descrierea stației de pompare apă	91	32
4.3.2. Analiza calității energiei cu măsurători locale	94	34
4.3.3. Analiza consumului de energie electrică pentru anul 2024	102	40
4.3.4. Determinarea intensității energetice	108	44
4.4. Bilanțul energetic orar pentru unitatea de pompare UP1	115	49
4.5. Propuneri privind utilizarea simulării numerice pentru evaluarea eficienței electroenergetice la stații de pompare a apei	121	52
4.5.1. Strategii de analiză a pierderilor utilizând softul NEPLAN	121	52
4.5.2. Stabilirea circulației de putere și a pierderilor cu softul NEPLAN	122	53
4.5.3. Analiză și propuneri	131	57
4.6. Concluzii	133	59
5. Concluzii finale privind cercetarea, contribuții științifice, aplicabilitatea rezultatelor și perspective de dezvoltare viitoare	135	60
5.1. Concluzii finale	135	60
5.2. Contribuții științifice și elemente de originalitate aduse prin cercetare	139	62
5.3. Valorificarea rezultatelor cercetării	140	63
5.4. Direcții viitoare de cercetare	141	63
Listă de referințe:	142	63
Anexe	149	
Lista lucrărilor publicate	206	
Declarație de Originalitate Statement of Originality	207	

1. Introducere

1.1. Necesitatea și justificarea tezei

În contextul urbanizării accelerate, al presiunii asupra resurselor naturale și al schimbărilor climatice, sistemele urbane de alimentare cu apă trebuie să asigure fiabilitate, sustenabilitate și eficiență energetică. Acestea reprezintă infrastructuri critice, esențiale pentru sănătatea publică și funcționarea coerentă a mediului urban.

Tranziția energetică și principiile dezvoltării durabile impun o reconceptualizare a modului de gestionare a acestor sisteme, cu accent pe integrarea surselor regenerabile, digitalizare și optimizarea consumului de resurse. Monitorizarea indicatorilor de performanță devine un instrument central în acest proces, mai ales în evaluarea relației apă–energie (Water-Energy Nexus).

Sistemele de pompare, fiind cei mai mari consumatori de energie, necesită evaluări precise ale intensității energetice și ale randamentului operațional al acestora. Analiza acestor parametri permite optimizarea funcționării și reducerea costurilor.

Proiectul de cercetare se înscrie în programul Orizont Europa (2021–2027), vizând dezvoltarea de soluții tehnologice avansate pentru infrastructuri inteligente și sustenabile, cu aplicabilitate industrială și relevanță strategică la nivel european.

1.2. Scopul tezei și obiective

În acest context complex, prezenta teză de doctorat își propune să contribuie la optimizarea performanțelor sistemelor urbane de alimentare cu apă potabilă, prin monitorizarea și controlul avansat al indicatorilor de performanță, cu accent pe eficiența energetică și interdependența critică dintre resursele de apă și energie.

Obiectivul general al lucrării constă în îmbunătățirea performanțelor sistemului urban de alimentare cu apă potabilă în perioada de tranziție energetică, în vederea stimulării eforturilor integrate pentru atingerea obiectivelor de dezvoltare durabilă.

Acest obiectiv este abordat printr-un demers științific riguros, fundamentat pe analiză sistemică, modelare operațională și integrarea soluțiilor digitale pentru control și eficientizare a infrastructurii critice de apă.

În vederea realizării acestui obiectiv general, cercetarea a fost structurată pe patru obiective specifice majore:

Obiectivul specific 1: Stabilirea caracteristicilor tehnico-funcționale și operaționale ale sistemului urban de alimentare cu apă ca parte a infrastructurii critice și analiza relației dinamice apă–energie.

Obiectivul specific 2: Dezvoltarea și implementarea unui sistem de monitorizare a indicatorilor de performanță și siguranță în exploatare, prin integrarea tehnologiei SCADA.

Obiectivul specific 3: Formularea de strategii pentru creșterea eficienței energetice a principalilor consumatori de energie din cadrul sistemului urban de apă, în special stațiile de pompare.

Obiectivul specific 4: Îmbunătățirea managementului integrat al sistemului de alimentare cu apă, prin consolidarea legăturii cu alte infrastructuri critice, în special în ceea ce privește intervențiile în situații de urgență (ex. stingerea incendiilor).

1.3. Metodologia cercetării

Cercetarea a integrat componente teoretice și experimentale într-un demers științific fundamentat pe analiza sistemică și modelarea operațională, cu scopul evaluării performanței energetice a sistemelor urbane de alimentare cu apă potabilă, accentul fiind pus pe subsistemele de pompare.

Această abordare a permis validarea ipotezelor prin date experimentale obținute în condiții reale de funcționare, în cadrul a două sisteme gestionate de operatori locali din municipiul Brașov.

Demersul teoretic a inclus o analiză extinsă a literaturii naționale și internaționale privind relația apă–energie, eficiența proceselor de pompare, metodologia de evaluare a performanței hidraulice și relevanța infrastructurii de apă în contextul urban. Au fost analizate modele de calcul, standarde și reglementări în domeniul eficienței energetice.

Partea experimentală s-a desfășurat în colaborare cu echipele tehnice ale operatorilor, implicând măsurători directe și adaptarea metodologiei la realitățile operaționale ale sistemelor. Validarea datelor a fost susținută de interacțiunea permanentă cu comisia de îndrumare și factorii decizionali, contribuind la optimizarea metodologică și la creșterea relevanței aplicative.

Cercetarea s-a desfășurat în cadrul unui program doctoral interdisciplinar și a oferit o bază solidă pentru dezvoltarea unei metodologii standardizate de evaluare energetică, orientată spre identificarea strategiilor eficiente de optimizare a consumului în subsistemele de pompare, în conformitate cu obiectivele actuale de sustenabilitate și reziliență a infrastructurii critice.

1.4. Conținutul tezei

Teza de doctorat este structurată în cinci capitole, incluzând 81 de figuri, 25 de tabele și 123 de referințe bibliografice.

Capitolul 1, „Introducere”, prezintă motivația științifică, scopul general și obiectivele specifice ale cercetării, axate pe tranziția energetică, schimbările climatice și creșterea cererii urbane. Este detaliată metodologia mixtă – teoretică (analiza relației apă–energie și tehnologii emergente) și experimentală (monitorizarea și validarea în teren).

Capitolul 2, „Analiza sistemelor urbane de alimentare cu apă”, descrie infrastructura de apă din perspectivă istorică, tehnologică și ecologică. Sunt descrise componentele funcționale și cerințele de eficiență, calitate și securitate. Este evidențiată relația apă–energie (Water-Energy Nexus) prin modele analitice precum Mega-System Model. Capitolul include și o analiză a direcțiilor strategice în politicile de mediu și tranziția energetică.

Capitolul 3, „Contribuții privind monitorizarea și controlul în sistemele urbane de alimentare cu apă”, propune un cadru teoretic și aplicativ pentru integrarea tehnologiilor moderne de automatizare și evaluarea performanței. Sunt definiți unsprezece indicatori energetici (EI1–EI11) și sunt descrise funcționalitățile SCADA, inclusiv evoluția arhitecturală și cerințele de securitate cibernetică. Trei studii de caz în municipiul Brașov validează cadrul propus.

Capitolul 4, „Contribuții privind creșterea eficienței energetice la stații de pompare a apei”, detaliază analiza tehnico-economică a stației de pompe Măgurele. Se fundamentează necesitatea unui model predictiv de optimizare a consumului energetic. Sunt analizate curbele pompelor, randamentele componentelor electrice și pierderile energetice. Aplicația practică pe datele SCADA din 2024 evidențiază intervalele de eficiență scăzută și propune măsuri tehnologice de optimizare.

Prin integrarea contribuțiilor teoretice, experimentale și aplicative, teza oferă soluții concrete pentru creșterea eficienței energetice și a rezilienței infrastructurii urbane de alimentare cu apă.

1.5. Importanța cercetării și noi direcții

Rețelele urbane de distribuție a apei potabile constituie infrastructuri critice, a căror eficiență energetică influențează sănătatea publică, capacitatea de reacție în situații de urgență și reducerea impactului ecologic. Reducerea concomitentă a pierderilor hidraulice și a consumului energetic în stațiile de pompare este esențială pentru atingerea obiectivelor de dezvoltare durabilă.

Integrarea sistemelor SCADA cu monitorizare avansată, modelare predictivă și indicatori de performanță permite optimizarea în timp real a operării, prin reducerea consumului specific de energie și a pierderilor de apă.

Perspectivile de cercetare includ utilizarea inteligenței artificiale în platformele SCADA pentru detectarea anomaliilor, prognoza cererii și reglarea automată a funcționării pompelor. Totodată, se impune standardizarea metodologiilor de evaluare continuă a eficienței energetice la toate nivelurile sistemului.

Securitatea cibernetică și reziliența operațională necesită arhitecturi edge–cloud redundante, comunicații criptate și sisteme de date distribuite integrate cu blockchain, pentru asigurarea trasabilității și auditabilității. Modelele explicabile devin indispensabile pentru transparența și validarea deciziilor automatizate.

2. Analiza sistemelor urbane de alimentare cu apă

2.1. Elemente introductive

Sistemele urbane de alimentare cu apă sunt infrastructuri critice care furnizează apă potabilă și sprijină siguranța publică, inclusiv prin stingerea incendiilor. Acestea au evoluat semnificativ, dar se confruntă cu provocări precum creșterea cererii, calitatea scăzută a resurselor, pierderile din rețea și consumul mare de energie. Conceptul Water-Energy Nexus subliniază interdependența dintre apă și energie, promovând o abordare integrată pentru optimizare. Studiul analizează strategiile de modernizare, incluzând tehnologii digitale (SCADA, senzori, analize predictive) și surse regenerabile, pentru a crește eficiența, a reduce impactul asupra mediului și a consolida reziliența acestor sisteme

2.2. Analiza sistemelor de alimentare cu apă a așezărilor umane

Încă din Antichitate, așezările umane s-au dezvoltat în proximitatea surselor de apă, existând o legătură directă între evoluția civilizațiilor și accesul la resurse hidrice. Primele sisteme centralizate din Europa datează din epoca bronzului, iar civilizațiile greacă și romană au construit rețele avansate, bazate pe apeducte și rezervoare, remarcabil de eficiente, așa cum demonstrează studii recente, inclusiv cel dedicat orașului Perge.

În perioada modernă, alimentarea cu apă a evoluat spre sisteme centralizate, susținute de pompe, conducte metalice și stații de tratare, dezvoltarea fiind accelerată de Revoluția industrială. În România, infrastructura hidraulică are origini dacice, extinse în epoca romană, iar în secolul al XIX-lea, orașe precum București și Brașov au introdus rețele moderne, continuu extinse. În prezent, Bucureștiul este deservit de trei uzine principale, dotate cu tehnologii avansate de tratare.

Sistemele actuale, automatizate prin SCADA și IoT, oferă eficiență sporită, dar sunt vulnerabile la riscuri energetice și cibernetică, impunând o administrare sustenabilă și investiții constante pentru menținerea accesului sigur la apă potabilă.

2.3. Analiza particularităților sistemelor moderne urbane de alimentare cu apă

Sistemele moderne de alimentare cu apă sunt rețele funcțional integrate, concepute pentru furnizarea constantă de apă potabilă, destinată consumului uman și utilizării alimentare.

Ele susțin sănătatea publică, igiena urbană, procesele industriale și siguranța la incendiu, asigurând presiunea și debitul necesar rețelelor de stingere. Prin rolul lor esențial în infrastructura urbană, contribuie la reziliența comunităților și funcționarea serviciilor vitale.

Totodată, aceste rețele sprijină coeziunea socială și securitatea urbană, justificând necesitatea unei planificări strategice, întrețineri preventive și investiții continue, în acord cu principiile dezvoltării durabile și ale managementului riscurilor.

Sistemele urbane de alimentare cu apă potabilă cuprind totalitatea elementelor interconectate ce au rolul de a produce, a trata, a transporta și a distribui apa la consumatorii dintr-o zonă urbană [12].

Cerințele fundamentale în proiectarea și funcționarea unui sistem urban de alimentare cu apă sunt sistematizate în Tabelul 2.1.

Tabel 2.1. Cerințe fundamentale pentru sistemele urbane de alimentare cu apă

Nr. crt.	Cerință	Descriere
1	Asigurarea sursei adecvate	O sursă sigură, sustenabilă și suficientă pentru a acoperi nevoile de consum ale populației urbane.
2	Respectarea calității apei	Eliminarea impurităților fizice, chimice și biologice pentru a îndeplini standardele de sănătate publică.
3	Continuitatea furnizării apei	Disponibilitatea constantă a apei, inclusiv în perioade de vârf de consum sau în situații de urgență.
4	Eficiență	Minimizarea pierderilor de apă și energie printr-o infrastructură modernă, monitorizare activă și întreținere preventivă.
5	Sustenabilitatea utilizării resurselor	Exploatarea responsabilă a resurselor de apă fără a compromite ecosistemele și rezervele naturale.
6	Reziliența la factori externi	Capacitatea de a funcționa în condiții extreme: cutremure, inundații, secetă, defecțiuni sau atacuri cibernetice.
7	Integrarea tehnologiilor moderne	Utilizarea sistemelor inteligente (ex. SCADA, IoT) pentru monitorizare în timp real, control eficient și adaptabilitate operațională.
8	Acces echitabil pentru toți utilizatorii	Asigurarea accesului la apă potabilă indiferent de poziția geografică sau statutul socio-economic, promovând echitatea și incluziunea socială.

Un sistem durabil de alimentare cu apă trebuie să echilibreze cererea populației urbane în creștere cu disponibilitatea resurselor, conform principiilor de la Dublin și Raportului Brundtland. Subliniind importanța accesului echitabil și eficient la resurse, Obiectivele de Dezvoltare Durabilă ale ONU susțin acest demers. Integrarea sustenabilității implică reducerea consumului energetic și adoptarea unor soluții tehnico-economice și de mediu adaptate contextului local. Sistemele de alimentare cu apă funcționează astfel ca infrastructuri critice, care gestionează procesele de captare, tratare, transport și distribuție într-un mod eficient (Fig. 2.3).

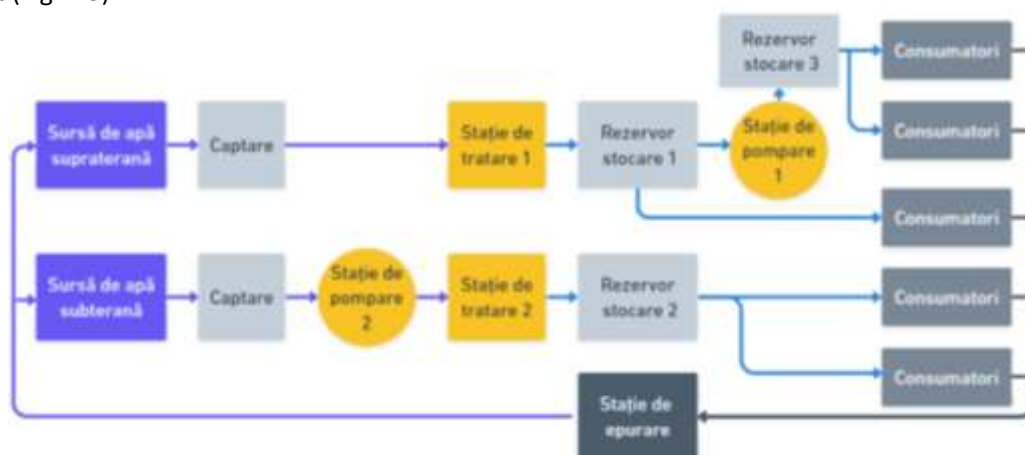


Fig. 2.3. Schema bloc a sistemului urban de alimentare cu apă

Sistemul urban de alimentare cu apă cuprinde procese integrate care asigură captarea, tratarea, stocarea și distribuția continuă și sigură a apei potabile. Captarea se realizează din surse de suprațery sau subterane, urmată de tratarea secvențială a apei brute (coagulare, filtrare, dezinfecție) pentru a respecta standardele de potabilitate, iar distribuția se efectuează prin rețele automatizate, cu stocare intermediară în rezervoare de compensare. Pe lângă funcția principală, sistemul sprijină siguranța publică prin alimentarea hidranților pentru stingerea incendiilor.

2.4. Provocări actuale în domeniul alimentării cu apă

Sistemele urbane de alimentare cu apă sunt esențiale pentru sustenabilitatea orașelor, însă se confruntă cu probleme majore precum uzura infrastructurii, creșterea inegală a cererii și eficiența energetică scăzută, amplificate de schimbările climatice și presiunea demografică [17], [19]. Lipsa accesului la apă potabilă afectează încă peste 2,2 miliarde de persoane [18], iar urbanizarea intensifică pierderile din rețele și degradarea calității apei [20], în timp ce suprapompările și poluarea agricolă contribuie la scăderea nivelului freatic și contaminarea resurselor [21], [23]. Ecosistemele acvatice suferă pierderi semnificative de biodiversitate din cauza dezechilibrelor hidrologice și poluării [24], [25], iar fenomenele climatice extreme accentuează aceste efecte [22]. În plus, inegalitățile sociale și infrastructura deficitară din zonele rurale impun adoptarea unor modele sustenabile și reziliente de gestionare a resurselor de apă [26], [27].

Pierderile de apă și furturile din rețelele urbane, care pot atinge până la 30% din volumul total transportat, determină o creștere semnificativă a consumului energetic, cu până la 30% [28]. Gestionarea durabilă a resurselor hidrice impune o abordare integrată, ce include tehnologii inovatoare precum desalinizarea, tratarea apelor reziduale și utilizarea inteligenței artificiale pentru monitorizarea și optimizarea rețelelor [29]. Succesul acestor măsuri depinde de politici publice coerente, investiții susținute și educația populației [27]. În contextul presiunilor climatice și al urbanizării, sunt necesare intervenții complexe privind accesul la apă, gestionarea apelor uzate și prevenirea bolilor hidraulice [30], [31]. Așadar, soluțiile eficiente și reziliente, alături de o guvernare responsabilă, sunt esențiale pentru protejarea apei ca resursă strategică și pentru asigurarea sustenabilității pe termen lung.

2.5. Analiza sistemelor urbane de alimentare cu apă din punct de vedere energetic

Sistemele urbane de alimentare cu apă sunt intrinsec legate de sectorul energetic, întrucât procesele de captare, tratare și distribuție necesită un consum energetic substanțial. Această interdependență, definită prin conceptul de Water-Energy Nexus (WEN), are un impact direct asupra sustenabilității infrastructurii urbane. Prezenta secțiune examinează evoluția consumului de apă și energie, introduce modele conceptuale relevante și identifică factorii determinanți ai acestei relații, subliniind importanța soluțiilor sustenabile și a tehnologiilor emergente în creșterea eficienței sistemelor.

2.5.1. Evoluția cererii și consumului de apă și energie

Consumul global de apă și energie a crescut semnificativ, ca urmare a urbanizării, dezvoltării economice și expansiunii industriale, intensificând presiunea asupra resurselor și infrastructurilor. Analiza interdependenței apă-energie oferă soluții pentru utilizarea sustenabilă a acestor resurse [32]. Între 1901 și 2014, consumul de apă a crescut de la sub 1 trilion m³ la aproximativ 4 trilioane m³, în paralel cu o creștere marcată a consumului energetic, în special în Asia, alimentată preponderent din surse fosile.

Interdependența apă-energie se manifestă bidirecțional: apa este esențială pentru producția de energie, iar energia este necesară pentru captarea, tratarea și distribuția apei. Această relație reflectă o dependență structurală între cele două sectoare, cu implicații majore asupra sustenabilității. În 2023, consumul global de energie a depășit 15.000 milioane tone echivalent combustibil, dominat de surse convenționale precum petrolul, cărbunele și biomasa.

Urbanizarea, prin densitatea ridicată a populației, generează aproximativ 45–55% din consumul global de energie [33]. Schimbările climatice amplifică dezechilibrele între cererea și disponibilitatea resurselor, afectând infrastructurile existente. Până în 2050, se estimează o creștere cu 50% a cererii globale de energie și o intensificare a extracției de apă, mai ales în țările în curs de dezvoltare [35].

Pentru a gestiona eficient interdependența apă-energie, este necesară adoptarea unor tehnologii avansate: surse regenerabile, sisteme de pompare eficiente, rețele inteligente și soluții de recuperare energetică [36]. Acestea contribuie la reducerea consumului, limitarea pierderilor și protejarea mediului, sprijinind implementarea unui model sustenabil de utilizare a resurselor.

2.5.2. Modele integrate pentru descrierea dependenței consumurilor de apă și energie

Interacțiunea apă-energie este influențată de factori precum creșterea demografică, urbanizarea, dezvoltarea economică și schimbările climatice, care afectează disponibilitatea resurselor și producția

energetică, în special în condiții de secetă [37]. Pentru a înțelege și optimiza această relație, au fost dezvoltate modele analitice precum *Mega-System Model*, care tratează infrastructurile hidrice și energetice ca sisteme interdependente integrate la scară globală, incluzând variabile socio-economice, climatice și tehnologice [38]. Simulările derivate din acest model permit anticiparea vulnerabilităților și formularea de strategii durabile, în special în contextul reducerii resurselor hidrice. Complementar, sistemele inteligente cu senzori și inteligență artificială permit monitorizarea și optimizarea consumului, iar micro-rețelele apă-energie facilitează integrarea surselor regenerabile și eficientizarea funcționării infrastructurii urbane [39]–[41].

Relația apă-energie impune implementarea unor soluții de gestionare integrată, orientate spre sustenabilitate și reziliență. Utilizarea tehnologiilor avansate de răcire în centralele termoelectrice reduce considerabil consumul de apă, iar tranziția către surse regenerabile contribuie la diminuarea presiunii asupra resurselor hidrologice, prin eliminarea necesarului de apă în procesele energetice convenționale. Astfel, adoptarea energiilor regenerabile devine o strategie esențială pentru reducerea consumului de apă și a dependenței de combustibilii fosili [37].

În acest context, modelele avansate de gestionare a conexiunii apă-energie oferă un cadru analitic esențial pentru sprijinirea deciziilor în domeniul infrastructurilor critice (Fig. 2.10).

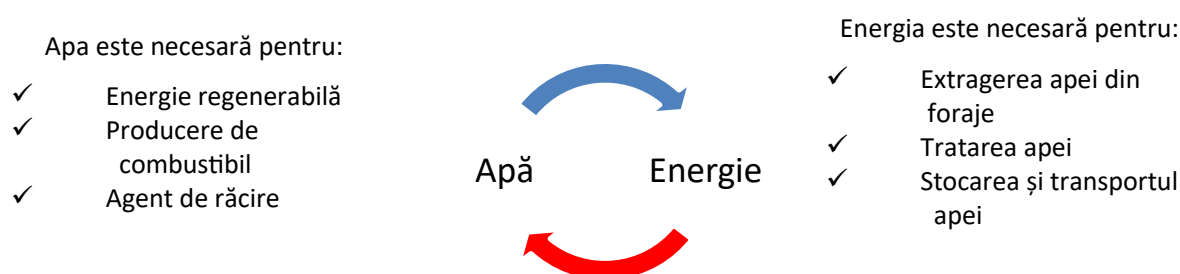


Fig. 2.10. Relația bivalentă între apă și energie

O abordare multidimensională a conexiunii dintre apă și energie permite dezvoltarea unor soluții tehnologice inovatoare pentru reducerea pierderilor de apă și optimizarea consumului. Integrarea micro-rețelelor energetice cu sistemele de distribuție a apei oferă posibilitatea de a echilibra cererea și oferta de resurse într-un mod sustenabil.

Un exemplu aplicativ relevant îl constituie utilizarea unităților virtuale de stocare a energiei în rețelele de distribuție a apei, unde pompele și rezervoarele sunt gestionate pentru a echilibra variațiile de consum și a reduce solicitarea rețelei electrice [42].

În concluzie, conexiunea apă-energie reprezintă un pilon fundamental al dezvoltării sustenabile. Modelele analizate oferă perspective complementare: *Mega-System Model* permite o evaluare integrată a relațiilor dintre apă, energie și utilizarea terenurilor; sistemele inteligente optimizează consumul prin tehnologie digitală; iar modelele integrative susțin o gestionare sustenabilă în contexte urbane și industriale. Aplicarea tehnologiilor avansate și a strategiilor derivate din aceste modele este esențială pentru reducerea impactului ecologic și consolidarea rezilienței energetic.

2.5.3. Analiza factorilor care influențează conexiunea apă-energie

Urbanizarea rapidă și expansiunea orașelor intensifică cererea de apă și energie, amplificând presiunea asupra infrastructurii urbane. În acest context, devin esențiale gestionarea eficientă a resurselor, reducerea pierderilor și optimizarea consumului energetic.

Creșterea suprafețelor construite și a densității populației determină un consum ridicat de apă pentru uz casnic, industrial și municipal, corelat cu o cerere energetică sporită pentru alimentarea gospodăriilor și infrastructurilor urbane. Aceste presiuni cumulate contribuie la creșterea emisiilor de gaze cu efect de seră și la degradarea calității apei, prin evacuarea apelor uzate netratate, contaminarea surselor cu poluanți chimici și reducerea capacității de autoepurare a ecosistemelor, din cauza scăderii debitelor.

Totodată, intensificarea activităților antropice sporește dependența de resurse neregenerabile, accentuând vulnerabilitatea sistemelor urbane de apă și energie [39]. Factorii determinanți ai acestei interacțiuni sunt sintetizați în Fig. 2.12 [39].

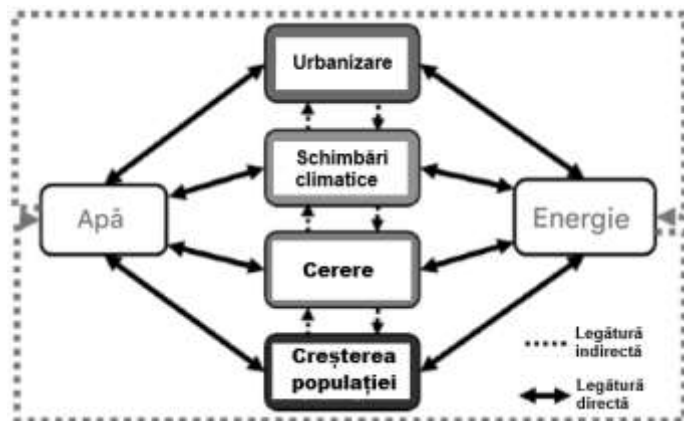


Fig. 2.12. Factori care afectează interacțiunea apă – energie

Schimbările climatice accentuează dezechilibrele din conexiunea apă–energie prin variabilitatea precipitațiilor, temperaturilor extreme și creșterea frecvenței fenomenelor severe, afectând disponibilitatea resurselor hidrice și, implicit, producția de hidroenergie și procesele de răcire din centralele termoelectrice [43].

Urbanizarea rapidă și creșterea demografică amplifică presiunea asupra infrastructurilor, necesitând soluții tehnologice eficiente. Utilizarea pompelor ca turbine (PATs) și zonelor de măsurare districtuală (DMAs) facilitează recuperarea de energie și reducerea pierderilor de apă [44], iar micro-rețelele bazate pe surse regenerabile contribuie la diminuarea dependenței de combustibili fosili [45].

Tehnologiile inteligente, incluzând inteligența artificială și IoT, permit monitorizarea și reglarea automată a fluxurilor de resurse, crescând eficiența operațională [46]. Detectarea scurgerilor și adaptarea consumului sunt esențiale pentru reducerea risipei [39].

Guvernanța urbană, prin politici de eficiență energetică, reutilizarea apei și parteneriate public-private, susține un model circular și sustenabil [47].

În acest context, o abordare integrată a conexiunii apă–energie, bazată pe sustenabilitate, eficiență și reziliență, este esențială. Soluții precum analiza ciclului de viață (LCA), micro-rețelele WEN și modernizarea infrastructurii prin DMAs și senzori IoT [38], [42], [44] sprijină dezvoltarea orașelor într-un mod adaptativ și echilibrat din punct de vedere a dezvoltării durabil [44], [47].

2.6. Analiza politicilor de mediu și tranziția energetică

Sistemele urbane de alimentare cu apă se confruntă cu presiuni tot mai mari din cauza schimbărilor climatice, urbanizării accelerate, infrastructurii învechite și cerințelor de sustenabilitate. Gestionarea eficientă a acestor sisteme impune o abordare integrată care combină politici de mediu, tehnologii avansate și tranziția energetică, prin utilizarea surselor regenerabile, digitalizare (IoT, inteligență artificială) și reciclarea apelor uzate [46], [49], [50]. Modelele descentralizate și sistemele hibride, precum exemplul din Funchal, demonstrează viabilitatea autosuficienței energetice prin valorificarea resurselor locale (fotovoltaic, microhidro, biogaz) [63].

Pentru reducerea pierderilor, consumului energetic și emisiilor, sunt necesare soluții precum controlul inteligent al presiunii, zonarea metrologică, infrastructuri verzi și rețele inteligente, susținute de modele predictive și scenarii climatice avansate [39], [62], [64]. În acest context, integrarea surselor regenerabile în infrastructura hidrotehnică, promovarea economiei circulare și aplicarea tehnologiilor de optimizare multi-obiectiv sprijină atingerea Obiectivelor de Dezvoltare Durabilă (ODD 6 și 7) [60], [65].

Guvernanța intersectorială, colaborarea transfrontalieră și parteneriatele public-private sunt esențiale pentru protejarea resurselor, echitatea accesului și construirea unui model urban sustenabil și rezilient [61],

[66]. Tranziția energetică a sistemelor de apă devine astfel o prioritate strategică în contextul urbanizării globale și al crizelor climatice.

2.7. Concluzii

(1) Sistemele urbane de alimentare cu apă se confruntă cu provocări tot mai complexe, determinate de urbanizarea accelerată, schimbările climatice și presiunea crescută asupra resurselor naturale. În acest context, se impune modernizarea infrastructurilor critice și adoptarea unor strategii sustenabile de gestionare.

(2) Interdependența apă–energie, analizată prin prisma Water-Energy Nexus, evidențiază necesitatea unui management integrat. Energia este indispensabilă proceselor de captare, tratare și distribuție a apei, iar apa joacă un rol esențial în procesele energetice. Modelele conceptuale precum Mega-System și WEN Smart Systems, completate de evaluări Life Cycle Assessment, permit optimizarea resurselor și reducerea impactului ecologic.

(3) Dezechilibrele dintre cerere și ofertă, amplificate de schimbările climatice, cresc riscul operațional, necesitând investiții în digitalizare, eficiență energetică și integrarea surselor regenerabile. Tehnologiile emergente, precum rețelele inteligente, micro-rețelele, sistemele de măsurare avansate și turbinele-pompă (PAT), sporesc eficiența și reziliența sistemelor.

(4) Politicile de mediu și tranziția energetică sunt esențiale pentru susținerea sustenabilității urbane, în conformitate cu Obiectivele de Dezvoltare Durabilă (ODD). Colaborarea dintre autorități, industrie, mediul academic și societatea civilă este crucială pentru implementarea unui model urban adaptiv și responsabil.

(5) Soluțiile descentralizate – precum stațiile locale de reciclare a apei și sistemele autonome de generare a energiei – pot reduce presiunea asupra rețelelor centralizate. Integrarea inteligenței artificiale în procesele decizionale facilitează anticiparea riscurilor și optimizarea resurselor, accelerând tranziția către orașe inteligente și sustenabile.

(6) Gestionarea eficientă a sistemelor de apă necesită o abordare integrată, concentrată pe optimizarea interacțiunii apă–energie. În fața vulnerabilităților sistemice, este imperativă dezvoltarea unor mecanisme avansate de monitorizare și control. Sisteme moderne de tip SCADA și indicatori specifici de performanță pot susține funcționarea eficientă, reducerea consumurilor și anticiparea riscurilor. Capitolul următor prezintă contribuții metodologice și aplicative dedicate acestor direcții, având ca scop consolidarea capacității de răspuns și adaptabilitate a sistemelor urbane de alimentare cu apă.

3. Contribuții privind monitorizarea și controlul în sistemele urbane de alimentare cu apă

3.1. Elemente introductive

Sistemele urbane de apă sunt componente vitale ale infrastructurii orașelor, responsabile pentru distribuția sigură a apei potabile și gestionarea apelor uzate. Acestea necesită soluții avansate de monitorizare și control pentru menținerea calității, optimizarea funcționării și asigurarea siguranței operaționale.

Un rol strategic al acestor sisteme este sprijinirea intervențiilor în situații de urgență, în special în stingerea incendiilor. Prin asigurarea debitului și presiunii necesare, rețeaua de apă contribuie direct la siguranța publică. Proiectarea sistemului include elemente de redundanță, rezervoare tampon și surse alternative, consolidând reziliența infrastructurii.

Acest capitol este structurat în trei secțiuni principale. Prima parte detaliază indicatorii de performanță utilizați pentru evaluarea eficienței operaționale, identificarea disfuncționalităților și susținerea deciziilor de optimizare. A doua parte analizează rolul tehnologiilor SCADA în monitorizarea și controlul în timp real al rețelelor, evidențiind contribuția acestora la creșterea siguranței și eficienței. Ultima parte explorează practici moderne de management, concentrându-se pe reducerea pierderilor, creșterea eficienței energetice și promovarea sustenabilității în administrarea infrastructurii de apă.

3.2. Indicatori de monitorizare a performanței

Monitorizarea performanței, realizată prin indicatori specifici, este crucială pentru evaluarea eficienței hidraulice, a pierderilor de apă și a fiabilității operaționale în sistemele urbane de alimentare cu apă. Acești indicatori oferă operatorilor și organismelor de reglementare un instrument riguros pentru analiza calitativă

și cantitativă a rețelei, sprijinind deciziile tehnice și manageriale. La nivel internațional, modelul IWA propune indicatori tehnici, operaționali, financiari și de calitate a serviciului, în timp ce WAREG, la nivel european, se concentrează pe armonizarea metodologiilor și pe integrarea indicatorilor energetici pentru optimizarea consumurilor și creșterea rezilienței. Astfel, indicatorii de performanță devin fundamentali în procesele de reglementare economică, asigurând corelarea performanței cu politicile tarifare și promovând sustenabilitatea serviciilor publice.

3.2.1. Analiza integrată a performanței sistemului

Evaluarea performanței sistemelor urbane de alimentare cu apă necesită o abordare integrată, care să cuprindă dimensiuni tehnice, economice, ecologice și sociale. Aceasta permite diagnosticarea funcționării rețelei, identificarea vulnerabilităților și orientarea deciziilor strategice.

Energia consumată influențează costurile și amprenta de carbon. Indicatorii principali includ: consumul total specific de energie (kWh/m^3), consumul de energie pentru pompare, emisiile de CO_2 asociate consumului electric. Calitatea apei este evaluată prin: parametri microbiologici (ex. *E. coli*), compoziția chimică (nitrați, metale grele), caracteristici fizice (gust, miros, turbiditate). Performanța operațională este definită prin: continuitatea furnizării, managementul presiunii, volumul de apă nefacturată, rezultat din pierderi tehnice și comerciale. Sustenabilitatea financiară implică: recuperarea costurilor din tarife, eficiența procesului de facturare și colectare, nivelul investițiilor în infrastructură. Impactul ecologic este determinat de: emisiile de gaze cu efect de seră, volumul de apă extras, calitatea apelor uzate evacuate.

Indicatorii principali includ consumul total specific de energie, exprimat ca energie utilizată per unitate de volum de apă tratată și distribuită (kWh/m^3), consumul de energie aferent proceselor de pompare (kWh/m^3), precum și emisiile de dioxid de carbon (CO_2) asociate consumului de energie electrică ($\text{kg CO}_2/\text{kWh}$).

Calitatea apei este apreciată prin analiza parametrilor microbiologici, precum prezența *Escherichia coli* (UFC/100 mL), prin compoziția chimică, incluzând concentrațiile de nitrați (mg/L) și metale grele (mg/L), precum și prin caracteristicile fizice ale apei, cum sunt gustul, mirosul și turbiditatea (NTU).

Performanța operațională se evaluează prin continuitatea furnizării (h/zi), eficiența în managementul presiunii (bar) în cadrul rețelei de distribuție și volumul de apă nefacturată, rezultat din pierderi tehnice și comerciale (m^3 sau % din volumul total distribuit).

Sustenabilitatea financiară presupune recuperarea costurilor prin tarifele aplicate (lei/m^3), eficiența procesului de facturare și colectare (în procente din totalul emiterilor lunare) și nivelul investițiilor în infrastructură (lei/an).

Impactul ecologic este determinat prin emisiile de gaze cu efect de seră ($\text{kg CO}_2/\text{an}$), volumul de apă extras din surse naturale (m^3/an) și calitatea apelor uzate evacuate, evaluată în funcție de parametri precum concentrația de materii în suspensie (mg/L) și cerința biologică de oxigen (mg/L).

Sustenabilitatea socială este reflectată de: accesul populației la rețea, calitatea serviciilor oferite utilizatorilor, gradul de implicare comunitară în luarea deciziilor.

Integrarea acestor componente, utilizând metode multicriteriale precum AHP (Analytic Hierarchy Process), permite o evaluare sintetică a performanței și sprijină fundamentarea deciziilor pentru îmbunătățirea sistemului urban de apă în direcția sustenabilității.

3.2.2. Definirea și caracterizarea claselor de indicatori

Clasele de indicatori de performanță pentru sistemele urbane de apă oferă o structurare sistematică a parametrilor necesari pentru evaluarea funcționalității, eficienței și impactului acestor sisteme, facilitând procesele decizionale în managementul resurselor.

Indicatorii de calitate a apei includ: Calitatea microbiologică – evidențiază prezența agenților patogeni precum *E. coli*, semnalând riscuri de contaminare [70], Calitatea chimică – monitorizează contaminanți precum plumbul, nitrații sau clorul, proveniți din surse industriale sau agricole [71], Calitatea fizică – parametri precum turbiditatea, culoarea și gustul, care influențează acceptabilitatea apei.

Indicatorii de calitate a serviciului vizează: Continuitatea furnizării – măsoară frecvența și durata întreruperilor [72], Managementul presiunii – asigură un debit adecvat și reduce riscul avariilor [73], Timpul de răspuns – reflectă promptitudinea soluționării solicitărilor utilizatorilor [79].

Indicatorii de eficiență operațională includ: Pierderile volumetrice – proporția de apă produsă care nu este facturată, cauzată de pierderi sau erori de măsurare [74], Eficiența energetică – cuantifică energia consumată în procesele operaționale [67], Menținerea – frecvența avariilor și eficiența intervențiilor corective [80].

Indicatorii de performanță financiară se referă la recuperarea costurilor – capacitatea operatorilor de a acoperi cheltuielile curente și de a investi în infrastructură [75].

Acești indicatori oferă o bază coerentă pentru monitorizarea și optimizarea funcționării sistemelor urbane de apă, contribuind la eficiență, durabilitate și siguranță operațională.

Indicatori de eficiență pentru situații de urgență și combaterea incendiilor

Pentru gestionarea situațiilor de urgență, precum incendiile, sistemul urban de alimentare cu apă integrează în rețeaua de distribuție hidranți exteriori, destinați alimentării echipamentelor de intervenție cu apă sub presiune.

Din perspectiva unui sistem dedicat stingerii incendiilor, obiectivul principal este asigurarea unui debit și a unei presiuni care să permită acțiunea rapidă și eficientă de limitare și stingere a focurilor.

Având însă în vedere constrângerile tot mai frecvente privind starea infrastructurii urbane de apă, respectiv pierderile din rețea, variațiile de presiune și consumul energetic asociat transportului apei, se impune o abordare care să includă indicatori de performanță specifici:

- Consum lunar de apă pentru combaterea incendiilor- Reprezintă volumul de apă consumat într-o lună pentru combaterea incendiilor în zona studiată:

$$Cl_{HE} = \sum_{i=1}^N Vi_{zilnic} \quad (3.1)$$

unde Vi_{zilnic} reprezintă volumul de apă consumat zilnic;

- Consum anual de apă pentru combaterea incendiilor - reprezintă volumul de apă consumat într-un an pentru combaterea incendiilor în zona studiată:

$$Ca_{HE} = \sum_{i=1}^N Vi_{lunar} \quad (3.2)$$

unde Vi_{lunar} reprezintă volumul de apă consumat lunar;

- Consum specific - reprezintă volumul de apă consumat lunar raportat la 1000 de locuitori în zona studiată:

$$Cs_{HE} = \frac{Cl_{HE}}{1000} \quad (3.3)$$

unde Cl_{HE} reprezintă consumul lunar specific de apă pentru combaterea incendiilor;

- Timp maxim de utilizare a hidranților exteriori - reprezintă un indicator operațional care exprimă durata teoretică de funcționare a unui singur hidrant exterior, calculată pe baza volumului total de apă distribuit lunar prin rețeaua de hidranți exteriori, raportat la debitul minim al unui hidrant. Indicatorul reflectă, prin analogie, numărul de minute de funcționare continuă al unui hidrant necesare pentru a consuma volumul total de apă utilizat efectiv într-o lună, independent de numărul real al hidranților activați simultan:

$$TMU_{HE} = \frac{\sum_{i=1}^N Vi_{zilnic}}{Q_{min}} \quad (3.4)$$

unde Q_{min} reprezintă debitul minim care trebuie asigurat.

În funcție de valoarea indicatorului, se poate impune suplimentarea numărului de hidranți sau adoptarea unor măsuri tehnice (repoziționare, extinderea rețelei, soluții alternative de alimentare cu apă), pentru a

asigura debitul necesar intervențiilor la incendiu, conform cerințelor fundamentale de securitate la incendiu.

Implementarea unui astfel de sistem de monitorizare și control poate sprijini atât maximizarea eficienței hidraulice a instalațiilor, cât și menținerea capacității de intervenție în scenariile critice de incendiu.

Indicatori IWA

IWA (International Water Association) și WAREG (European Water Regulators) au dezvoltat o metodologie complexă pentru evaluarea sistemelor urbane de apă, utilizând indicatori de performanță clasificați în șase clase principale și subclase tematice. Această clasificare detaliată, ce include 170 de indicatori cantitativi și calitativi, facilitează analiza performanțelor, alocarea eficientă a resurselor și fundamentarea deciziilor. Prin acoperirea unor domenii precum resursele de apă, resursele umane, infrastructura tehnică, operațiunile curente, calitatea serviciului percepută de utilizatori și aspectele economico-financiare, această metodologie sprijină o gestiune eficientă, transparentă și sustenabilă a serviciilor de apă. Numărul total de indicatori incluși în această structură este 170 (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Clasificarea indicatorilor conform Asociația Internațională a Apei (IWA)

Clasa principală	Subclasă	Număr de indicatori
1. Indicatori ai resurselor de apă (WR)	-	4
2. Indicatori de personal (Pe)	Personal total	2
	Personal pe funcții principale	7
	Personal tehnic pe activitate	6
	Calificarea personalului	3
	Instruirea personalului	3
	Sănătatea și securitatea personalului	3
	Muncă suplimentară	1
3. Indicatori fizici (Ph)	Tratarea apei	1
	Stocare	2
	Pompare	4
	Transport și distribuție	2
	Contorizare	4
	Automatizare și control	2
4. Indicatori operaționali (Op)	Inspecția și întreținerea activelor fizice	6
	Calibrarea echipamentelor de măsurare	5
	Inspecția echipamentelor electrice și de transmisie a semnalului	3
	Disponibilitatea vehiculelor	1
	Reabilitarea conductelor, valvelor și branșamentelor	5
	Reabilitarea pompelor	2
	Pierderi operaționale de apă	7
	Defecțiuni	6
	Contorizarea apei	4
	Monitorizarea calității apei	5
5. Indicatori ai calității serviciului (QS)	Acoperirea serviciului	5
	Robinete publice și cișmele	4
	Presiunea și continuitatea furnizării	8

Clasa principală	Subclasă	Număr de indicatori
	Calitatea apei furnizate	5
	Racordare și instalare/reparare contoare	3
	Reclamații ale clienților	9
6. Indicatori economici și financiari (Fi)	Venituri	3
	Costuri	3
	Structura costurilor de operare pe tipuri	5
	Structura costurilor de operare pe funcții principale	5
	Structura costurilor pe activități tehnice	6
	Structura costurilor de capital	2
	Investiții	3
	Tarife medii pentru apă	2
	Eficiență	9
	Îndatorare	2
	Lichiditate	1
	Rentabilitate	5
	Pierderi economice de apă	2
Număr total indicatori IWA:		170

Metodologia IWA propune 170 de indicatori pentru evaluarea serviciilor de apă, însă doar o mică parte dintre aceștia vizează consumul și eficiența energetică, fiind încadrați în categoriile indicatorilor fizici (Ph) și financiari (Fi). Deși util pentru standardizare, cadrul IWA poate genera dificultăți dacă este aplicat rigid, fără adaptare la specificul local, riscând suprareglementare și ineficiența evaluării.

Pentru o analiză mai precisă a performanței energetice, se utilizează frecvent indicatori complementari, care completează lacunele cadrului IWA și oferă o imagine mai fidelă a eficienței sistemelor de alimentare cu apă. Aceștia sunt prezentați în secțiunea următoare.

3.2.3. Eficiența energetică și indicatori specifici

În sistemele urbane de apă, energia este necesară pentru:

- Extracția apei - Pomparea apelor subterane sau de suprafață către instalațiile de tratare.
- Tratarea apei - Procesele consumatoare de energie, cum ar fi filtrarea, tratarea chimică și desalinizarea.
- Distribuția apei - Pomparea apei tratate către utilizatorii rezidențiali, comerciali și industriali.
- Colectarea și tratarea apelor uzate - Transportul și tratarea apelor uzate înainte de evacuare sau reutilizare.

Consumul de energie reprezintă un determinant major al costurilor operaționale în exploatarea sistemelor urbane de alimentare cu apă, iar optimizarea energetică a echipamentelor de pompă și distribuție (UWD) este esențială pentru creșterea eficienței și sustenabilității [55], [67]. Integrarea tehnologiilor moderne, precum pompe cu randament ridicat, convertoare de frecvență (VFD) și sisteme de monitorizare avansată, permite reducerea pierderilor energetice și îmbunătățirea performanței [67]. Diminuarea consumului energetic contribuie direct la reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră (GHG), aliniindu-se obiectivelor climatice globale și contribuind la reducerea poluării aerului [71], [77]. Aceste măsuri susțin atingerea Obiectivelor de Dezvoltare Durabilă, în special ODD 6 – apă curată și sanitație, și ODD 7 – energie curată și accesibilă [78], fiind în concordanță cu reglementările Uniunii Europene care impun reducerea cu cel puțin 55% a emisiilor GHG până în 2030 față de nivelul din 1990 și o creștere a eficienței energetice cu minimum 32,5% [53]. În Europa de Est, inclusiv în România, sunt în curs de implementare proiecte de modernizare a infrastructurii de apă, cu integrarea unor tehnologii avansate susținute de fonduri europene, precum cele realizate în Polonia și Ungaria [81]. Pentru susținerea acestor demersuri, a fost elaborat un set de indicatori de performanță energetică, aplicați în cadrul analizei sistemului urban de alimentare cu apă din municipiul

Braşov, indicatori prezentaţi în Tabelul 3.2, care oferă un cadru metodologic pentru optimizarea continuă a performanţei energetice în sectorul urban al apei.

Tabel 3.2. Indicatori specifici de performanţă energetică

Nr. crt.	Simbol	Denumire şi definiţie	Relaţie de calcul
1	EI1	Intensitatea energetică - este raportul dintre energia activă totală consumată şi volumul de apă livrat în perioada analizată; [kWh/m ³]	$EI1 = \sum_{i=1}^n \frac{E_{a_i}}{V_i} \quad (3.10)$
2	EI2	Intensitate energetică standardizată - reprezintă energia consumată per metru cub de apă pompat, standardizată la o înălţime de 100 metri; [kWh/m ³ /100 m]	$EI2 = \frac{E_{a_i}}{V_i \cdot \frac{H}{100}} \quad (3.11)$
3	EI3	Putere medie activă - este cantitatea medie de putere activă utilizată, în perioada Δt analizată; [kW]	$EI3 = \frac{\sum_{i=1}^n P_{a_i}}{N} \quad (3.12)$
4	EI4	Puterea maximă activă - reprezintă valoarea maximă a puterii active consumate în perioada analizată; [kW]	$EI4 = \max(P_{a_1}, \dots, P_{a_i}) \quad (3.13)$
5	EI5	Emisiile de CO₂ - reprezintă cantitatea totală de CO ₂ emisă ca urmare a consumului energetic, calculată cu ajutorul factorul standard ef , care în cazul României este în prezent aproximat la 0,232 [kgCO _{2e} /kWh]*	$EI5 = E_{a_t} \cdot ef \quad (3.14)$
6	EI6	Intensitatea energetică reactivă - este raportul dintre energia reactivă consumată şi volumul de apă livrat în perioada analizată; [kVAr/m ³]	$EI6 = \frac{E_{r_i}}{V_i} \quad (3.15)$
7	EI7	Intensitate energetică reactivă standardizată reprezintă energia reactivă consumată per metru cub de apă pompat, standardizată la o înălţime de 100 metri; [kVArh/m ³ /100 m]	$EI7 = \frac{E_{r_i}}{V_i \cdot \frac{H}{100}} \quad (3.16)$
8	EI8	Putere medie reactivă înseamnă cantitatea medie de putere reactivă utilizată, în perioada Δt analizată; [kVAr]	$EI8 = \frac{\sum_{i=1}^n P_{r_i}}{N} \quad (3.17)$
9	EI9	Puterea maximă reactivă reprezintă valoarea maximă a puterii active consumate în perioada analizată; [kVAr]	$EI9 = \max(P_{r_1}, \dots, P_{r_i}) \quad (3.18)$
10	EI10	Indicele de reactivitate energetică arată raportul procentual dintre energia reactivă şi cea activă utilizată în sistem şi este invers proporţional cu factorul de putere; [%]	$EI10 = \frac{E_{r_i}}{E_{a_i}} \cdot 100 \quad (3.19)$
10	EI11	Gradul de utilizare a pompelor arată cât de mult din capacitatea maximă disponibilă a echipamentelor de pompare este folosit efectiv într-o perioadă evaluată. Se calculează ca raport între energia consumată de toate pompele în perioada cu cel mai mare consum şi energia care ar fi fost consumată dacă pompele ar fi funcţionat la capacitatea maximă; [%]	$EI11 = \left(\frac{E_{a_{max}}}{P_{a_n} \cdot t_i} \right) \cdot 100 \quad (3.20)$

* conform [82]

Aceşti indicatori oferă un cadru complex pentru analiza şi îmbunătăţirea performanţei energetice a sistemelor de pompare şi distribuţie a apei.

Ei permit etalonarea sistematică și facilitează intervențiile țintite pentru creșterea eficienței operaționale și a sustenabilității. În secțiunea 3.4.2 este prezentată o aplicație cu acești indicatori.

3.3. Propuneri privind monitorizarea sistemelor urbane de alimentare cu apă

Sistemele SCADA sunt platforme avansate de monitorizare și control utilizate în infrastructurile critice, inclusiv distribuția apei și energiei. Ele permit colectarea și analiza datelor în timp real, facilitând optimizarea consumului de resurse și integrarea surselor regenerabile de energie. Prin susținerea mentenanței predictive și reducerea pierderilor operaționale, SCADA contribuie la creșterea eficienței energetice și la atingerea obiectivelor de dezvoltare durabilă. Astfel, aceste sisteme devin instrumente esențiale în modernizarea și sustenabilizarea infrastructurilor urbane.

3.3.1. Capabilități la sistemele SCADA

Sistemele SCADA, dezvoltate inițial în anii 1950 pentru control industrial, au evoluat în platforme digitale complexe, esențiale pentru gestionarea inteligentă a infrastructurii urbane de alimentare cu apă. Integrarea tehnologiilor avansate din sfera Industriei 4.0 — precum Cloud Computing, inteligența artificială și IoT — a permis automatizarea extinsă, optimizarea operațiunilor și monitorizarea parametrilor de calitate, dar a amplificat și riscurile cibernetice. Evoluția arhitecturală a acestor sisteme, de la structuri monolitice la rețele bazate pe senzori inteligenți, a sporit eficiența și scalabilitatea, impunând totodată cerințe sporite de securitate. În acest context, SCADA reprezintă un pilon al digitalizării hidrotehnice, cu un rol critic în sustenabilitate și reziliență operațională.

3.3.2. Structura sistemului SCADA la sistemele de alimentare cu apă din Brașov

Proiectarea unui sistem SCADA implică colaborarea între ingineri de proces, informaticieni și experți în automatizări și rețele. În municipiul Brașov, Compania Apa utilizează un sistem SCADA cu arhitectură distribuită pentru monitorizarea și controlul infrastructurii de tratare, pompare, stocare și distribuție a apei potabile. Sistemul colectează date prin senzori și actuatori conectați la RTU-uri și PLC-uri, care transmit informațiile către serverele centrale, unde sunt analizate și vizualizate în timp real prin interfețe HMI.

Modernizarea vizează migrarea către o arhitectură SCADA în rețea, cu protocoale deschise (ex. TCP/IP) și integrarea rețelei de stingere a incendiilor, inclusiv hidranți dotați cu senzori de debit și presiune pentru detecție automată și alerte în timp real. Comunicarea se realizează printr-o infrastructură mixtă (fibră optică, radio, GSM/4G), în funcție de topologie și cerințe de securitate.

Componenta hardware include senzori, actuatori, RTU-uri și module de comunicație, iar partea software integrează HMI, module de alarmare, baze de date istorice și protocoale standardizate (Modbus, DNP3). Sistemul permite identificarea pierderilor, calibrarea modelelor hidraulice și optimizarea intervențiilor, oferind o platformă scalabilă și rezilientă pentru managementul inteligent al rețelei urbane de apă.

3.3.3. Problematica implementării sistemelor SCADA

Sistemele SCADA sunt componente esențiale ale infrastructurilor critice, asigurând controlul automatizat, supravegherea în timp real și analiza operațională prin înregistrarea datelor istorice [100], [101]. Utilizarea protocoalelor standardizate și accesul la distanță facilitează interoperabilitatea și gestionarea eficientă a rețelelor distribuite.

Cu toate acestea, integrarea IoT și a platformelor Cloud, deși extinde funcționalitatea, crește vulnerabilitatea la atacuri cibernetice, în special în absența unor politici stricte de securitate [89], [100]. Limitările tehnologice și organizaționale — precum costurile mari, necesarul de personal specializat și complexitatea arhitecturală — pot afecta reziliența operațională.

Pentru a proteja infrastructura critică, este necesară o abordare de securitate integrată, bazată pe criptare avansată, segmentare a rețelei, monitorizare continuă și audituri periodice.

3.4. Aplicații și studii de caz

3.4.1. Analiza variației indicatorilor de calitate ai apei potabile

Între ianuarie 2019 și mai 2021, a fost realizat un studiu de caz privind monitorizarea calității fizice a apei într-un punct al rețelei de distribuție din Brașov. Au fost analizați parametrii turbiditate și conductivitate, esențiali pentru evaluarea calității apei potabile. Turbiditatea a fost măsurată în NTU și FNU, conform standardului ISO 7027, iar datele sunt centralizate în Anexa 1.

În Fig. 3.10 este prezintă evoluția turbidității apei în sistemul din Brașov între ianuarie 2019 și mai 2021.

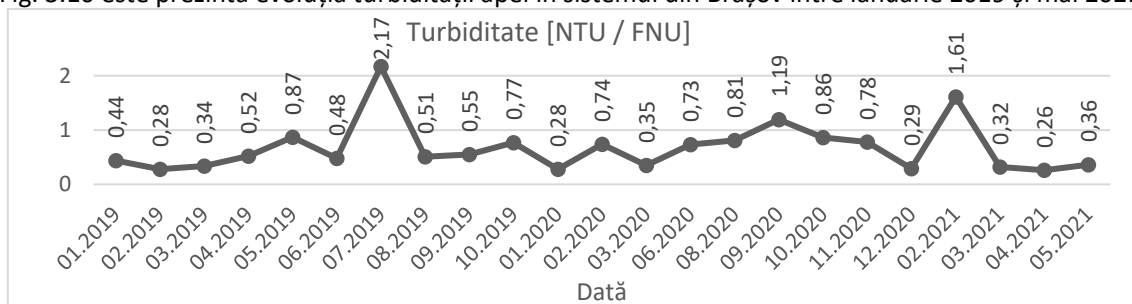


Fig. 3.10. Variația turbidității apei potabile în perioada ianuarie 2019 - mai 2021

Valorile turbidității s-au menținut, în general, sub pragul de 1 NTU/FNU, indicând o calitate corespunzătoare a apei. Au fost însă înregistrate două creșteri semnificative: în iunie 2019 (peste 2 NTU) și în decembrie 2020 (aprox. 1,6 NTU), posibile indicii ale unor contaminări sau disfuncționalități în tratare. Revenirea rapidă la valorile normale sugerează intervenții corective eficiente. În ansamblu, controlul calității în rețeaua UWS Brașov a fost adecvat, cu fluctuații punctuale [102].

Fig. 3.11 ilustrează evoluția conductivității electrice a apei în sistemul urban de apă din Brașov în perioada ianuarie 2019 - mai 2021.

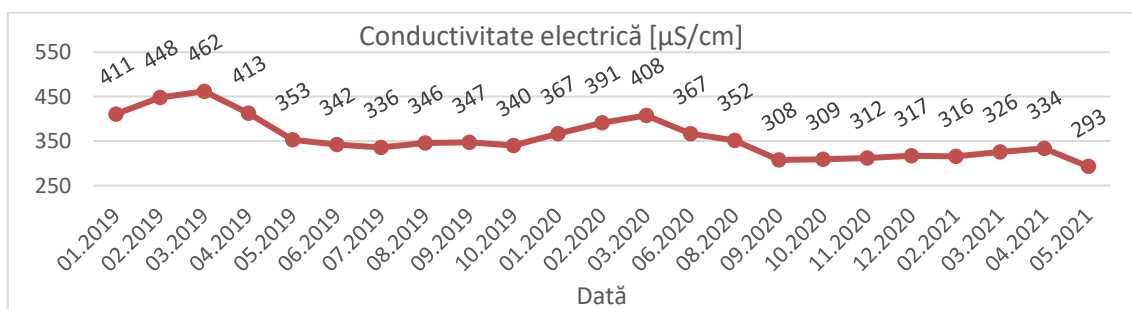


Fig. 3.11. Variația conductivității electrice a apei potabile în perioada ianuarie 2019 - mai 2021

Conductivitatea apei a variat între 293 și 462 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cu un maxim în martie 2019 și o tendință generală de scădere. Un vârf local a fost observat în martie 2020, urmat de o reducere sub 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ în a doua jumătate a aceluși an. Spre finalul perioadei, valorile s-au stabilizat între 310–330 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cu o scădere finală la 293 $\mu\text{S}/\text{cm}$ în mai 2021, indicând o diminuare a sărurilor dizolvate și o stabilizare a calității apei.

Fig. 3.12 ilustrează evoluția cantității de clor liber în apa potabilă în sistemul de apă în perioada ianuarie 2019 - mai 2021.

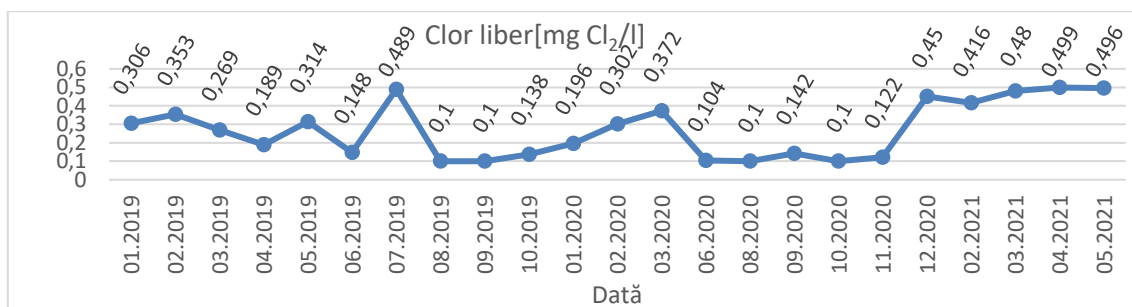


Fig. 3.12. Variația cantității de clor liber în apa potabilă în perioada ianuarie 2019 - mai 2021

Între ianuarie 2019 și mai 2021, concentrația de clor liber în rețeaua UWS Brașov a variat între 0,1 și 0,496 mg/l, respectând limitele legale [102]. Vârfurile din iulie 2019 și aprilie-mai 2021 reflectă ajustări în dezinfectie pentru menținerea calității microbiologice. Analiza turbidității, conductivității și clorului liber indică o calitate generală bună a apei, cu fluctuații punctuale gestionate eficient prin intervenții în procesele de tratare.

3.4.2. Studiu de caz - consumul de apă pentru alimentarea hidranților exteriori

Studiul analizează consumul de apă utilizat pentru stingerea incendiilor și intervenții de urgență în zone urbane care deservește aproximativ 74.000 de locuitori din regiunea centru [103]. Datele, colectate între 2022 și 2024 (vezi Anexa 2), vizează evaluarea eficienței utilizării rețelei de hidranți exteriori. Au fost monitorizați patru indicatori: consumul lunar și anual de apă, consumul specific și timpul de utilizare a hidranților. Analiza acoperă perioada ianuarie 2022 – noiembrie 2024.

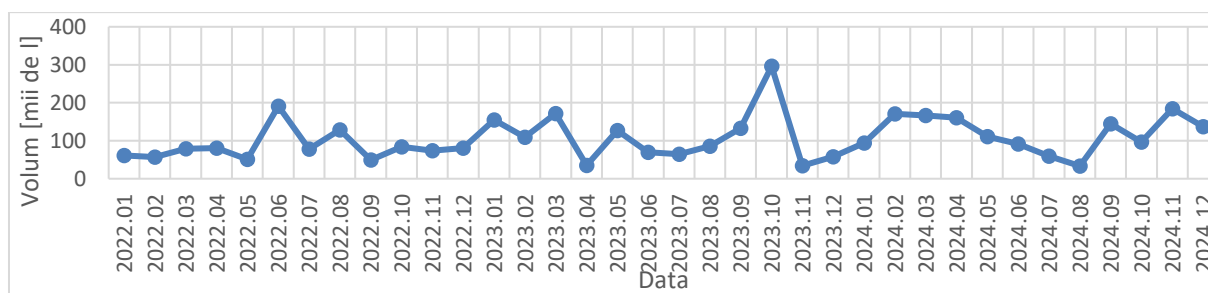


Fig. 3.13. Consum lunar de apă pentru alimentarea hidranților exteriori în perioada 2022-2024

Graficul evidențiază variații semnificative ale volumului de apă consumat în perioada 2022-2024, cu maxime izolate, cel mai pronunțat fiind în octombrie 2023, ceea ce sugerează utilizări punctuale asociate cu situații de urgență. Se observă o posibilă sezonabilitate, cu tendința de creștere a consumului în lunile de primăvară și toamnă.

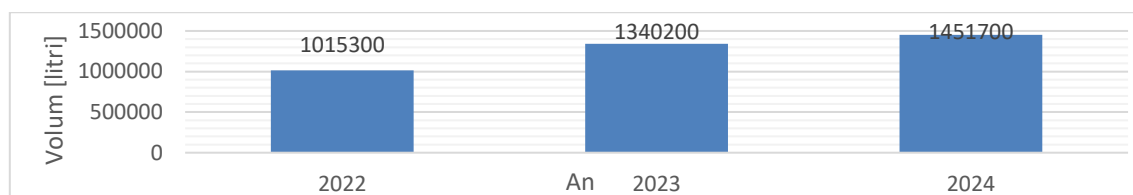


Fig. 3.14. Consum anual de apă pentru alimentarea hidranților exteriori în anii 2022-2024

Fig. 3.14 prezintă evoluția anuală a volumului total de apă consumat de hidranții exteriori în intervalul 2022-2024, evidențiind o creștere constantă de la 1.015.300 litri în 2022 la 1.451.700 litri în 2024. Această creștere este direct asociată cu intensificarea utilizării rețelei de hidranți pentru intervenții de stingere a incendiilor sau alte utilizări operaționale.

Fig. 3.15 ilustrează consumul specific de apă determinat cu ajutorul relației 3.3.

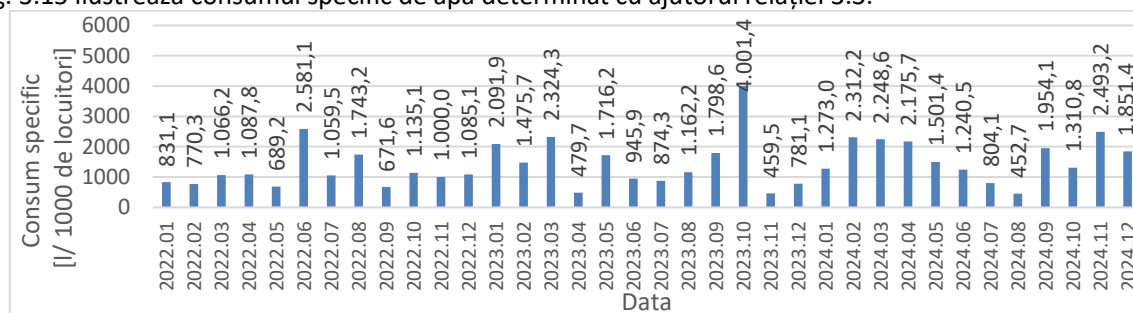


Fig. 3.15. Consum specific apă – hidranți exteriori

Consumului specific de apă de la hidranții exteriori în perioada 2022-2024 este cuprins între un minim de 479,1 l/1.000 locuitori aferent lunii mai din 2023 și un maxim de 4.001,4 l/1.000 locuitori atins în luna

octombrie a anului 2023. Media anuală a fost de aproximativ 1.270 l/1.000 locuitori în 2022, 1.680 l/1.000 locuitori în 2023 și 1.700 l/1.000 locuitori în 2024, iar media pe întreaga perioadă analizată a fost de circa 1.550 l/1.000 locuitori, cu variații punctuale determinate de utilizări excepționale.

Graficul din Fig. 3.16 prezintă timpul maxim de utilizare al hidranților exteriori calcul conform relației 3.4.

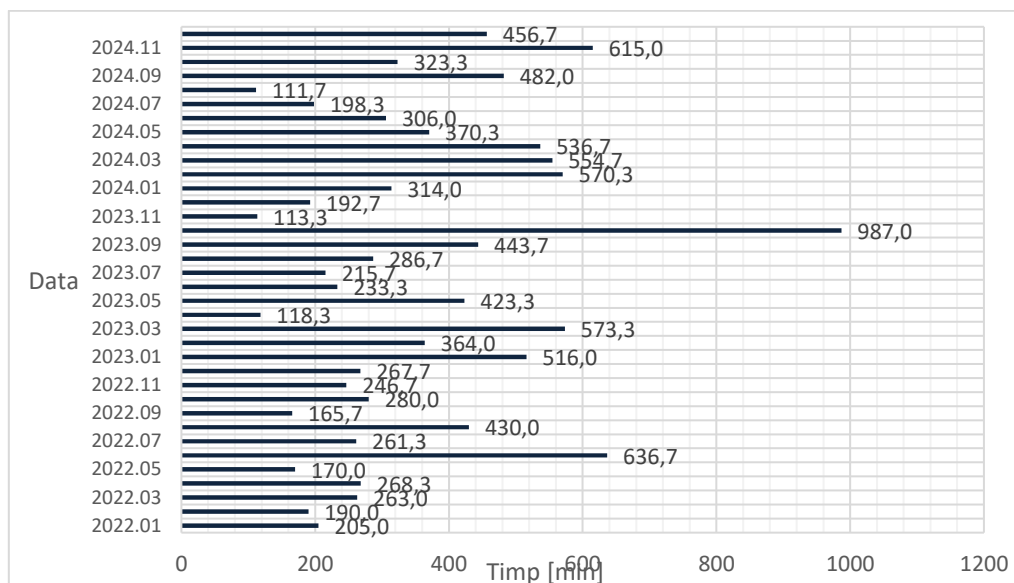


Fig. 3.1. Timp maxim de utilizare a hidranților exteriori

În perioada 2022–2024, timpul de utilizare a hidranților exteriori a variat lunar între 111,7 minute (august 2024) și 987 minute (octombrie 2023), reflectând intensitatea diferită a intervențiilor în funcție de necesitățile operaționale. Valorile ridicate indică perioade de utilizare extinsă a sistemului urban de apă pentru stingerea incendiilor.

Rezultatele evidențiază importanța monitorizării continue a consumului de apă și a utilizării hidranților, în vederea optimizării intervențiilor și a reducerii pierderilor. Crearea unei baze de date dedicate și implementarea unui sistem de analiză a acestor parametri sunt esențiale pentru eficiența operațională și sustenabilitatea energetică a rețelei urbane.

3.4.3. Studiu comparativ al indicatorilor energetici pentru două stații de pompare a apei

Studiul compară indicatorii energetici ai două stații de pompare cu configurații tehnice diferite, pe baza măsurărilor locale realizate în data de 20.10.2024 (Anexa 3). Stația de Pompare I (PS I), destinată distribuției apei potabile, este echipată cu pompe prevăzute cu convertoare de frecvență, care permit ajustarea turației în funcție de cerințele de debit și presiune, contribuind astfel la optimizarea consumului de energie electrică; configurația acestei stații este prezentată în Fig. 3.17. Stația de Pompare II (PS II), utilizată pentru ridicarea apei, funcționează cu pompe acționate de motoare cu turație constantă, ceea ce limitează adaptabilitatea la variațiile de consum și poate conduce la un consum specific de energie mai ridicat.

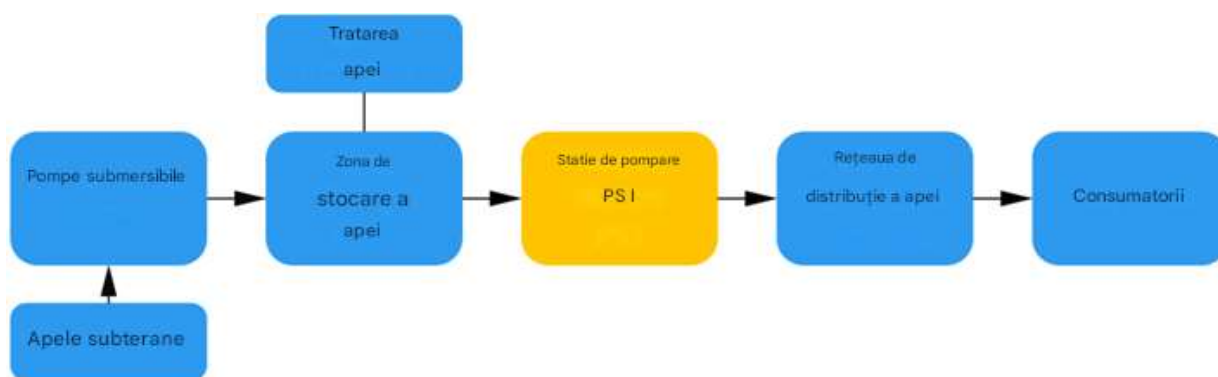


Fig.3.17. Stația de pompare PS I pentru distribuția apei

Stația de pompare PS I este compusă din cinci pompe centrifuge verticale multietajate de tip CR 64-3-2 A-F-A-E-HQQE. Caracteristicile tehnice ale unei pompe sunt prezentate în Tabelul 3.3.

Tabel 3.3. Caracteristici tehnice ale unei unități de pompare din cadrul PS I

Caracteristică tehnică	Valoare
Specificații hidraulice	
Debit nominal	64 m ³ /h
Înălțime de pompare nominală	52,8 m
Înălțime de pompare maximă	70,1 m
Presiune maximă de operare	16 bar
Turație nominală	2923 rpm
Specificații electrice	
Tip motor	160MD2
Putere nominală P2	15 kW
Frecvența rețelei	50 Hz
Tensiune nominală	Δ 380-415 V / Y 660-690 V
Curent nominal	Δ 26-28 A / Y 15,6-16,2 A
Curent maxim	Δ 28,5-31 A / Y 17,2-17,8 A
Turație nominală	2930-2950 rpm
Factor de putere (cos φ)	0,89-0,87
Clasa de eficiență IE	IE3 – 91,9%
Tip convertor de frecvență	FC 202
Putere suportată	15 kW
Curent de ieșire	30 A
Tensiune de ieșire	0-480 V
Frecvență de ieșire	0-590 Hz

Fiecare unitate de pompare din Stația de Pompare I (PS I) este controlată de un convertor de frecvență FC 202, într-o configurație de tip coordonator–subordonat, unde convertorul principal (C1) reglează presiunea în rețeaua urbană de distribuție. C1 funcționează în regim de buclă închisă pe baza semnalului de la senzorul de presiune, în timp ce convertoarele secundare (C2–C5) operează în buclă deschisă, primind semnal de comandă de la coordonator pentru reglarea vitezei motoarelor. Sistemul permite comanda secvențială a pompelor, alternarea acestora și echilibrarea timpilor de funcționare, în vederea reducerii uzurii, iar funcția de dezactivare a cuplului mecanic asigură oprirea sigură a echipamentului fără întreruperea alimentării. În Fig. 3.20 este prezentată configurația sistemului de alimentare cu apă aferentă Stației de Pompare II (PS II), proiectat să gestioneze variațiile de altitudine prin utilizarea predominantă a transportului gravitațional.

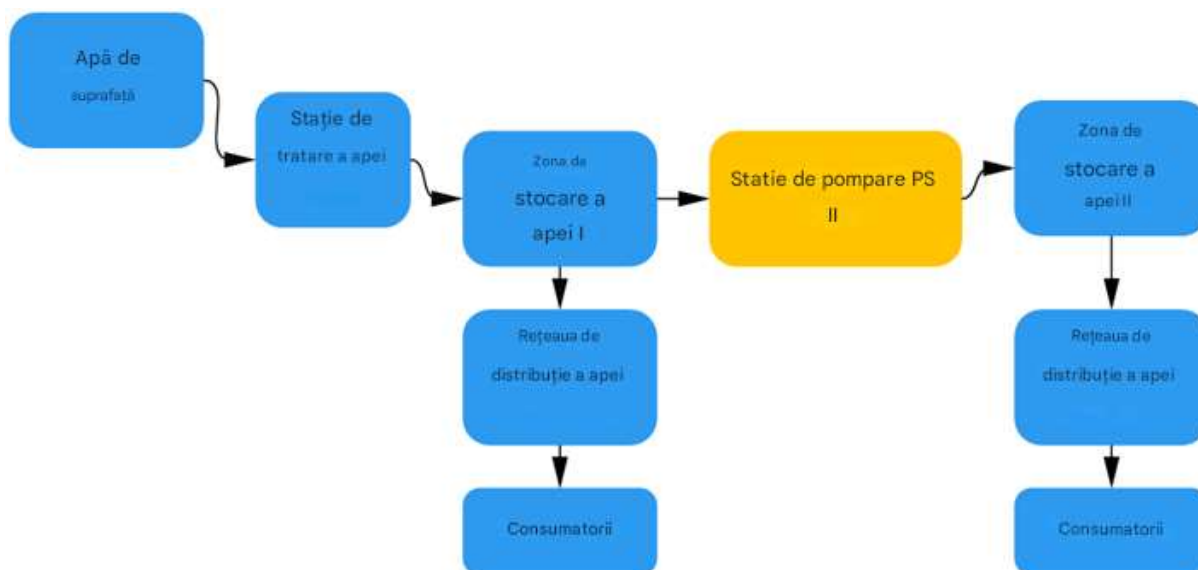


Fig. 3.20. Stației de pompare PS II pentru ridicarea apei

Apa de suprafață este captată dintr-un lac de acumulare și transportată gravitațional la o stație de tratare. Ulterior, este stocată în Zona de Stocare I (19.000 m³). De aici, o parte din apă merge direct la consumatori, iar restul este pompată de Stația de Pompare II (PS II) către Zona de Stocare II (18.000 m³), situată la o altitudine superioară. PS II este echipată cu trei pompe centrifuge 10LR18 cu turație constantă. Caracteristicile tehnice sunt prezentate în Tabelul 3.4.

Tabel 3.4. Caracteristici tehnice ale unei unități de pompare din cadrul PS II

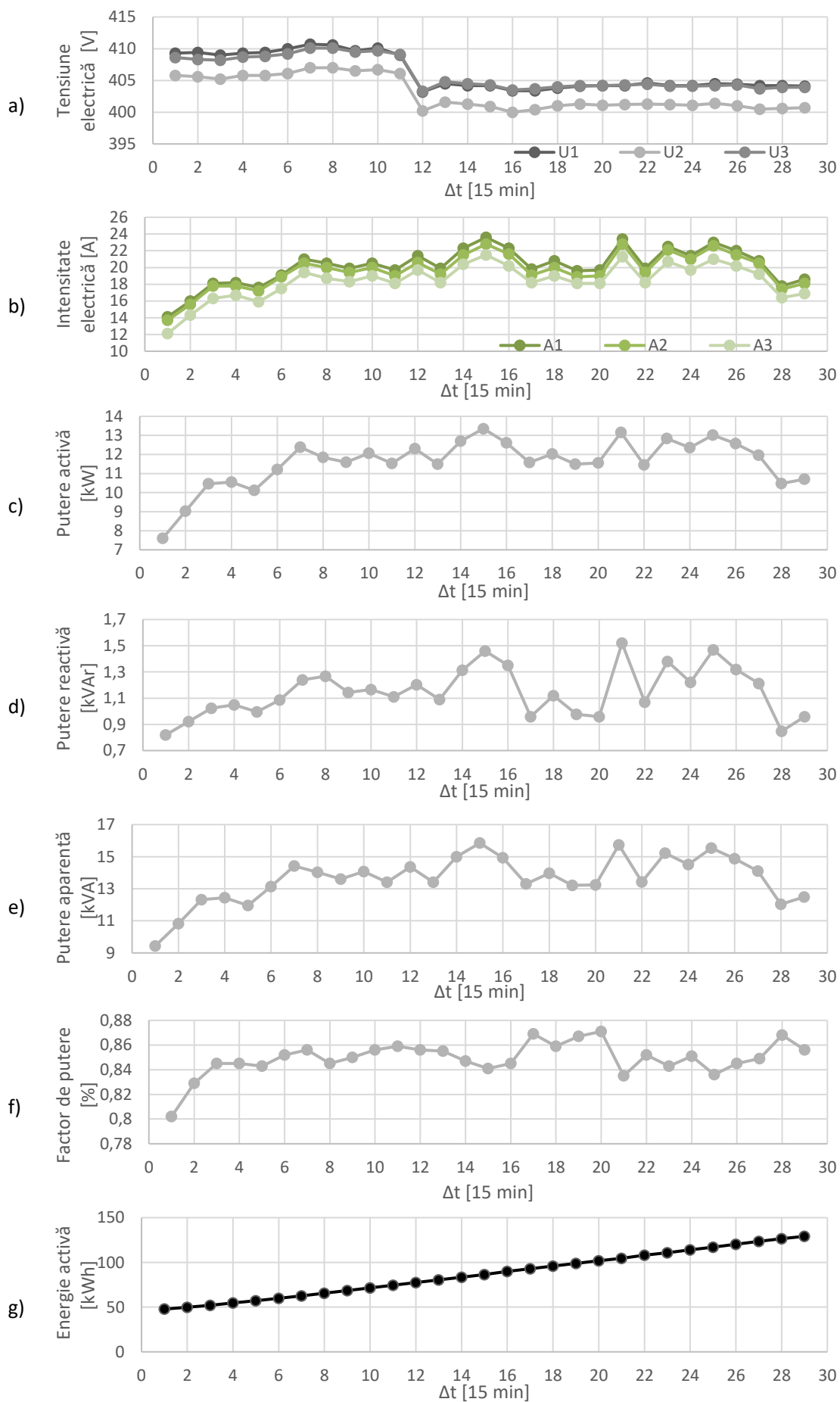
Caracteristică tehnică	Valoare
Specificații hidraulice	
Debit nominal	1.170 m ³ /h
Înălțime nominală de pompare	38,5 m
Presiune maximă de operare	24 bar
Specificații electrice	
Tip motor	315S/M-4
Clasa de eficiență IE	IE2 – 90%
Putere nominală P2	150 kW
Frecvență rețea	50 Hz
Tensiune nominală	380V / 400V / 415V / 660V / 690V
Curent nominal	276 A (380V/50 Hz), 265 A (400V/50 Hz), 258 A (415V/50 Hz), 159 A (660V/50 Hz), 154 A (690V/50 Hz)
Factor de putere (cos φ)	0,86
Turație nominală	1.480 rpm

Motorul de acționare este de tip asincron cu rotorul în scurtcircuit, cu răcire cu aer, având un randament nominal de 90% și fiind clasificat în categoria de eficiență energetică IE2, conform specificațiilor producătorului. Corpul pompei este realizată din fontă ductilă și bronz, cu scopul de a oferi rezistență la uzură mecanică și coroziune.

Pentru evaluarea indicatorilor energetici, ambele sisteme au fost analizate din punct de vedere tehnic și operațional, cu scopul de a determina eficiența reală în condiții reprezentative de funcționare.

I. Monitorizarea performanțelor energetice la Stația de pompe PS I

Rezultatul monitorizărilor efectuate sunt centralizate în Fig. 3.22, care permite efectuarea unei analize comparative asupra mărimilor electrice și hidraulice ale unităților de pompare din cadrul stației SP I. Este evidențiată relația funcțională dintre evoluția temporală a puterii electrice și debitul de apă. Măsurătorile au fost realizate pentru întreg grupul de pompare, atât pentru parametrii electrici, cât și pentru debit.



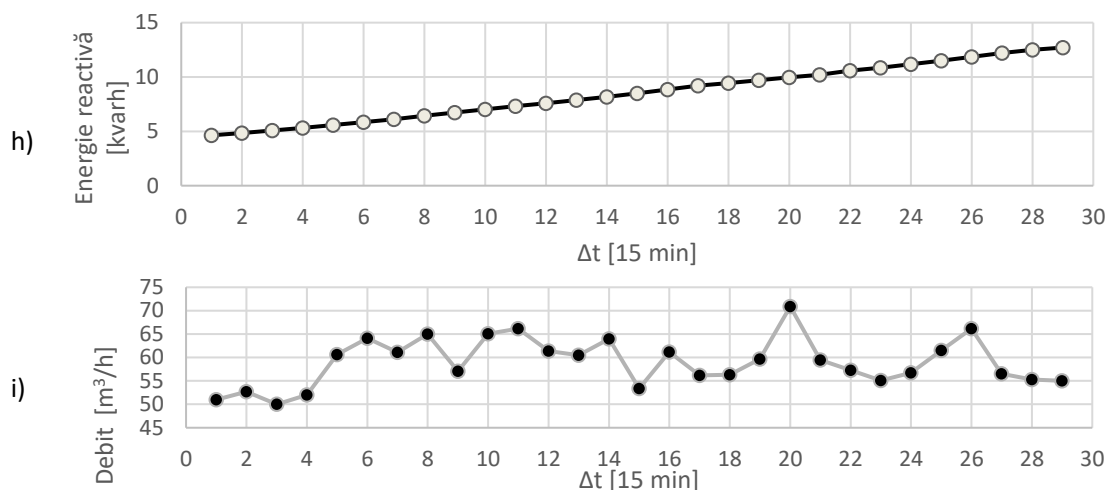


Fig. 3.22. Monitorizarea parametrilor electrici și hidraulici la SP I (29 măsurători)

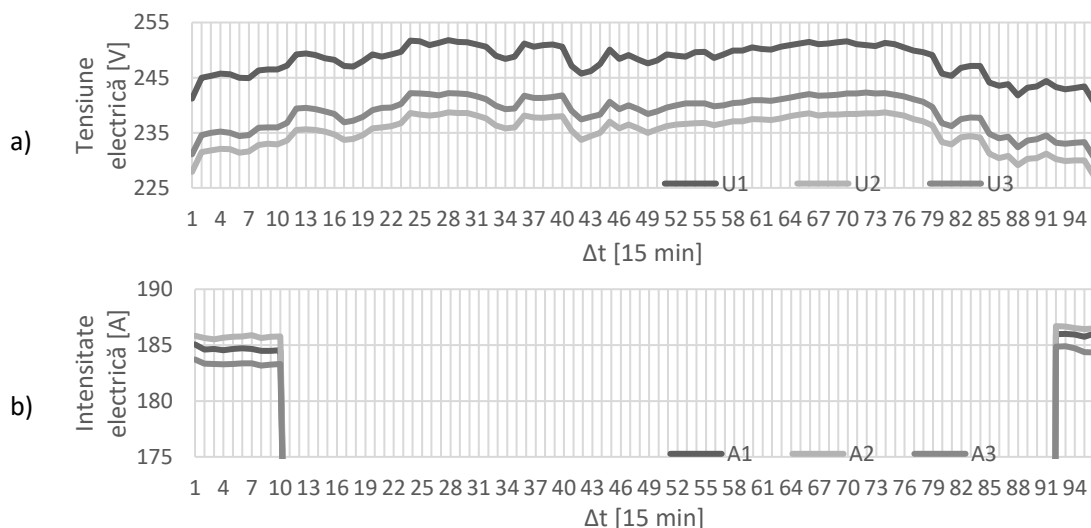
Monitorizarea a 29 de măsurători la stația de pompare SP I a permis analiza comportamentului electric și hidraulic al sistemului în regim variabil. Tensiunea trifazică a înregistrat o scădere bruscă în intervalul 10–12, sugerând modificări de sarcină, iar curentul electric a crescut progresiv până la același punct, menținând ulterior fluctuații moderate, cu un bun echilibru între faze.

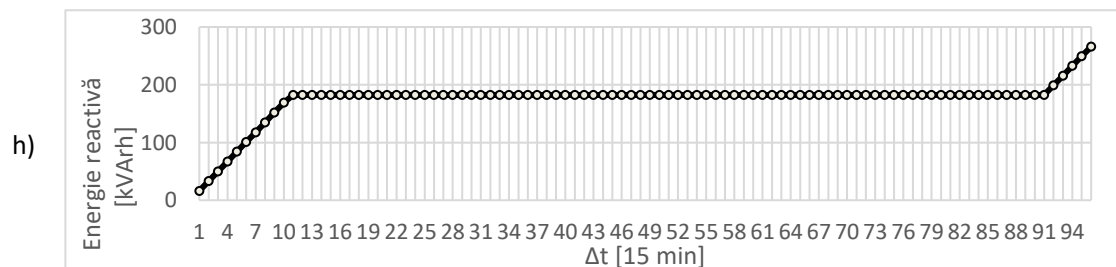
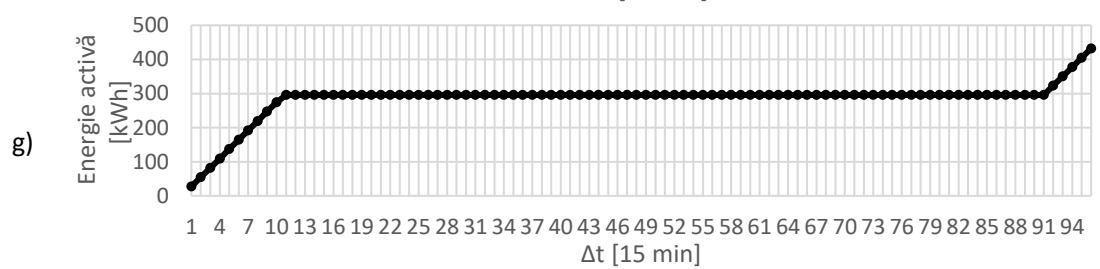
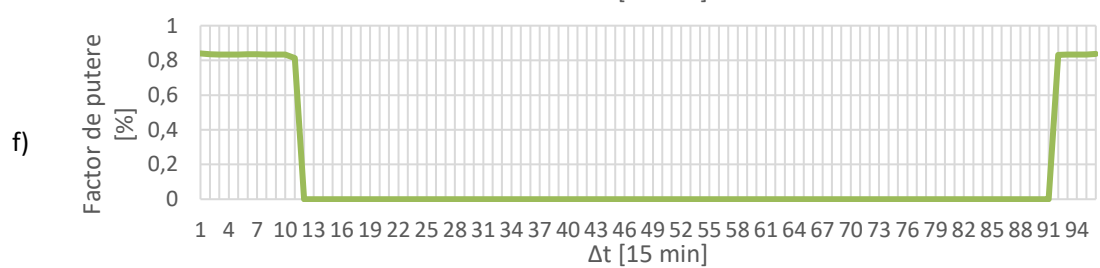
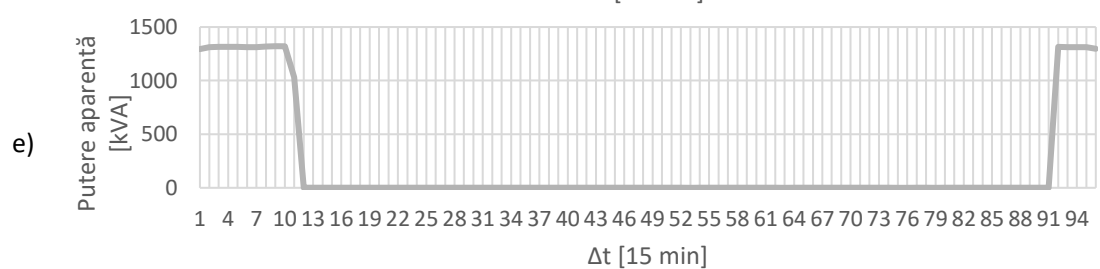
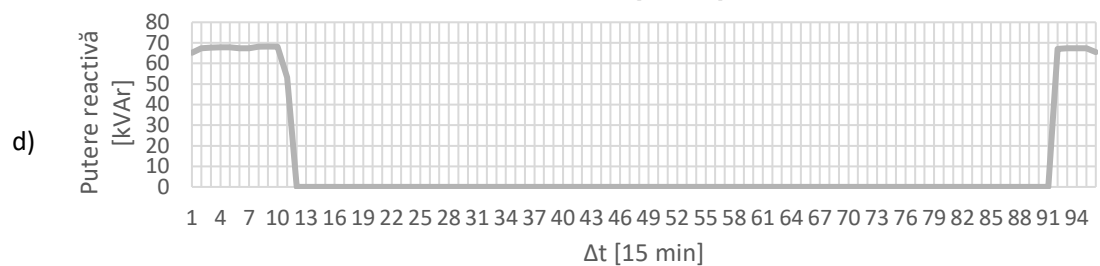
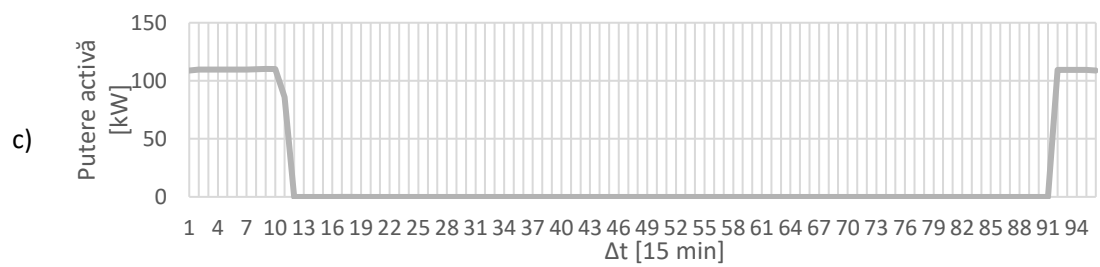
Puterea activă a prezentat variații semnificative, cu maxime între punctele 20–26, iar puterea reactivă a urmat un trend corelat, reflectând prezența sarcinilor inductive sau capacitive. Puterea aparentă a oferit o imagine integrată a solicitării energetice, iar factorul de putere s-a menținut între 78–88%, indicând o eficiență bună, dar perfectibilă.

Energia activă a crescut liniar, reflectând un regim stabil de funcționare, iar energia reactivă a urmat o evoluție similară, cu o pantă mai redusă. Debitul de apă a înregistrat variații importante, cu un vârf semnificativ în jurul punctului 20, influențând direct consumul energetic. Rezultatele evidențiază corelația între solicitarea electrică și dinamica hidraulică a stației.

II. Monitorizarea performanțelor energetice la Stația de pompe PS II

Cel de-al doilea studiu, realizat pentru PS II, oferă o analiză detaliată a performanței electrice și hidraulice printr-o serie de grafice prezentate în Fig. 3.23.





i)

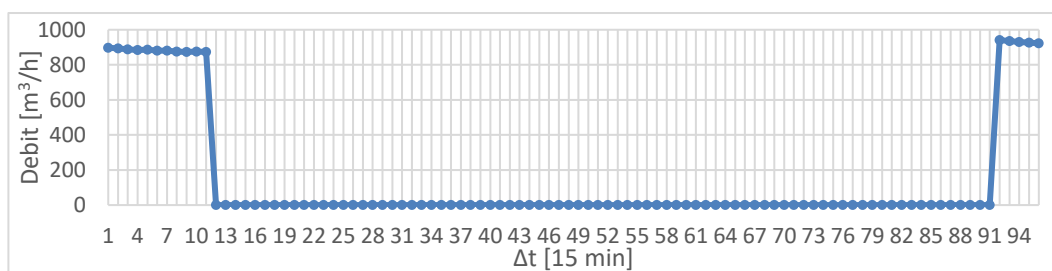


Fig. 3.232. Monitorizarea parametrilor electrici și hidraulici la PS II (96 măsurători)

Analiza PS II relevă un comportament discontinuu al parametrilor electrici și hidraulici, cu variații de tensiune și scăderi bruște ale curentului la oprire. Puterile și debitele urmează același ciclu de funcționare constantă, oprire și repornire, factorul de putere menținându-se la aproximativ 0,85 în regim activ. Deși indicatorii energetici pentru PS II (viteză constantă - CSD) și PS I (viteză variabilă- VSD) sunt centralizați, o comparație directă a performanțelor lor necesită un context amănunțit, dată fiind diferența fundamentală dintre sistemele VSD și CSD.

Tabel 3.5. Indicatori de performanță energetică pentru PS I și PS II

Simbol	Indicator de performanță	Studiu PS I	Studiu PS II
EI1	Intensitatea energetică [kWh/m³]	0,1956	0,1308
EI2	Intensitate energetică standardizată [kWh/m³/100 m]	0,3705	0,3396
EI3	Putere medie activă [kW]	10,6130	108,0840
EI4	Puterea maximă activă [kW]	15,3820	110,1190
EI5	Emisiile dioxid de carbon [kgCO ₂ e/kWh]	61,3083	100,2936
EI6	Intensitatea energetică reactivă [kVar/m³]	0,0203	0,0804
EI7	Intensitate energetică reactivă standardizată [kVarh/m³/100 m]	0,0384	0,2088
EI8	Putere medie reactivă [kVar]	1,1040	66,4560
EI9	Puterea maximă reactivă [kVar]	2,0780	68,2190
EI10	Indicele de reactivitate energetică [%]	0,1036	0,6149
EI11	Gradul de utilizare a pompelor [%]	14,6811	12,0083

Constatări:

PS II a demonstrat o eficiență energetică superioară în ceea ce privește consumul de energie activă (0,1308 kWh/m³) comparativ cu PS I (0,1956 kWh/m³), ambele fiind sub pragul de performanță IWA. Cu toate acestea, PS II a avut un consum semnificativ mai mare de energie reactivă, indicând o gestionare inefficientă și necesitatea compensării. PS I, deși consumă mai multă energie activă, gestionează mai bine energia reactivă. Ambele stații operează cu un grad redus de utilizare a pompelor (sub 15%), afectând eficiența globală. Se impune optimizarea consumului activ în PS I, compensarea energiei reactive în PS II și o utilizare mai eficientă a echipamentelor în ambele stații.

3.5. Concluzii

Utilizarea indicatorilor de performanță conform standardelor IWA și WAREG permite o evaluare comparabilă și obiectivă a funcționării sistemelor de alimentare cu apă, fundamentând decizii strategice și operaționale (1). În municipiul Brașov, aplicarea unei analize multidimensionale – tehnice, energetice, financiare, ecologice și sociale – a evidențiat vulnerabilități și a orientat optimizarea consumului energetic, reducerea pierderilor și creșterea fiabilității serviciilor (2).

Pentru rețeaua de hidranți, indicatori precum consumul pentru stingerea incendiilor sau timpul maxim de utilizare permit o dimensionare adecvată intervențiilor de urgență (3). Introducerea setului de indicatori energetici (EI1–EI11) pentru stațiile de pompare a permis evaluarea eficienței energetice și monitorizarea impactului asupra emisiilor de CO₂ (4).

Modernizarea SCADA, cu tranziția la arhitecturi deschise în rețea și integrarea tehnologiilor IoT, a extins capacitatea de monitorizare, inclusiv pentru rețeaua de hidranți, facilitând reacția în timp real, mentenanța predictivă și optimizarea operațională. Totodată, aceasta presupune consolidarea măsurilor de securitate cibernetică și protecția datelor (5).

Integrarea criteriilor de sustenabilitate, în acord cu politicile UE privind eficiența energetică și reducerea emisiilor, a permis alinierea infrastructurii de apă din Brașov cu obiectivele de dezvoltare durabilă (7). Studiul de caz confirmă eficiența abordării integrate, bazate pe indicatori și tehnologii avansate (SCADA, IoT), în creșterea rezilienței, sustenabilității și eficienței sistemelor urbane de apă (8).

Implementarea unei metodologii riguroase de monitorizare, susținută de indicatori specifici și instrumente digitale, contribuie decisiv la siguranța publică, protecția mediului și sustenabilitatea serviciilor publice de apă.

4. Contribuții privind creșterea eficienței energetice la stații de pompare a apei

4.1. Elemente introductive

Funcționarea sistemelor urbane de alimentare cu apă presupune un consum ridicat de energie electrică, în special în stațiile de pompare, influențat de factori precum tipul echipamentelor, structura rețelei și comportamentul utilizatorilor. Eficiența acestor stații depinde de modul de operare, automatizare și echilibrarea rezervelor, iar pierderile sau consumul excesiv indică necesitatea optimizării.

În acest context, cercetarea propune dezvoltarea unui model predictiv cu comportament dinamic pentru estimarea consumului energetic al stațiilor de pompare din Brașov. Modelul integrează date tehnice, hidraulice și operaționale, vizând evaluarea calității energiei, a bilanțului energetic și a variațiilor de regim.

Studiul contribuie la atingerea obiectivului 3 al cercetării doctorale, prin strategii pentru creșterea eficienței energetice, incluzând: modelarea randamentului echipamentelor, analiza calității energiei, monitorizarea SCADA, identificarea pierderilor și propunerea de soluții tehnico-economice. Rezultatele oferă o bază concretă pentru reducerea consumului, creșterea stabilității și îmbunătățirea eficienței generale a sistemului.

4.2. Analiza caracteristicilor de performanță și a randamentului la unitățile de pompare

4.2.1. Analiza fluxului energetic la unitățile de pompare apă

Analiza performanțelor energetice a unei unități de pompare constă, în primul rând, în evaluarea randamentului celor două componente: pompa și sistemul de alimentare și acționare electrică.

În Fig. 4.1 este prezentată structura unui sistem de pompare a apei potabile cu pompa P, care transportă apa din rezervorul R1, către rezervorul R2 aflat la o cotă superioară H .

Sistemul de acționare este compus din motorul M de antrenare și convertorul de frecvență variabilă CFV. Alimentarea cu energie electrică a echipamentului se realizează de la rețeaua electrică prin intermediul transformatorului TR.

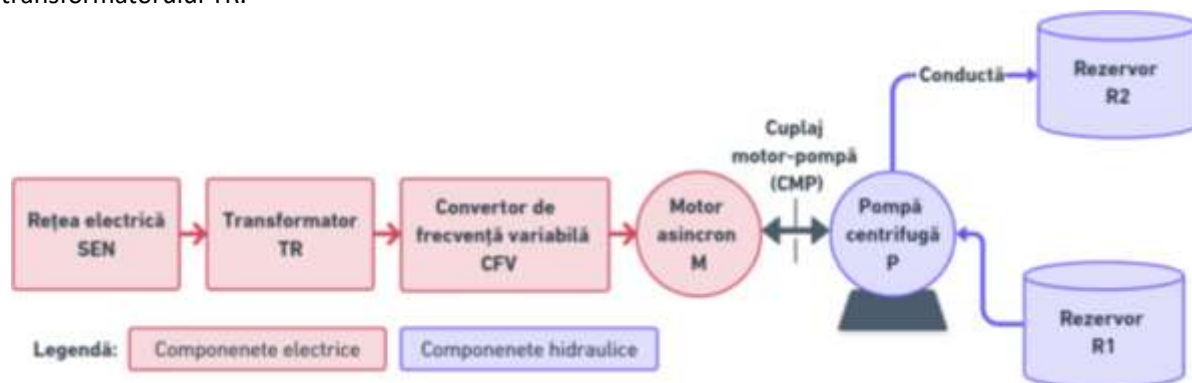


Fig. 4.1. Fluxul energetic și structura unei unități de pompare apă

În acest caz, fluxul energetic constă în alimentarea cu energie electrică a motorului asincron M, cu parametrii definiți de convertorul CFV, transformarea energiei electrice în energie mecanică la nivelul axului motorului electric, prin intermediul cuplajului motor–pomă CMP, conversia energiei mecanice la nivelul rotorului pompei, în energie hidraulică – sub formă de energie cinetică și potențială a fluidului vehiculat, caracterizat prin parametri hidraulici specifici: debitul Q și presiunea p . Procesul de conversie energetică se desfășoară cu pierderi de energie la nivelul tuturor componentelor unității de pompare, începând cu pierderile electrice în transformatorul TR, până la pierderile hidraulice în sistemul de conducte [106], [107], [108].

4.2.2. Analiza performanței și pierderilor în pompa centrifugă și cuplajul motor-pomă

A. Pierderile în pompa centrifugă

Comportamentul funcțional al pompei centrifuge în cadrul unui sistem hidraulic și evaluarea performanțelor acesteia, implică considerarea curbelor caracteristice (Fig. 4.2):

- Curba de performanță energetică $H = H(Q)$;
- Curba caracteristică a instalației $H_{inst} = H_{inst}(Q)$;
- Curba randamentului hidraulic $\eta = \eta(Q)$.

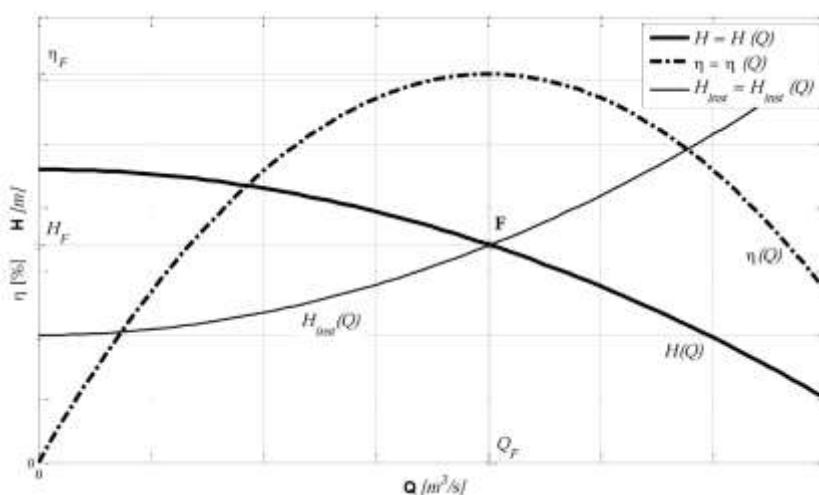


Fig. 4.2. Curbe caracteristice la pompa, după [106]

Curba de performanță energetică este caracteristica energetică a pompei $H = H(Q)$, care reprezintă energia hidraulică specifică pe unitatea de greutate pe care pompa o poate livra pentru un anumit debit Q .

Curba caracteristică a instalației reflectă variația sarcinii hidraulice H_{inst} în funcție de debit, $H_{inst} = H_{inst}(Q)$ și reprezintă variația energia specifică pe unitatea de greutate necesară instalației pentru a asigura debitul de apă în sistemul hidraulic.

Curba randamentului pompei $\eta = \eta(Q)$ depinde de performanțele energetice ale pompei și de caracteristica de sarcină.

Randamentul hidraulic al pompei centrifuge, ca randament global, exprimă eficiența totală a conversiei energiei preluate de la arborele pompei în energie hidraulică utilă, necesară transportului apei, integrând toate categoriile de pierderi interne care afectează performanța pompei: pierderile hidraulice ΔP_h , pierderi volumice ΔP_v și pierderi mecanice ΔP_m .

Randamentul se exprimă cu relația:

$$\eta_p = \frac{P_h}{P_h + \Delta P_h + \Delta P_v + \Delta P_m} = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (4.1)$$

unde: η_h este randamentul hidraulic, care reflectă pierderile de energie cauzate de frecare internă, vârtejuri și șocuri în fluid; η_v este randamentul volumic, care reflectă pierderile de debit datorate scurgerilor interne

și recirculărilor; η_m reprezintă randamentul mecanic, care reflectă pierderile de energie datorate frecărilor în lagăre, etanșări și discurile laterale ale rotorului.

Puterea hidraulică utilă transmisă fluidului este:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (4.2)$$

unde: ρ este densitatea apei, g este accelerația gravitațională, Q debitul de apă vehiculat de pompă, H este înălțimea de pompare.

Funcționarea optimă a unei pompe este atinsă atunci când energia furnizată corespunde exact cerințelor instalației, acest echilibru definind punctul de funcționare energetică cu eficiență maximă. Reglarea debitului se poate face cantitativ, prin vane sau bypass (cu pierderi energetice), sau calitativ, prin modificarea turației cu convertor de frecvență, metodă mai eficientă energetic.

Reducerea turației scade semnificativ consumul de energie, evitând pierderile suplimentare asociate reglării cantitative. Astfel, reglarea calitativă este recomandată pentru creșterea eficienței sistemului de pompare.

În cazul acționării cu motor alimentat prin convertor de frecvență variabilă, în Fig. 4.4 este ilustrat procesul de stabilire a punctului de funcționare pentru cazul când turația pompei este redusă la $n' < n$.

Punctul de funcționare se deplasează din F , corespunzător debitului Q_F , în punctul F' corespunzător debitului $Q_{F'}$. În funcție de forma curbei de randament, deplasarea din punctul F în punctul F' corespund la o variație corespunzătoare a randamentului.

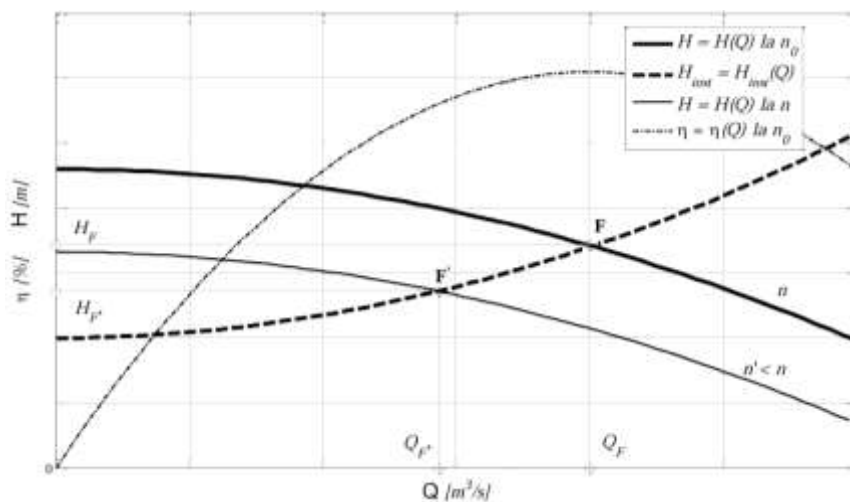


Fig. 4.4. Stabilirea punctului de funcționare al pompei pentru $< Q_n$, adaptat după [106]

În cazul unui sistem în care sarcina variază, implementarea unei pompe acționate de un motor cu turație variabilă este o soluție ce contribuie la reducerea consumului de energie.

B. Pierderi în cuplajul motor-pompă

Cuplarea motorului electric la pompa centrifugă se realizează prin cuplaje rigide sau elastice, iar corespunzător, randamentul cuplajului motor-pompă se poate scrie de forma:

$$\eta_{cpm} = \frac{P_p}{P_{M1}} \quad (4.3)$$

unde: P_p reprezintă puterea pompei, iar P_{M1} reprezintă puterea motorului pompei

Din punct de vedere al eficienței, cuplajele rigide și cele elastice, prezintă pierderi mecanice reduse, cu o transmitere a puterii de peste 99%.

4.2.3. Analiza pierderilor în sistemul de alimentare și acționare electrică a pompei

În analiza energetică a sistemului de acționare a pompei centrifuge, pierderile totale sunt rezultatul contribuției cumulate a mai multor surse, respectiv: pierderile interne în motorul electric asincron (M),

pierderile mecanice în cuplajul motor-pompă și pierderile în convertorul de frecvență (CFV), toate acestea influențând direct eficiența globală a sistemului de pompare.

A. Pierderi în motorul de acționare

Motoarele asincrone sunt frecvent utilizate pentru acționarea pompelor datorită construcției simple, fiabilității ridicate, randamentului bun, costurilor reduse și alimentării directe de la rețeaua trifazată. Totuși, caracteristica mecanică rigidă necesită utilizarea unor sisteme de control pentru reglarea turației și optimizarea consumului energetic.

Reglarea vitezei se face prin modificarea frecvenței și tensiunii de alimentare, menținând raportul U/f constant pentru a păstra cuplul maxim. Convertorul de frecvență permite ajustarea eficientă a turației cu pierderi reduse. Performanța motorului este analizată prin caracteristicile cuplu-alunecare ($M=f(s)$) și turație-cuplu ($n_2=f(M)$), esențiale pentru evaluarea comportamentului în regim de pornire și sarcină.

Randamentul motorului asincron depinde de puterea mecanică utilă transferată pompei, de forma:

$$\eta_M = \frac{P_{M2}}{P_{M1}} = \frac{P_{M2}}{P_{M2} + \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_m} \quad (4.4)$$

unde: P_{M2} este puterea mecanică utilă, P_{M1} este puterea electrică absorbită de motor.

Puterea activă absorbită de motor P_{M1} include puterea utilă și pierderile din motor:

$$P_{M1} = P_{M2} + \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_m \quad (4.5)$$

unde:

ΔP_{Cu1} sunt pierderile prin efect Joule în înfășurarea statorică:

$$\Delta P_{Cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (4.6)$$

unde: m_1 reprezintă numărul de faze ale înfășurării statorice, R_1 reprezintă rezistența electrică a unei faze a înfășurării statorice, iar I_1 este intensitatea curentului de fază.

ΔP_{Fe1} reprezintă pierderile în circuitul magnetic statoric, care apar datorită proceselor de pierderi prin histerezis magnetic ΔP_H și curenți turbionari ΔP_T :

$$\Delta P_{Fe1} = \Delta P_H + \Delta P_T \quad (4.7)$$

ΔP_{Cu2} pierderile prin efect Joule în rotor sunt generate de rezistența înfășurărilor rotorice:

$$\Delta P_{Cu2} = m_2 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \quad (4.8)$$

unde: m_2 reprezintă numărul de faze rotorice, R_2' reprezintă rezistența electrică echivalentă a înfășurării rotorice, iar I_2' este intensitatea curentului rotorice.

ΔP_m reprezintă pierderile mecanice cauzate de frecările din lagăre, rotor și ventilator.

Randamentul motorului asincron (4.4) este determinat de calitatea materialelor active (cupru, oțel electrotehnic), dimensiunile constructive, puterea nominală și soluțiile tehnologice adoptate, precum reducerea frecărilor mecanice și optimizarea ventilației. Tendințele actuale urmăresc utilizarea motoarelor asincrone de înaltă eficiență, în conformitate cu cerințele de performanță energetică și sustenabilitate.

B. Pierderi în convertorul de frecvență

Un convertor de frecvență ajustează dinamic viteza unui motor pentru a optimiza pomparea, reducând consumul de energie și uzura. Acesta funcționează fie în control scalar, fie vectorial, menținând un raport U/f constant pentru stabilitatea fluxului magnetic, deși generează diverse pierderi ce necesită gestionare.

Suma tuturor pierderilor din convertor poate fi exprimată astfel:

$$\Delta P_{CFV} = \Delta P_{cond} + \Delta P_{com} + \Delta P_{mag} + \Delta P_{cap} + \Delta P_{aux} + \Delta P_{mec} + \Delta P_{par} + \Delta P_{emi} \quad (4.9)$$

Randamentul convertorului este definit de relația:

$$\eta_{CVF} = \frac{P_{M1}}{P_{M1} + \Delta P_{CFV}} \quad (4.10)$$

unde: P_{M1} este puterea de intrare în motorul electric și ΔP_{CFV} sunt pierderile în convertorul de frecvență. Pierderile în convertorul de frecvență variabilă determină o scădere a puterii livrate motorului, iar randamentul acestuia reflectă raportul dintre energia utilă transmisă și energia totală absorbită din rețea.

C. Pierderi în transformator

Pentru adaptarea sistemului de acționare electrică a unității de pompare apă la rețeaua electrică de alimentare, în multe cazuri este necesară conectarea la rețeaua electrică prin transformator electric. Astfel, în fluxul de energie electrică (Fig. 4.1) este necesară și considerarea pierderilor din transformator ΔP_{Tr} .

Puterea electrică activă la bornele de alimentare a transformatorului P_{Tr1} este dată de relația:

$$P_{Tr1} = P_{Tr2} + \Delta P_{Tr} = P_{Tr2} + \Delta P_o + \beta^2 \cdot \Delta P_{sc} \quad (4.11)$$

unde:

P_{Tr2} este puterea electrică activă la debitată la bornele înfășurării secundare a transformatorului; ΔP_o sunt pierderile în transformator la funcționarea în gol; ΔP_{sc} sunt pierderile în transformator la funcționarea în scurtcircuit; β – coeficientul de încărcare a transformatorului, care poate fi calculat cu relația

$$\beta = \sqrt{\frac{P_{cons}}{P_n}} \quad (4.12)$$

Randamentul transformatorului este definit cu relația:

$$\eta_{Tr} = \frac{P_{Tr2}}{P_{Tr1}} = \frac{P_{Tr2}}{P_{Tr2} + \Delta P_o + \beta^2 \cdot \Delta P_{sc}} \quad (4.13)$$

Evaluarea eficienței globale a sistemului este influențată de pierderile din transformator, acestea influențând semnificativ randamentul total, mai ales în regimuri de încărcare parțială.

4.2.4. Randamentul unității de pompare – Discuții și perspective

Randamentul total al unității de pompare este definit cu relația:

$$\eta_{UP} = \frac{P_{hu}}{P_a} = \eta_P \cdot \eta_M \cdot \eta_{CMP} \cdot \eta_{CVF} \cdot \eta_{Tr} \quad (4.14)$$

unde: η_{tot} reprezintă randamentul total al sistemului; η_P este randamentul pompei;

η_M este randamentul motorului electric; η_{CMP} este randamentul cuplajului mecanic;

η_{CVF} este randamentul convertorului de frecvență variabilă; η_{Tr} este randamentul transformatorului electric.

În cadrul unui sistem de pompare, fiecare componentă contribuie într-o măsură specifică la eficiența globală a instalației, iar tabelul de mai jos sintetizează valorile tipice ale eficienței și pierderilor pentru principalele elemente constructive.

În Tabelul 4.1 sunt prezentate valorile randamentului pentru elemente componente ale unor sisteme de alimentare și reglare a unităților de pompare [108]; [112]; [113].

Tabel 4.1. Pierderile în unitățile de pompare

Nr. crt.	Componente în sistemul de pompare	Randament (%)	Pierderi (%)
1	Pompe	85–90	10–15
2	Cuplaj	~99	~1
3	Motoare	>90	<10
4	Cabluri	~98	~2
5	Convertor de frecvență variabilă	95–98	2–5
6	Transformator	~99	~1

Utilizarea echipamentelor performante și evaluarea constantă a parametrilor operaționali sunt elemente importante în dezvoltarea durabilă a sistemelor de pompare.

Discuții și perspective

Pentru a reduce costurile și consumul în sistemele de pompare, este crucial să se îmbunătățească eficiența hidraulică a pompelor, eficiența energetică pe întreg lanțul de conversie. Acest lucru se realizează prin utilizarea motoarelor asincrone de înaltă eficiență, care, oferă randamente superioare. De asemenea, convertoarele de frecvență sunt esențiale pentru a adapta dinamic turația motorului la cerințele procesului, reducând astfel consumul și uzura mecanică.

4.3. Determinarea consumului de energie și a intensității energetice la stația de pompe Măgurele

4.3.1. Descrierea stației de pompare apă

Stația de pompare Măgurele este parte integrantă a sistemului de alimentare cu apă potabilă al municipiului Brașov, situată în zona vestică a orașului, la altitudinea de 585 metri. Aceasta joacă un rol esențial în alimentarea cu apă a stațiunii Poiana Brașov, asigurând transportul apei către zonele înalte pentru menținerea presiunii și debitului necesar consumatorilor.

Sursa principală de apă este frontul de captare Măgurele, format din trei puțuri forate echipate cu pompe submersibile, cu un debit total de 172 m³/h. A doua sursă provine din rețeaua urbană, cu un aport de 115 m³/h. Apa din cele două surse este colectată în rezervoarele de aspirație R₁ și R₂ (capacitate totală 1200 m³), de unde este pompată către rezervorul R₃ (2000 m³), destinat distribuției către consumatori.

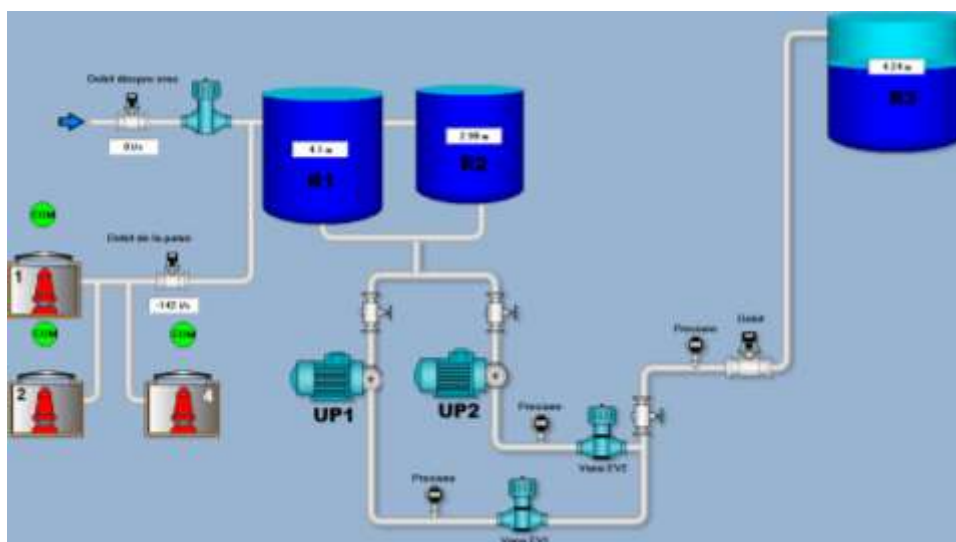


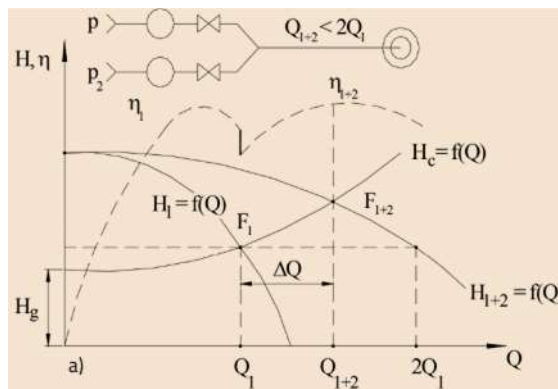
Fig. 4.3. Schema hidraulică a stației de pompe Măgurele

Între anii 2009–2010, unitățile de pompare UP1 și UP2 au fost modernizate, fiind echipate cu două pompe centrifuge multietajate tip MTC A ($Q_n = 299,99 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_n = 450 \text{ m}$), acționate de motoare asincrone trifazate de 500 kW, alimentate la 0,4 kV. Pentru protecția rețelei și reducerea curentului de pornire, au fost instalate soft startere tip MCD3500, care asigură o pornire lină a motoarelor și reduc uzura mecanică.

În Fig. 4.10.a sunt vizualizate cele două unități de pompare pompă – motor, cu conductele de refulare ale celor două pompe montate în paralel și armăturile certificate la o presiune nominală de 64 bari, corpul celor două pompe centrifuge cu patru etaje și electro-vanele de pe conducta de refulare. În Fig. 4.10.b sunt prezentate caracteristicile pompelor la funcționarea în paralel.



a)



b)

Fig. 4.10. Grupul de pompe tip MTC A 125/1LA8 357-2AC60 – 500 kW: a) vedere generală; b) caracteristici de performanță la funcționarea în paralel a pompelor

Modul de operare al stației de pompe este în regimul alternativ de funcționare, astfel încât să fie utilizată doar o pompă la un moment dat. Această strategie asigură un echilibru între eficiența energetică, protecția echipamentului și continuitatea procesului de pompare.

Înainte de modernizare, stația funcționa cu patru pompe centrifuge de tip TA 150-100-400/418 CX39, fabricate de Aversa București, fiecare având un debit de $Q_n = 230 \text{ m}^3/\text{h}$ și o înălțime de pompare $H = 225 \text{ m}$, la turația de sincronism de $n_s = 3000 \text{ rpm}$. Aceste pompe erau acționate de motoare electrice asincrone trifazate, tip JB560M1, produse de Jiamusi Electric Motor Works, cu o putere nominală de $P_n = 250 \text{ kW}$, alimentate la tensiunea de 6 kV.

În Tabelul 4.2 sunt prezentate caracteristicile hidraulice și electrice ale unităților de pompare.

Tabel 4.2. Caracteristici tehnice ale unităților de pompare de la Stația de pompare Măgurele

Caracteristici tehnice	Unități de pompare în funcțiune	Unități de pompare de rezervă
Specificații hidraulice		
Producător pompă	KSB	Aversa
Model pompă	MTC A 125/04-101-22.67	TA 150-100-400/4180X39
Debit (Q_n)	299.99 m^3/h	230 m^3/h
Înălțime de pompare (H_n)	450 m	225 m
Viteză de rotație (n_n)	2982 rpm	3000 rpm
An fabricație pompă	2008	1985
Specificații electrice		
Producător motor	Siemens	Jiamusi Electric Motor Works
Model motor	1LA8 357-2AC60	JB 560 M
Putere nominală (P_n)	500 kW	250 kW
Tensiune nominală (U_n)	0,4 kV (Δ), 0,69 kV (Y)	6 kV (Y)
Frecvență nominală (f_n)	50 Hz	50 Hz
Curent nominal (I_n)	820 A(Δ), 475 A (Y)	30,7 A (Y)
Serviciul (IEC 60034-1)	Serviciu continuu de utilizare S1	Serviciu continuu de utilizare S1
Turație nominală (n_n)	2982 rpm	2976 rpm
Masă motor	2200 kg	2700 kg
An fabricație motor	2008	1983

Sistemul de monitorizare

Monitorizarea parametrilor electrici și hidraulici, inclusiv energia electrică activă E_a , energia reactivă E_r , debitul Q și presiune p , se realizează printr-un sistem SCADA, dedicat pentru monitorizarea acestor mărimi. Parametrii electrici, sunt monitorizați la punctul de măsurare situat pe barele de 20 kV și o parte pe bara de 6 kV (Fig. 4.12). Datele colectate sunt utilizate atât pentru analiza performanței sistemului, cât și pentru facturarea consumului de energie al stației de pompe.

Parametrii hidraulici, volum de apă, debit și presiune, sunt monitorizați la nivelul stației de pompe și în dispecerat. Datele colectate sunt monitorizate la nivelul dispeceratului și în baza lor se iau decizii referitoare la pornirea/oprirea grupurilor de pompe, reglarea/închiderea unor trasee sau se identifică diferite probleme. Pornirea și oprirea grupurilor de pompe se face la nivelul stație de către tura de servicii.

Analiza acestor date permite evidențierea punctelor critice asociate pierderilor de energie și a ineficiențelor din procesul operațional. În baza informațiilor obținute, va fi evaluată performanța sistemului, cu scopul de a fundamenta decizii orientate către diminuarea consumului energetic și optimizarea sustenabilității în cadrul interacțiunii dintre resursele de apă și energie.

4.3.2. Analiza calității energiei cu măsurători locale

Calitatea energiei electrice se referă la comportamentul în timp al mărimilor electrice și la menținerea acestora în limitele specificate de standarde, astfel încât să se asigure funcționarea corectă a echipamentelor electrice [119].

Analiza propusă în acest studiu a avut ca scop identificarea eventualelor variații de tensiune, dezechilibre de sarcină sau fluctuații de curent care pot influența regimul de funcționare al motorului asincron de antrenare a pompei din cadrul unității de pompare UP1.

Descrierea setului de date

În vederea analizei calității energiei electrice pentru alimentarea unității de pompare UP1 s-a considerat setul de măsurători electrice efectuate în punctul de măsurare PM2 de pe barele de 0.4 kV. Pentru măsurători s-a utilizat analizorul de rețea electrică trifazată tip Qualistar. Datele au fost puse la dispoziție de către furnizorul de apă și sunt prezentate în Anexa 4. În Fig. 4.13 sunt indicate cele două puncte de măsură.

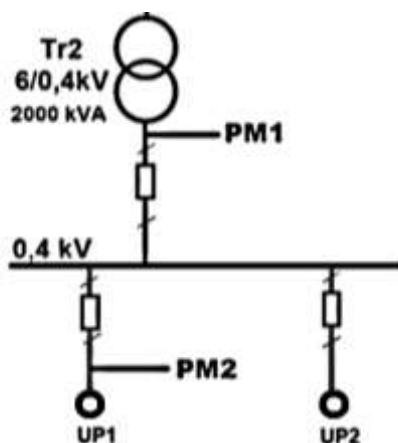


Fig.4.13. Puncte de măsurare a mărimilor electrice pentru unitatea UP1 din cadrul Stației de pompe Măgurele

Măsurătorile au fost realizate în data de 21.01.2020, în regim de funcționare continuă a ansamblului motor–pompa, pe o durată de 639 de secunde, pentru două intervale de măsurare:

- Set de date 1: 21.01.2020, interval 10:18:00-10:21:44, total măsurări 361;
- Set de date 2: 21.01.2020, interval 10:28:00-10:32:43, total măsurări 278.

Durata măsurătorilor a fost stabilită ținând cont de condițiile tehnico-organizatorice locale, incluzând disponibilitatea echipamentului de măsură, accesul la infrastructura electrică a stației și prezența personalului de operare.

Mărimile electrice monitorizate au fost: tensiunea electrică de linie U_l , intensitatea curentului electric I , puterea activă P_a și puterea reactivă P_r . Aceste variabile sunt utilizate în evaluarea performanței electrice a echipamentului și permit analiza regimului de alimentare din perspectiva calității energiei electrice.

Cu datele monitorizate, prezentate în Anexa 4, s-au reprezentat curbele tensiunii de linie $U_l(t)$ pentru intervalul considerat, în cele două puncte de măsurare (Fig. 4.14).

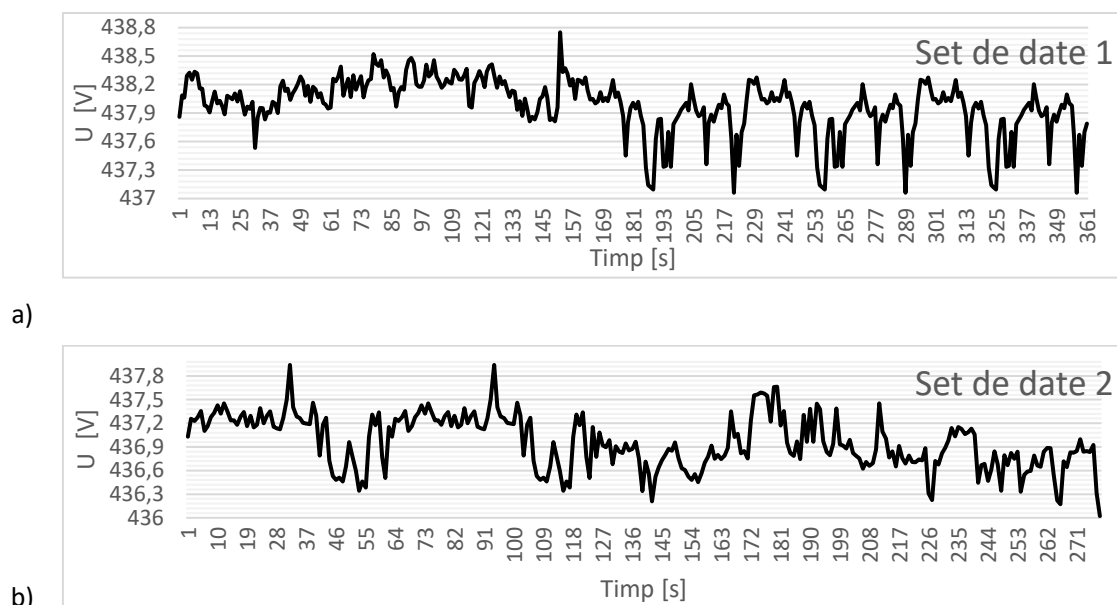


Fig.4.14. Curba tensiunii de linie $U_l = f(t)$ pentru unitatea de pompare UP1 cu: a) Set de date 1, b) Set de date 2

Cu datele monitorizate (Anexa 4), s-a reprezentat curba intensității curentului de sarcină $I(t)$ pentru intervalul considerat, în cele două puncte de măsurare (Fig. 4.15).

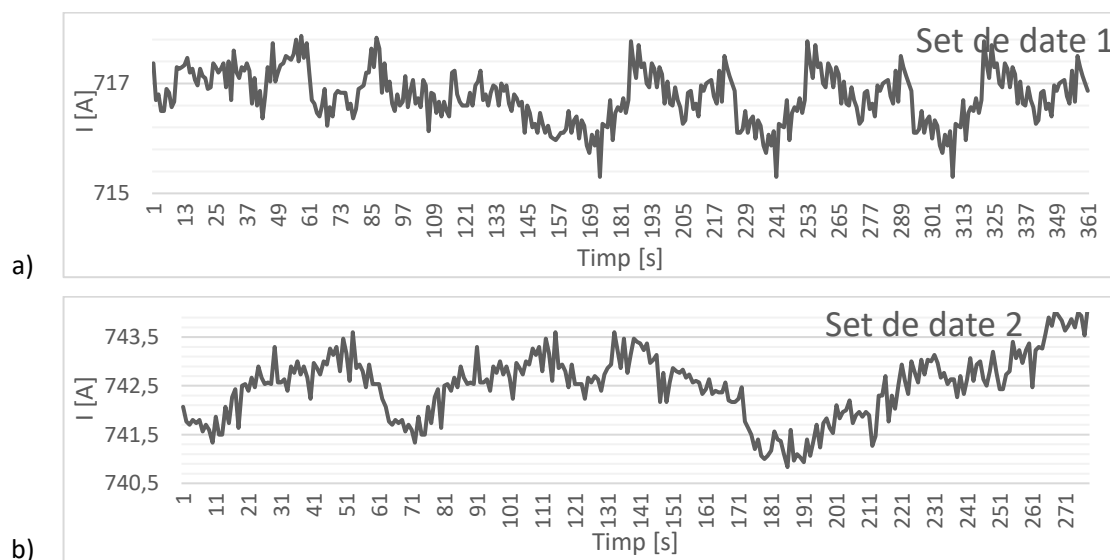


Fig. 4.15. Curba intensității curentului de sarcină $I = f(t)$ pentru unitatea de pompare UP1 cu: a) Set de date 1, b) Set de date 2

Cu datele monitorizate (Anexa 4), s-a reprezentat curba puterii active $P_a = f(t)$ consumate în interval de timp considerat, în cele două puncte de măsurare (Fig. 4.16).

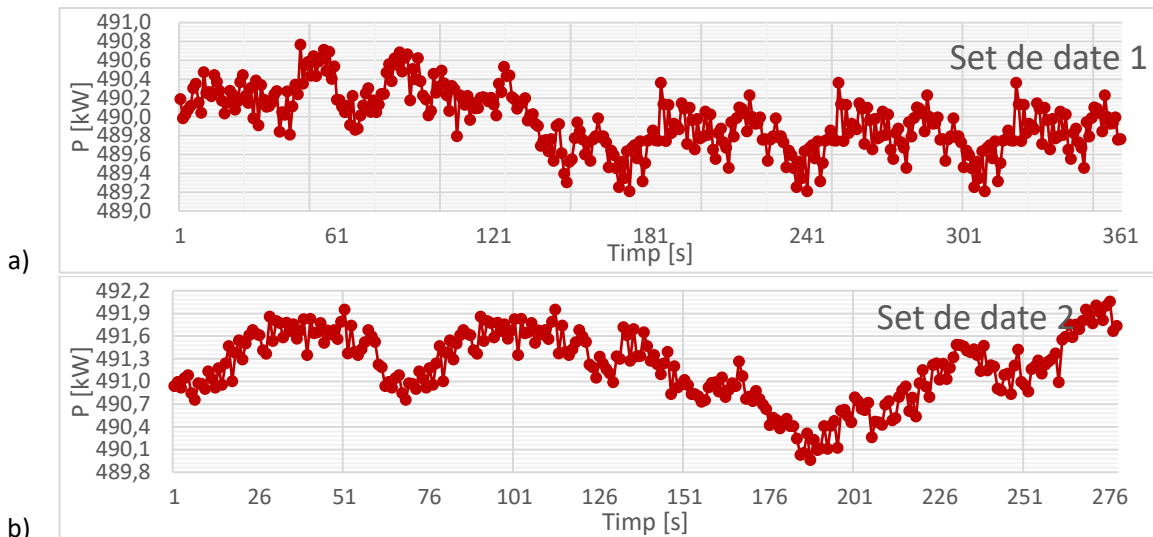


Fig. 4.16. Curba puterii active $P_a = f(t)$ consumată de unitatea de pompare UP1 cu: a) Set de date 1; b) Set de date 2

Cu datele monitorizate (Anexa 4), în Fig. 4.17 s-au prezentat curbele pentru factorul de putere în interval de timp considerat, în cele două puncte de măsurare.

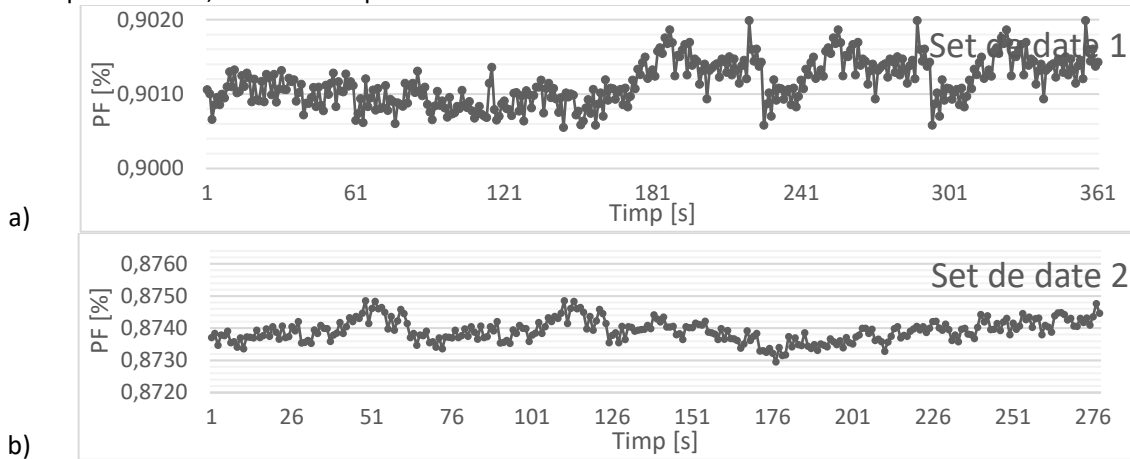


Fig. 4.17. Curba $\cos \varphi = f(t)$ pentru energia electrică de alimentare a UP1 cu: a) Set de date 1; b) Set de date 2

Rezultatele obținute permit evaluarea conformității dintre caracteristicile alimentării electrice și cerințele de funcționare ale sistemului motor-pompă, constituind o bază pentru formularea unor măsuri de reglare sau îmbunătățire a regimului de lucru, în vederea unei utilizări mai eficiente a energiei și a reducerii solicitărilor nedorite asupra unității de pompare și a consumatorilor din serviciile interne.

Prelucrări statistice

Având în vedere volumul mare de date, prelucrarea acestora într-un timp scurt necesită stabilirea unor proceduri adecvate de prelucrare statistică a datelor. Statistica descriptivă oferă concepte și proceduri simple și ușor de implementat [120]; [121].

Mărimile specifice care pot caracteriza șirul de date $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ sunt:

Media aritmetică se calculează cu relația:

$$X_{med} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.15)$$

unde N este numărul total de elemente ale șirului, x_i este valoarea elementului i al șirului, și X_{med} este media aritmetică a șirului de date.

Abaterea medie pătratică se obține ca rădăcina pătrată a dispersiei D_s cu relația:

$$s = \sqrt{D_s} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - X_{med})^2} \quad (4.16)$$

unde: s este abaterea medie pătratică, iar X_{med} reprezintă valoarea medie aritmetică a șirului de date.

Coeficientul de variație a șirului de date se obține ca raport procentual între abaterea medie pătratică și media aritmetică a valorilor șirului de date:

$$CV = \frac{s}{X_{med}} \cdot 100 [\%] \quad (4.17)$$

Cu ajutorul coeficientului de variație pot fi comparate dispersiile diferitelor distribuții după variabilele exprimate în unități de măsură diferite. Coeficientul de variație furnizează informații dacă șirul de date este sau nu este omogen.

Coeficientul de variație poate lua valori cuprinse între $0 < CV < 100 \%$. Când CV tinde spre zero, variabilitatea este redusă, deci populația este omogenă, iar media are un grad de reprezentativitate ridicat. Cu cât nivelul coeficientului de variație tinde spre 100% cu atât variabilitatea este mai mare, populația este mai eterogenă, iar media are un nivel de reprezentativitate mai scăzut.

Ca urmare, coeficientul de variație poate fi folosit ca și test de semnificație a reprezentativității mediei, considerându-se următoarele praguri de semnificație:

- $0 < CV \leq 17 \%$ - media este strict reprezentativă;
- $17 < CV \leq 35 \%$ - media este moderat reprezentativă;
- $35 < CV \leq 50 \%$ - media este reprezentativă în sens larg;
- $CV > 50 \%$ - media este nerepresentativă.

Coeficientul de formă este dependent de coeficientul de variație CV și se calculează cu relația:

$$k_f = \sqrt{1 + (CV)^2} \quad (4.18)$$

Eroarea standard este dependentă de eroarea medie pătratică s și se calculează cu relația:

$$SE = \frac{s}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - X_{med})^2}}{\sqrt{N}} \quad (4.19)$$

Eroarea standard se folosește pentru a determina intervalul de încredere a mediei. Valoarea medie și eroarea standard reprezintă principalii descriptori pentru un șir de date rezultate din măsurători. Dacă eroarea standard e mare, media nu e reprezentativă pentru șirul de date.

(1) Analiza datelor pentru tensiunea electrică

Tensiunea electrică este mărimea fundamentală care determină potențialul de transfer al energiei electrice între două puncte ale unui circuit. Stabilitatea și valoarea nominală a tensiunii asigură calitatea energiei electrice, influențând direct funcționarea echipamentelor și eficiența unității de pompare. Analiza variației tensiunii permite identificarea fluctuațiilor, dezechilibrelor și a posibilelor abateri de la regimul normal de operare, factori care pot afecta performanța și fiabilitatea echipamentului.

Conform SR EN 50160:2011 în rețelele de joasă tensiune (400 V), variația admisibilă a tensiunii este de $\pm 10 \%$. Pentru tensiunea nominală de 400 V, rezultă domeniul admisibil: $(400 \pm 40) V$.

Cu relațiile (4.1) – (4.5) s-au calculat indicatorii statistici pentru șirurile de valori ale tensiunii de linie $\{U_i\}$, măsurate în punctul de măsurare PM1 ($N=361$) și în punctul de măsurare PM2 ($N=271$).

Prelucrarea datelor pentru obținerea parametrilor statistici s-a făcut în Excel. Valorile obținute sunt centralizate în Tabelul 4.3.

Tabel 4.3. Parametrii statistici pentru tensiunea de alimentare a unității de pompare UP1 pentru set de date 1 și 2

Punct de măsură	U_{med} [V]	U_{min} [V]	U_{max} [V]	s [V]	SE [V]	CV [%]
Set de date 1	437,9774	437,0613	438,7509	0,0154	0,0154	0,0006

Set de date 2	436,9618	436,0228	437,9409	0,3378	0,0202	0,0007
---------------	----------	----------	----------	--------	--------	--------

Constatări:

Ambele seturi de date arată o stabilitate ridicată a tensiunii de alimentare, cu valori medii de 437,98 V (Set 1) și 436,96 V (Set 2), încadrându-se în intervalul admisibil (360 V - 440 V) conform standardului SR EN 50160:2011. Eroarea standard și coeficientul de variație, ambele foarte mici, confirmă o dispersie redusă a tensiunii. Deși calitatea alimentării este ridicată, tensiunea medie de 438,02 V a unității UP1 depășește tensiunea nominală a motorului, aspect ce ar putea afecta durabilitatea echipamentului și necesită o analiză tehnică detaliată. Factorul de formă al tensiunii, aproape de 1, indică o formă sinusoidală, benefică pentru funcționarea echipamentelor electrice.

(2) Analiza datelor pentru intensitatea curentului electric de sarcină

Intensitatea curentului electric este un parametru esențial în analiza regimului de funcționare al echipamentelor, având un rol direct în evaluarea calității energiei electrice furnizate. Variația intensității curentului reflectă fluctuații de consum, dezechilibre între faze sau stări tranzitorii ale sistemului pompă-motor, influențând eficiența și stabilitatea energetică.

Cu relațiile (4.1) – (4.5) s-au calculat indicatorii statistici pentru șirurile de valori ale curentului de sarcină $\{I_i\}$, măsurate Set de date 1 ($N=361$) și Set de date 2 ($N=271$).

Prelucrarea datelor pentru obținerea parametrilor statistici s-a făcut în Excel. Valorile obținute sunt centralizate în Tabelul 4.4.

Tabel 4.4. Parametrii statistici pentru intensitatea curentului electric de sarcină cu Setul de date 1 și 2

Punct de măsură	I_{med} [A]	I_{min} [A]	I_{max} [A]	s [V]	SE	CV
Set de date 1	716,76	715,30	717,86	0,4724	0,0248	0,0006
Set de date 2	742,50	740,83	744,13	0,6785	0,0406	0,0009

Constatări:

Media intensității curentului electric în Setul de date 1 (716,76 A) și Setul de date 2 (742,50 A) indică o funcționare a motorului în regim de sarcină parțială, sub intensitatea nominală de 820 A. Diferența dintre cele două seturi de date se datorează poziționării distincte a punctelor de măsurare: Setul 2 reflectă consumul direct al motorului, în timp ce Setul 1 înregistrează un curent agregat, influențat de alți consumatori sau pierderi. Fluctuațiile curentului sunt mai reduse în Setul de date 1 datorită efectului de compensare al mai multor consumatori, în timp ce Setul 2 surprinde direct variațiile sarcinii motorului.

(3) Analiza datelor pentru puterea activă

Curba de sarcină pentru unitatea de pompare descrie variația puterii active P_a consumate pentru un interval de timp t de funcționare: $P_a = f(t)$. Datele măsurate au fost prelucrate statistic cu Excel. Cu relațiile (4.1) – (4.5) s-au calculat indicatorii statistici pentru șirurile de valori ale puterii active $\{P_{ai}\}$, măsurate în punctul de măsurare PM1 ($N=361$) și în punctul de măsurare PM2 ($N=271$). În Tabelul 4.5 sunt prezentate valorile obținute pentru: medie, abatere standard și asimetrie.

Tabel 4.5. Parametrii statistici pentru puterea activă intrată în unitatea de pompare UP1, măsurată în punctele de măsurare Set de date 1 și Set de date 2

Punct de măsură	P_{med} [kW]	P_{min} [kW]	P_{max} [kW]	S [kW]	SE	CV
Set de date 1	489,9599	489,2080	490,7670	0,3148	0,0165	0,0006
Set de date 2	491,1921	489,9590	492,0530	0,4524	0,0271	0,0009

Constatări:

- Valorile medii pentru puterea activă intrată în unitatea de pompare UP1 sunt $P_{med_1} = 489,95$ kW (în cazul setului de date 1) și de $P_{med_2} = 491,19$ kW (în cazul setului de date 2), care sunt valori sub puterea electrică corespunzătoare funcționării în regim nominal: $P_{an} = P_n / \eta_n = 549,45$ kW.
- Funcționarea motorului electric de antrenare a pompei sub punctul nominal implică o deplasare a punctului hidraulic de funcționare spre domenii caracterizate de randamente hidraulice și energetice mai scăzute, conform informațiilor din secțiunea 4.2.2.A.
- Valoarea abaterii standard a puterii active este mai mică în Setul de date 1 (0,314867 kW), comparativ cu Setul de date 2 (0,452410 kW), ceea ce indică o dispersie mai redusă a valorilor și, implicit, o stabilitate superioară a consumului în primul caz.
- Valoarea minimă a puterii active este mai mare în Setul de date 2 (489,959 kW) decât în Setul de date 1 (489,208 kW), sugerând că, în Setul de date 2, consumul de putere nu a atins niveluri minime la fel de reduse.
- Valoarea maximă a puterii active este, de asemenea, mai mare în Setul de date 2 (492,053 kW) față de Setul de date 1 (490,767 kW), indicând prezența unor vârfuri de consum mai pronunțate în al doilea caz.

Factorul de utilizare reprezintă raportul dintre valoarea medie a unei mărimi și valoarea nominală a aceleiași mărimi, fiind utilizat pentru a exprima gradul de utilizare a capacității nominale a unui sistem sau echipament electric.

Factorul de utilizare în cazul setului de măsurători pentru puterea activă se calculează cu relația

$$k_{up} = \frac{P_{amed}}{P_{an}} \quad (4.20)$$

Unde P_{amed} este puterea activă medie, iar P_n este puterea nominală.

Această mărime adimensională oferă informații suplimentare despre eficiența exploatării resurselor disponibile și despre încărcarea efectivă a sistemului:

- Un factor de utilizare apropiat de 1 sugerează că puterea activă medie se apropie mult de puterea nominală, indicând o utilizare eficientă și aproape completă a capacității sistemului.
- Valori semnificativ mai mici de 1 indică o subutilizare a resurselor disponibile, sugerând că sistemul funcționează mult sub capacitatea sa nominală.

Valoarea medie a puterii active calculate pentru intervalul de măsurare considerat, precum și valoarea factorului de utilizare sunt prezentate în Tabelul 4.6.

Tabel 4.6 Valorile calculate puterea activă medie și factorul de utilizare pentru măsurători la Unitatea de pompare 1

Nr. crt.	Mărime fizică măsurată	Simbol	Set de date 1	Set de date 2
1	Putere activă medie absorbită [kW]	P_{amed}	489,95	491,19
2	Putere activă nominală la arbore [kW]	P_{an}	500	500
3	Factor de încărcare [%]	k_{up}	0,97	0,98

Puterea nominală a motorului este puterea la arbore, deci puterea mecanică.

Constatări:

Valorile foarte apropiate de 1 determinate pentru factorul de încărcare indică faptul că sistemul funcționează aproape de capacitatea sa nominală în ambele puncte de măsură, sugerând o utilizare eficientă a resurselor disponibile. Procentele de 97,99% în primul caz și 98,24% în cazul doi arată că nu există suprasolicitare și că sistemul funcționează într-un regim optim.

(4) Analiza datelor pentru factorul de putere

Factorul de putere, definit ca raportul dintre puterea activă și cea aparentă, este un indicator esențial al eficienței energetice și al calității energiei electrice. Pentru un regim energetic optim, standardele tehnice impun menținerea acestuia peste valoarea de 0,92. Setul de date 1 respectă această cerință, indicând un regim eficient, în timp ce în Setul de date 2 se constată o scădere sub pragul reglementat, ceea ce sugerează pierderi energetice și necesitatea unor intervenții. Astfel, se impune aplicarea unor măsuri corective, precum compensarea energiei reactive și echilibrarea sarcinilor, pentru restabilirea eficienței și a calității alimentării.

4.3.3. Analiza consumului de energie electrică pentru anul 2024

Eficiența energetică a stației de pompe este direct legată de randamentul unităților de pompare și de modul de exploatare și utilizare a echipamentelor.

Pentru a determina căile de creștere a eficienței Stației de pompe Măgurele, s-au considerat datele furnizate de sistemul SCADA privind consumurile de energie electrică activă și reactivă pentru anul 2024.

Descrierea setului de date

Setul de date reflectă valorile înregistrate în punctul de măsură PMC situat pe bara de 20 kV, permițând monitorizarea consumului întregului ansamblu alimentat din rețeaua de medie tensiune, prin intermediul contorului ELSTER A1800 ALPHA. În conturul de măsură sunt incluse atât transformatoarele Tr1, Tr2 și Tr3, cât și consumatorii principali (UP1 și UP2) și auxiliari (încălzire – 24 kW, iluminat – 3 kW, echipamente diverse – 3,5 kW).

Datele monitorizate de sistemul SCADA cuprind măsurătorile electrice de energia activă E_a și energia reactivă E_r , efectuate în punctul de măsurare PMC, pe parcursul întregului an 2024, cu frecvența de înregistrare de o oră pentru energia activă ($N= 8\ 784$) și de 15 minute pentru energia reactivă și factorul de putere ($N=35\ 136$).

Datele înregistrate, împreună cu prelucrările statistice relevante și reprezentările grafice aferente, sunt prezentate în Anexa 5.

În Fig. 4.19 sunt prezentate curbele consumului de energie activă, consumului de energie reactivă și evoluția factorului de putere pentru anul 2024. Pentru reprezentarea acestui grafic s-au procesat datele pentru consumul zilnic și valorile obținute sunt reprezentate grafic.

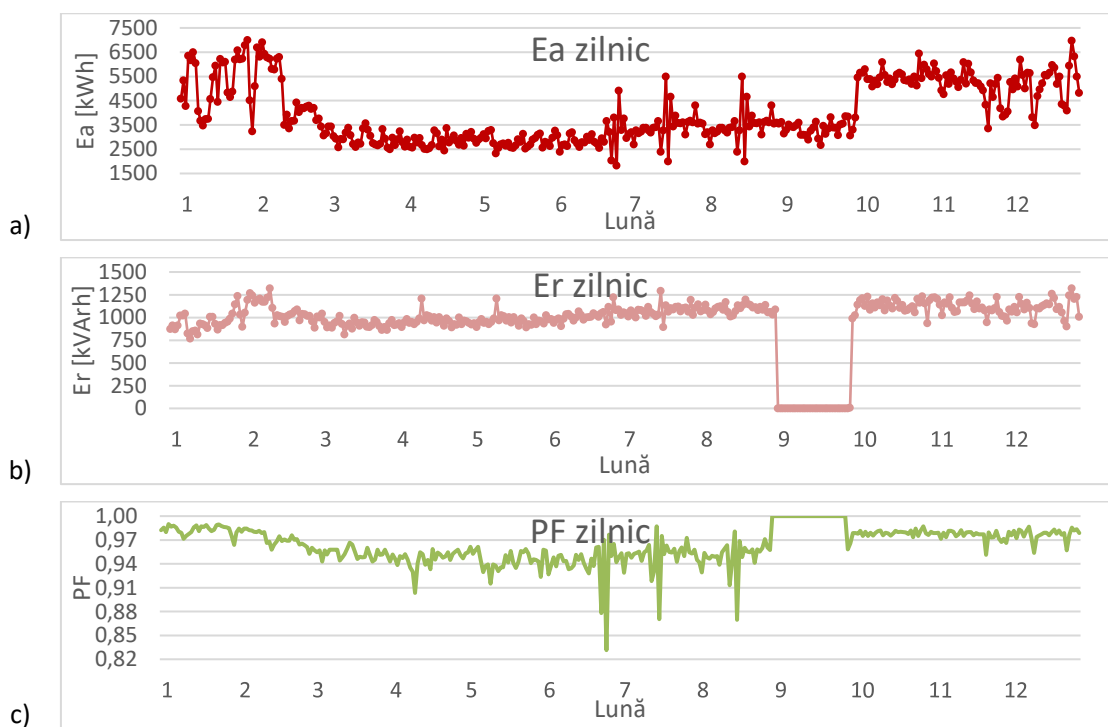


Fig. 4.19. Graficul datelor monitorizate cu SCADA la Stația de pompe Măgurele în anul 2024 pentru: a) Energia electrică activă, b) Energia electrică reactivă, c) Factorul de putere

Cele trei grafice din Fig. 4.19 evidențiază evoluția consumului zilnic de energie activă (E_a), energie reactivă (E_r) și a factorului de putere (PF) pe parcursul anului 2024, indicând o variabilitate sezonieră semnificativă a energiei active, consum zero de energie reactivă în luna septembrie (datorită exceptării de plată), iar în ceea ce privește factorul de putere, acesta se menține în general peste 0,94, cu scăderi punctuale în lunile aprilie, iunie și iulie, ceea ce sugerează episoade temporare de funcționare ineficientă din punct de vedere energetic.

(1) Analiza consumului lunar de energie electrică pentru anul 2024

Având în vedere că raportarea consumurilor se face lunar, s-a analizat mai întâi uniformitatea consumului de energie electrică în anul 2024 la stația de pompe Măgurele. Datele au fost prelucrate în Excel.

Situația consumului lunar de energie activă și reactivă pentru anul 2024, exprimat în MWh, este reprezentat în Fig. 4.20 și în Tabelul 4.7.

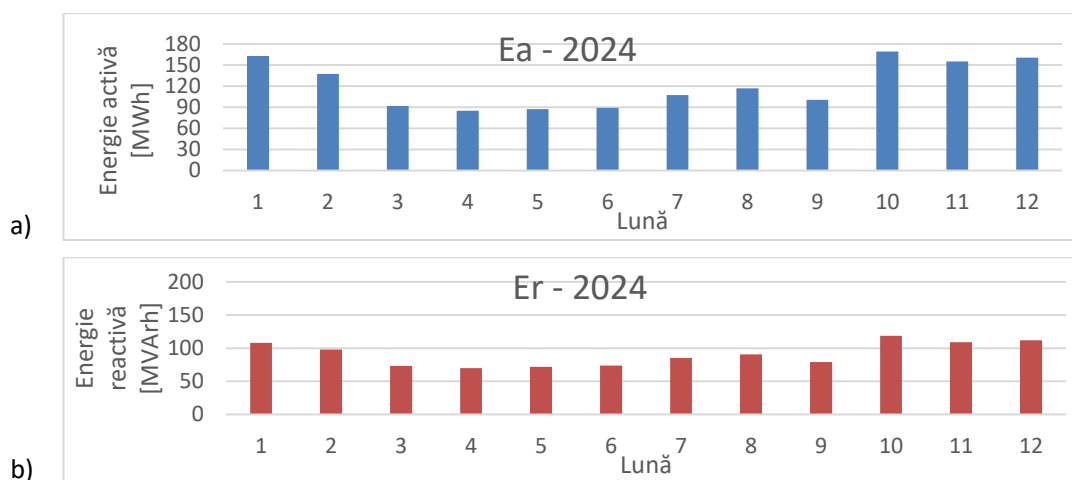


Fig. 4.20. Graficul consumului lunar de energia activă (a) și energie reactivă (b) la Stația de pompe Măgurele în anul 2024

Fig. 4.20 evidențiază o variație sezonieră a consumului de energie activă și reactivă în anul 2024, cu valori minime în lunile de primăvară (martie–mai), corespunzătoare unui regim de funcționare redus, și valori maxime în lunile de toamnă și iarnă (octombrie–decembrie), când se observă o intensificare a sarcinii energetice, posibil asociată cu condiții de exploatare specifice sau cu cerințe tehnologice crescute.

Constatări:

Consumul de energie al stației variază sezonier, cu maxime în octombrie (169 MWh activă, 118,87 MVarh reactivă) și minime în aprilie, indicând o cerere fluctuantă. Media anuală este de 121,89 MWh energie activă și 90,79 MVarh energie reactivă, cu oscilații moderate. Se observă o discrepanță medie de 61,56 MVarh între energia reactivă măsurată și cea facturată, aspect ce necesită atenție pentru optimizarea consumului și adaptarea regimului de funcționare.

(2) Analiza consumului zilnic de energie electrică pentru anul 2024

Pentru o evaluare detaliată a regimului de funcționare a Stației de pompe Măgurele în anul 2024, s-au centralizat și analizat valorile zilnice ale energiei electrice active E_a , energiei electrice reactive E_r și ale factorului de putere $\cos \varphi$, pe baza măsurătorilor efectuate în PMC, preluate de SCADA și prezentate în Anexa 5. Prin această analiză s-a urmărit identificarea tendințelor de consum, evaluarea performanței energetice zilnice și fundamentarea deciziilor privind optimizarea utilizării energiei, inclusiv prin măsuri de reducere a energiei reactive și îmbunătățirea factorului de putere.

Prelucrarea datelor orare pentru obținere valorilor zilnice și pentru determinarea parametrilor statistici s-a făcut în Excel. Pentru valorile E_a , E_r și PF s-au obținut un număr total de $N=1098$ de valori, care sunt centralizate în Tabelul 4.8.

Tabel 4.7. Prelucrări statistice pentru consumul zilnic de energia activă, energia reactivă și pentru factorul de putere pentru anul 2024.

Prelucrări statistice	E_{az} [kWh]	E_{rz} [kVarh]	PF_z [%]
Valoarea medie	3970,32	953,12	0,9643
Eroarea standard	64,16	15,79	0,0011
Abaterea standard	1227,563	302,17	0,0221
Valoarea minimă	1826	6,03	0,8314
Valoarea maximă	6997	1320,33	1
Număr de citiri	366	366	366

Constatări:

Variațiile consumului energetic zilnic al stației se manifestă prin maxime de 6997 kWh energie activă (E_a) și 1320,33 kVarh energie reactivă (E_r), influențate de sarcina inductivă. Media zilnică este de 3970,32 kWh pentru E_a și 953,12 kVarh pentru E_r . Se remarcă o discrepanță zilnică medie de 61,56 kVarh între energia reactivă măsurată și cea facturată, posibil justificată contractual.

(3) Determinarea timpului efectiv de funcționare a unităților de pompare

Analiza raportului între timpul de funcționare a unităților de pompare și timpul de oprire s-a realizat prin prelucrarea setul de date pentru energia activă $E_a(t)$, monitorizate cu sistemul SCADA și prezentate în Anexa 5.

Din șirul $\{t_i\}$ corespunzător intervalelor de timp monitorizate ($N=8784$) s-au separat și construit șirul de date cu timpii de funcționare $\{t_{fi}\}$ și cel cu timpii de nefuncționare/oprire $\{t_{oi}\}$, cu următoarea condiție: $t_{oi} \neq 0$ pentru $E_a \leq 0,350$ kWh.

S-au calculat, duratele de funcționare T_{fi} și duratele de oprire T_{oi} pentru fiecare lună din anul 2024 prin însumarea termenilor șirurilor corespunzătoare orelor de funcționare/oprire.

$$T_{fi} = \sum_i t_{fi}, \text{ cu } i=1, \dots, 12 \quad (4.21)$$

$$T_{oi} = \sum_i t_{oi}, \text{ cu } i=1, \dots, 12 \quad (4.22)$$

În Fig. 4.21 este prezentat graficul duratelor de funcționare și a duratelor de oprire, pentru toate lunile din anul 2024, aferent unităților de pompare din cadrul Stației de pompe Măgurele.

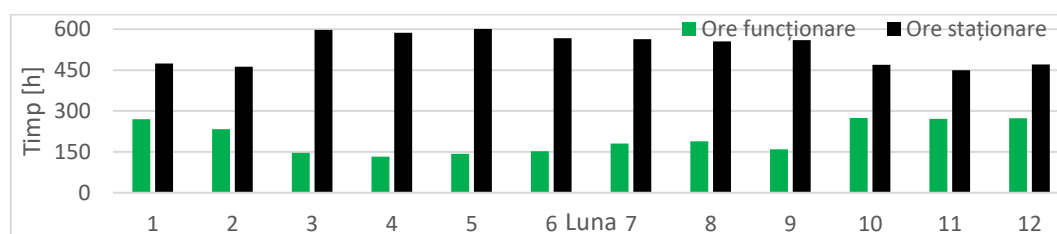


Fig. 4.21. Graficul duratelor de funcționare și a duratelor de oprire corespunzătoare unităților de pompare pentru lunile din anul 2025

În Tabelul 4.9 sunt centralizate valorile timpilor de funcționare și de oprire, în ore și %, în anul 2024 aferent unităților de pompare din cadrul SPM.

Tabel 4.9. Valorile duratelor de funcționare și a duratelor de oprire pentru lunile anului 2024, la unitățile de pompare din cadrul Stației de pompe Măgurele

Luna	T _{fi}		T _{oi} [h]		Total pe lună
	[h]	[%]	[h]	[%]	[h]
Ianuarie	270	36.3	474	63.7	744
Februarie	233	33.5	463	66.5	696
Martie	147	19.8	597	80.2	744
Aprilie	133	18.5	587	81.5	720
Mai	143	19.2	601	80.8	744
Iunie	153	21.3	567	78.7	720
Iulie	181	24.3	563	75.7	744
August	189	25.4	555	74.6	744
Septembrie	160	22.2	560	77.8	720
Octombrie	275	37.0	469	63.0	744
Noiembrie	271	37.6	449	62.4	720
Decembrie	273	36.7	471	63.3	744
TOTAL	2428		6356		8784

Tabelul 4.10 prezintă analiza statistică detaliată a comportamentului operațional al unităților de pompare, prin calcularea unor indicatori descriptivi specifici (media lunară, abaterea standard, etc.) pentru orele de funcționare și de oprire.

Tabel 4.10. Indicatori statistici ai timpului de funcționare și de oprire al unităților de pompare în anul 2024

Prelucrări statistice	Ore funcționare	Ore oprire
Media lunară	202,33	529,66
Eroarea standard	16,68	17,00
Abaterea standard	57,80	58,89
Valoarea minimă lunară [h]	133	449
Valoarea maximă lunară	275	601
Total	2428	6356

Constatări:

Unitățile de pompare înregistrează cele mai lungi durate de funcționare în octombrie, noiembrie și decembrie, semnalând cerințe sezoniere ridicate, în timp ce martie și aprilie prezintă timpi de funcționare reduși. Statistic, unitățile operează în medie 202,33 ore lunar și sunt oprite 529,66 ore, indicând un regim dominat de inactivitate. Eficiența energetică a sistemului depinde de utilizarea echipamentelor cu randament ridicat și de optimizarea modului de exploatare prin adaptarea la cerințe și strategii avansate de control.

4.3.4 Determinarea intensității energetice

Pentru stația de pompe Măgurele, s-a determinat intensitatea energetică pe baza datelor SCADA din 2024, ca raport între energia electrică activă consumată (Anexa III) și volumul de apă pompat (Anexa IV), conform Tabelului 3.2. Analiza s-a realizat pentru zile caracteristice din august, septembrie și octombrie, selecționate în funcție de variația consumului anual, diferențiind zile lucrătoare și nelucrătoare pentru a evalua impactul regimului de operare asupra consumului energetic.

(1) Sistemul de măsurare a debitului

Setul de date preluat de la sistemul SCADA cuprinde șiruri de date pentru debitul de apă pe conducta de refulare a unităților de pompare UP1/UP2 din perioada 25.08.2024, ora 15:42 până în 22.10, ora 20:11.2024. În Fig. 4.22 este reprezentat schema hidraulică a Stației de pompe Măgurele.

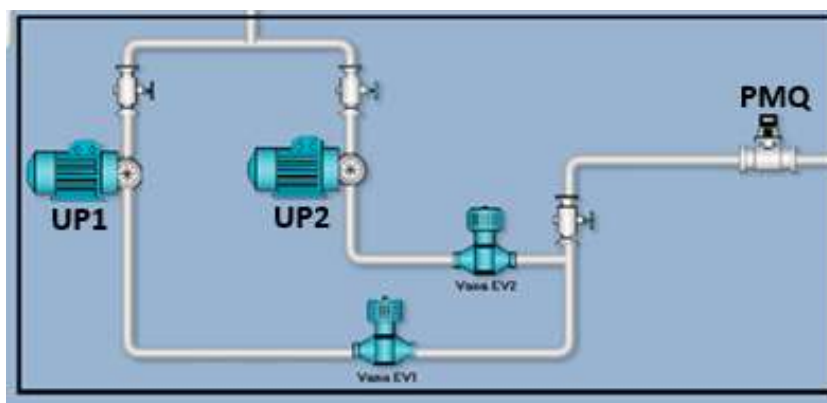


Fig. 4.22. Schemă hidraulică a Stației de pompe Măgurele

Unitățile UP1 și UP2 transportă apa din rezervoarele R1 și R2 către R3. Parametrii hidraulici au fost urmăriți în punctul de măsură PMQ, utilizând un debitmetru electromagnetic cu citire la distanță. Înregistrările au fost realizate cu o frecvență de eșantionare de 1 minut, totalizând $N = 83.778$ valori, prezentate în Anexa 6. Prelucrarea datelor s-a efectuat în Microsoft Excel.

(2) Determinarea curbei zilnice caracteristice pentru perioada analizată și prelucrări statistice

Curba zilnică evidențiază variația globală a debitului în timp și permite observarea tendințelor de creștere sau fluctuație a volumului de apă procesat zilnic, oferind o imagine sintetică și relevantă asupra regimului de funcționare al sistemului pe termen scurt și mediu.

În Fig. 4.23 sunt prezentate curbele de variație a consumului de energie electrică activă și debit corespunzătoare perioadei analizate, cuprinsă între 26.08.2024 și 22.10.2024.

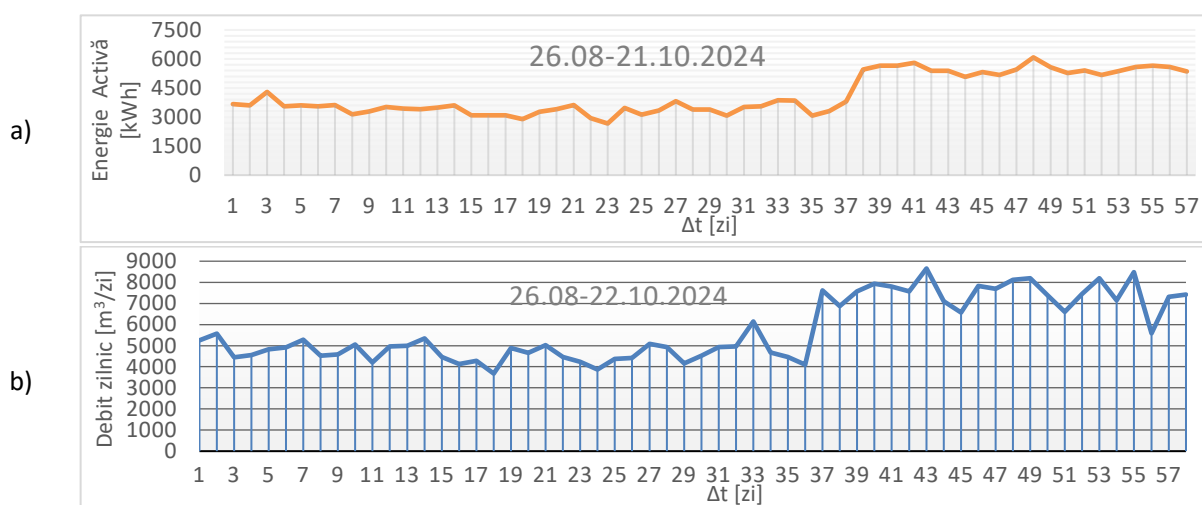


Fig. 4.23. Curbă de consum în perioada 26.08-22.10.2024: a) energie electrică, b) debit de apă

Această reprezentare grafică evidențiază variația de ansamblu a debitului în timp și constituie baza pentru efectuarea prelucrărilor statistice aferente, utilizate pentru analiza comportamentului sistemului hidraulic în perioada respectivă.

În Tabelul 4.11 sunt prezentate valorile obținute pentru debit total zilnic în perioada 26.08-22.10.2024, pentru $N=59$.

Tabel 4.11 Valori debit zilnic în perioada 26.08-22.10.2024

Valoare măsurată	Valoare medie	Valoare minimă	Valoare Maximă	S (Abaterea medie pătratică)
Energie activă zilnică[kWh]	4167,7	2669	6085	1040,02

Debit de apă zilnic [m ³ /zi]	138447,9	88239,3	207695	36045,2
--	----------	---------	--------	---------

Debitul zilnic al stației prezintă fluctuații semnificative, cu o medie de 138447,9 m³/zi și abateri mari, variind între 88239,3 m³/zi și 207695 m³/zi. Consumul zilnic de energie activă este corelat cu aceste variații, având o medie de 4167,7 kWh și oscilând între 2669 kWh și 6085 kWh, ceea ce indică un regim de operare cu sarcină variabilă.

(3) Obținerea timpului de funcționare și a timpului de oprire

Timpul de funcționare a fost determinat prin însumarea minutilor în care sistemul s-a aflat în stare operațională, iar timpul de staționare prin cumularea intervalelor de oprire, pe întreaga durată de monitorizare. Această abordare a permis exprimarea duratelor în minute și procente pentru intervale definite. Fig. 4.24 indică, pentru perioada 25.08.2024 – 22.10.2024, un timp total monitorizat de 1396,3 ore, dintre care 463,72 ore (33%) au fost de funcționare și 932,58 ore (67%) de oprire. Diagrama cu bare evidențiază o creștere a procentului de funcționare în octombrie (43%) comparativ cu august (30%) și septembrie (28%).

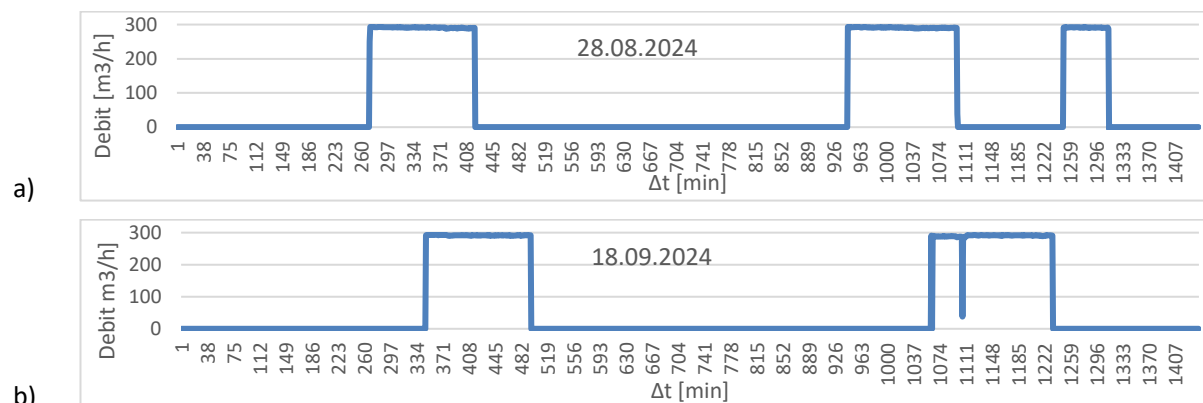
Constatări: Pe parcursul intervalului august–octombrie 2024, s-au înregistrat 83.778 minute de monitorizare (1.396,3 ore), dintre care 27.823 minute (463,7 ore) corespund funcționării sistemului (33,2%), iar 55.955 minute (932,6 ore) opririi (66,8%). În august, timpul de funcționare a fost de 2.700 minute (29,6%), iar în septembrie de 11.880 minute (27,5%), indicând o disponibilitate operațională scăzută. În octombrie s-a observat o creștere semnificativă a funcționării, cu 13.620 minute (43,2%), ceea ce reflectă o îmbunătățire cu circa 15% față de media lunilor anterioare. Distribuția temporală indică un regim de utilizare oscilant, cu valori minime ale disponibilității în august și septembrie, urmate de o tendință de recuperare în octombrie. Aceste variații sugerează modificări ale cerințelor operaționale sau posibile intervenții asupra echipamentului, ce necesită corelare cu date tehnice suplimentare.

(4) Determinarea intensității energetice pentru zilei caracteristice de consum

Stabilirea zilelor caracteristice

Analiza setului de date pentru apă și energie activă, prezentat în Anexa IV a evidențiat o ciclicitate zilnică a curbelor de debit, precum și o variabilitate sezonieră semnificativă. În urma acestei evaluări, s-au selectat două zile caracteristice pentru interpretarea comportamentului sistemului în funcție de regimul de lucru: ziua de miercuri, reprezentativă pentru perioada lucrătoare, cu valorile de debit aferente datelor de 28.08.2024, 18.09.2024 și 16.10.2024, respectiv ziua de sâmbătă, caracteristică pentru zilele nelucrătoare, cu valori preluate din datele de 31.08.2024, 21.09.2024 și 19.10.2024.

În Fig. 4.25 este reprezentată dinamica regimului de funcționare pentru zilele lucrătoare.



c)

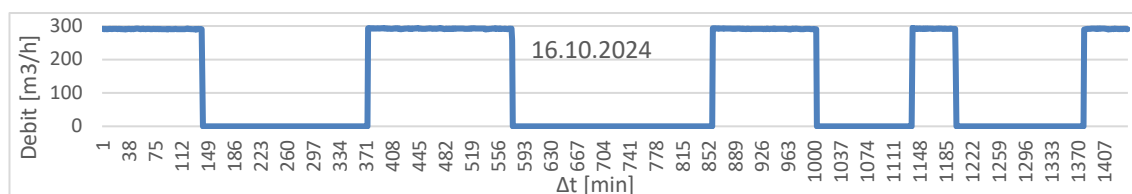


Fig. 4.25. Curbele de debit pentru zilele caracteristici de miercurea: a) ZL1 (28.08.2024); b) ZL2 (18.09.2024); c) ZL3 (16.10.2024)

În tabelul 4.12 sunt centralizate datele pentru debite și timpi de funcționare/oprire pentru zilele caracteristice de lucru.

Tabel 4.12. Parametrii determinați pentru zile lucrătoare caracteristice în perioada analizată

Nr. crt.	Zi caract.	Interval funcționare	Funcționare [min]	Funcționare [ore]	Funcționare [%]	Qmed [m3/h]	Qmin [m3/h]	Qmax [m3/h]	V med [m3]
1	ZL1	I	149	2,48	10,35	290,97	250,00	293,71	722,576
2		II	155	2,58	10,76	291,03	288,63	293,30	751,838
3		III	65	1,08	4,51	291,40	287,62	292,76	315,687
Total ZL1			369,00	6,15	25,63	1790,10			

Nr. crt.	Zi	Interval funcționare	Funcționare [min]	Funcționare [ore]	Funcționare [%]	Qmed [m3/h]	Qmin [m3/h]	Qmax [m3/h]	V med [m3]
1	ZL2	I	149	2,48	10,35	291,82	290,24	293,79	724,681
2		II	171	2,85	11,88	289,07	283,00	292,73	823,835
Total ZL2			320,00	5,33	22,22	1548,52			

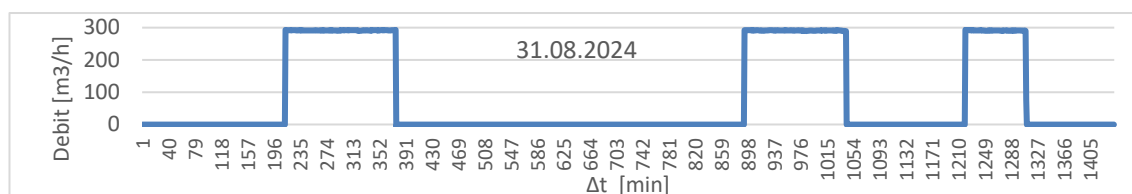
Nr. crt.	Zi	Interval funcționare	Funcționare [min]	Funcționare [ore]	Funcționare [%]	Qmed [m3/h]	Qmin [m3/h]	Qmax [m3/h]	V med [m3]
1	ZL3	I	141	2,35	9,79	289,93	289,85	292,35	681,343
2		II	203	3,38	14,10	292,02	257,62	293,47	988,001
3		III	146	2,43	10,14	291,64	290,05	293,29	709,657
4		IV	62	1,03	4,31	292,00	291,04	295,11	301,735
5		V	62	1,03	4,31	291,51	289,56	292,83	301,227
Total ZL3			614,00	10,23	42,64	2981,96			

Constatări:

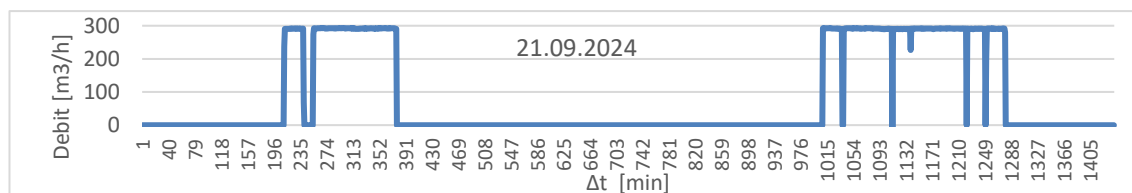
În luna octombrie (ZL3), durata de funcționare a crescut semnificativ la 10,23 ore (42,64% din zi), comparativ cu 6,15 ore în august (ZL1) și 5,33 ore în septembrie (ZL2), sugerând o cerere crescută de apă sau intensificarea activităților dependente de alimentare. Volumul total pompat în ZL3 (2981,96 m³) este aproape dublu față de ZL1 și de două ori mai mare decât în ZL2, indicând un regim operațional susținut. Debitul mediu (Qmed) se menține constant, între 290 și 292 m³/h, ceea ce reflectă stabilitatea și eficiența sistemului. Variabilitatea debitului este redusă, însă în ZL3, intervalul II a înregistrat un minim de 257,62 m³/h, sugerând o posibilă fluctuație temporară sau o adaptare funcțională. Procentul de funcționare zilnică este proporțional cu volumul pompat, evidențiind în ZL3 capacitatea sistemului de a răspunde flexibil la cerințele hidraulice. ZL2 se remarcă prin cel mai redus timp de funcționare și cel mai mic volum procesat, posibil asociat unei cereri scăzute sau unei eficiențe îmbunătățite.

Fig. 4.26 ilustrează trei zile caracteristice de sâmbătă: 31.08, 21.09 și 19.10.2024.

a)



b)



c)

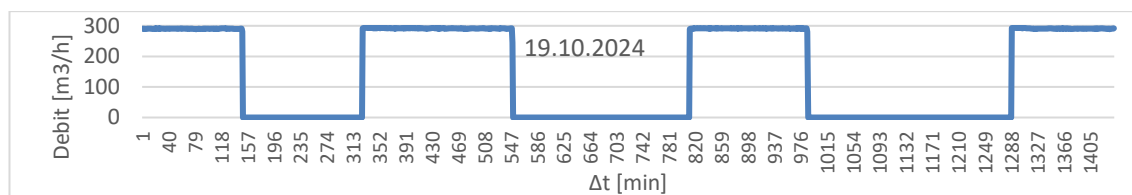


Fig. 4.26. Curbele de debit pentru zilele caracteristici de sâmbăta: a) ZN 1 (31.08.2024); b) ZN 2 (21.09.2024) și c) ZN 3 (19.10.2024)

În Tabelul 4.13 sunt centralizate datele pentru timpul de funcționare și nefuncționare pentru zilele caracteristice de lucru.

Tabel 4.13. Parametrii determinați pentru zile nelucrătoare caracteristice în perioada analizată

Nr. crt.	Zi	Interval funcționare	Funcționare [min]	Funcționare [ore]	Funcționare [%]	Qmed [m3/h]	Qmin [m3/h]	Qmax [m3/h]	V med [m3]
1	ZN1	I	165	2,75	11,46	291,7	289,8	293,1	802,126
2		II	151	2,52	10,49	291,2	289,2	295,6	732,921
3		III	91	1,52	6,32	291,3	289,9	293,6	441,831

Total ZN1 **407,00** **6,78** **28,26** **1976,88**

Nr. crt.	Zi	Interval funcționare	Funcționare [min]	Funcționare [ore]	Funcționare [%]	Qmed [m3/h]	Qmin [m3/h]	Qmax [m3/h]	V med [m3]
1	ZN2	I	154	2,57	10,69	291,2	289,2	295,6	747,483
2		II	267	4,45	18,54	290,9	226,8	293	1294,54

Total ZN2 **421,00** **7,02** **29,24** **2042,02**

Nr. crt.	Zi	Interval funcționare	Funcționare [min]	Funcționare [ore]	Funcționare [%]	Qmed [m3/h]	Qmin [m3/h]	Qmax [m3/h]	V med [m3]
1	ZN3	I	149	2,48	10,35	290,4	281,7	292	721,252
2		II	223	3,72	15,49	291,6	244,7	294,1	1083,77
3		III	175	2,92	12,15	291,4	279,9	293,6	850,051
4		IV	152	2,53	10,56	291,2	288,7	293,8	737,636

Total ZN3 **552,00** **9,20** **38,33** **2680,74**

Constatări:

Durata de funcționare a sistemului de alimentare cu apă a crescut semnificativ de la 6,78 ore în zona ZN1 (28,26%) la 9,20 ore în zona ZN3 (38,33%), ceea ce evidențiază o cerere mai mare în luna octombrie, inclusiv în zilele nelucrătoare. Debitul mediu orar (Q_{med}), situat între 290,44 și 291,68 m³/h, indică un regim de funcționare stabil, iar valorile apropiate ale debitului maxim (Q_{max}) — între 291,97 și 295,55 m³/h — confirmă capacitatea sistemului de a gestiona eficient variațiile de sarcină. În zona ZN2, debitul minim (Q_{min}) de 226,84 m³/h poate sugera fie o reducere punctuală a cererii, fie o optimizare temporară a funcționării. Volumul total pompat în ZN3 (2680,74 m³) subliniază o activitate operațională intensă, inclusiv în regim de weekend. Stabilitatea parametrilor de debit și similitudinea consumului între zilele lucrătoare și nelucrătoare justifică un regim operațional constant. Indicatorul de intensitate energetică, exprimat în kWh/m³, reprezintă un instrument esențial în evaluarea eficienței energetice a sistemului, facilitând comparații între zone și perioade și susținând strategii sustenabile de gestionare a resurselor. Pentru acestea s-a determinat intensitatea energetică conform graficului din Fig. 4.27.

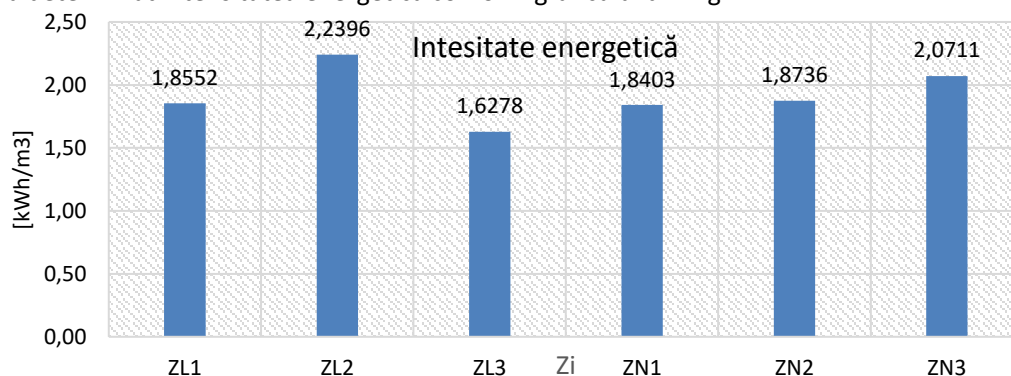


Fig. 4.27. Intensitate energetică la Stația de pompe Măgurele pentru zile caracteristice lucrătoare (ZL1-3) și nelucrătoare (ZN1-3)

Graficul analizat prezintă valorile intensității energetice înregistrate în perioada august–octombrie 2024, evidențiind variații semnificative între zilele analizate. Cea mai mare valoare a fost observată în data de 18.09.2024, o zi lucrătoare, cu un consum specific de 2,2396 kWh/m³, în timp ce valoarea minimă a fost de 1,6278 kWh/m³ în 16.10.2024, tot într-o zi lucrătoare. Valorile corespunzătoare zilelor nelucrătoare s-au situat între 1,8403 și 2,0711 kWh/m³, indicând o eficiență energetică variabilă și în regim de funcționare redus. Calculul valorii medii pentru întregul interval conduce la un consum specific de 1,9179 kWh/m³, ceea ce reflectă o performanță energetică moderată. Aceste date confirmă importanța monitorizării continue a acestui indicator, subliniată și în Capitolul 3 al tezei, pentru a identifica deviațiile de la regimul optim și a fundamenta măsuri de optimizare operațională.

Valorile intensității energetice obținute în perioada analizată, pot fi considerate relativ ridicate în comparație cu reperele tehnice prezentate în literatura de specialitate. Conform International Water Association, pentru sistemele de alimentare cu apă bine optimizate, intensitatea energetică variază uzual între 0,4 și 1,2 kWh/m³, aceste valori fiind considerate standard pentru rețele moderne cu eficiență operațională ridicată [67]. În cadrul studiului comparativ realizat în proiectul european AquaRatio, majoritatea operatorilor din Europa au înregistrat valori între 0,6 și 1,6 kWh/m³, în funcție de configurația rețelei, nivelul de automatizare și pierderile de apă [122].

Valori care depășesc pragul de 2,0 kWh/m³ sunt caracteristice sistemelor care operează în condiții topografice nefavorabile sau utilizează echipamente de pompare cu randamente scăzute, precum și în situațiile în care presiunile de lucru sunt excesive [75]. Astfel, valorile obținute în cazul analizat reflectă un consum energetic specific superior mediei europene, sugerând existența unui potențial semnificativ de optimizare energetică. Intervențiile recomandate includ modernizarea echipamentelor de pompare, implementarea tehnologiilor cu randament crescut și reducerea pierderilor prin strategii avansate de control al presiunii, în conformitate cu bunele practici promovate de IWA și directivele Uniunii Europene privind eficiența energetică [123].

4.4. Bilanțul energetic orar pentru unitatea de pompare UP1

Bazat pe constatarea că bilanțul energetic reprezintă un instrument esențial în evaluarea performanței energetice și în fundamentarea deciziilor privind eficientizarea sistemelor de alimentare cu energie electrică la consumatori, acest studiu de caz are ca obiectiv întocmirea bilanțului energetic orar la unitate de pompare UP1 din cadrul stației de pompe Măgurele.

Conform metodologiei [PE 902/86], bilanțul permite evaluarea detaliată a fluxurilor energetice dintr-un contur tehnic delimitat. În cazul unității de pompare UP1, conturul de bilanț cuprinde bara de 20 kV, transformatorul electric Tr1 de 20/6 kV, transformatorul electric Tr2 de 6/0,4 kV, bara de 0,4 kV și unitate de pompare UP1.

Bilanțul energetic este realizat în baza ecuației:

$$E_i = E_u + \Delta E_P + \Delta E_{cmp} + \Delta E_M + \Delta E_{L0,4} + \Delta E_{Tr2} + \Delta E_{L0,6} + \Delta E_{Tr1} \quad (4.23)$$

Unde: E_i - energia electrică intrată în contur, E_u - energia utilă cedată de pompă fluidului transportat și ΔE - pierderi pe elementele sistemului de alimentare a unității de pompare UP1.

Întocmirea bilanțului orar se bazează pe setul de date măsurate cu analizorul Qualistar, descrise în Anexa 4, în ziua de 21.01.2020, în intervalul 10:28:00-10:32:43. Aceste date au fost prelucrate și analizate în secțiunea 4.3.1. Consumul orar de putere activă pentru unitatea de pompare UP 1 s-a considerat ca medie a valorilor măsurate și analizate (Tabel 4.19), în ipoteza că unitatea de pompare funcționează în aceleași condiții timp de o oră.

Tabel 4.19. Consum orar de putere activă pentru unitatea de pompare UP1

Consum de putere activă	P_{med} [kW]	P_{min} [kW]	P_{max} [kW]
	490,57	489,20	492,05

Debit orar de apă pompat de unitatea de pompare UP1

Debit orar	Q_{med} [m ³ /h]	Q_{min} [m ³ /h]	Q_{max} [m ³ /h]
	291,5	289,7	293

Intensitatea curentului electric de alimentare a unității de pompare UP1

Intensitatea curentului electric	I_{med} [A]	I_{min} [A]	I_{max} [A]
	729,63	715,30	744,13

Bilanțul energetic este realizat în sens ascendent (de jos în sus), pornind de la unitatea de pompare și urmărind fluxurile de energie către bara de alimentare de 20 kV.

A. Calcul pierderi la nivelul unității de pompare UP1

Puterea necesară pentru antrenarea motorului $P_{M1} = 490,57$ kW (Tabel 4.19); pentru randamentul motorului $\eta_M = 0,91$ rezultă puterea utilă a motorului este $P_{M2} = 446,42$ kW, iar pierderile în motor sunt $\Delta P_M = 44,15$ kW.

Puterea la intrarea în cuplajul motor-pompă este $P_{cpm1} = 446,42$ kW; pentru randamentul cuplajului $\eta_{cpm} = 0,99$ rezultă puterea utilă a cuplajului $P_{cpm2} = 441,95$ kW, iar pierderile în cuplaj sunt $\Delta P_{cpm} = 4,46$ kW.

Putere necesară antrenării pompei $P_{p1} = 441,95$ kW; pentru un randament al pompei de $\eta_p = 0,73$ rezultă puterea utilă transmisă fluidului $P_u = 322,62$ kW, iar pierderile în pompă sunt $\Delta P_p = 119,32$ kW.

Puterea utilă a pompei este puterea hidraulică $P_u = P_{p2} = \rho \cdot q \cdot H \cdot Q$, care se determină cunoscând parametrii de funcționare a sistemului hidraulic. Pentru debitul orar de $Q=291,5$ m³/h și înălțime de pompare $H=410$ m rezultă putere utilă $P_u = 325,34$ kW.

Valorile diferite rezultate între cele două abordări de determinare a puterii utile aferente pompei UP1, de $\Delta P_u = 2,72$ kW, rezultă datorită modalității de determinare a parametrilor hidraulici care variază în intervalul de timp considerat.

Această abordare a bilanțului unității de pompare UP1 permite evidențierea tuturor pierderilor pe lanțul de alimentare al sistemului Pompă-Motor-Transformatoare.

B. Calcul pierderi pe linia de alimentare a unității de pompare UP1

În cazul alimentării unității de pompare UP1 de la Stația de pompe Măgurele, conform Fig. 4.42 este necesară determinarea pierderilor în transformatoare și liniile de alimentare aferente.

Parametrii rețelei de alimentare sunt prezentate în Tabelul 4.21.

Tabel 4.21. Date tehnice pentru transformatoare și cabluri electrice aferente alimentării unității de pompare UP1

Caracteristici tehnice Trafo.	Tensiune Primară	Tensiune Secundară	Putere Nominală	Pierderi în gol	Pierderi în scurtcircuit	U_0	I_k	Tip Cablu	Rezistență specifică	Secțiune Cabluri	Lungime Cabluri
-	kV	kV	kVA	kW	kW	%	%	-	Ω/km	mm^2	m
Tr1	20	6	1600	4,35	20,2	6	1,7	ACYABY	0,153	3x240+120	10
Tr2	6	0,4	2000	2,9	16,5	6,5	0,54	CYABY	0,0754	2x3x240+2x120	25

Pierderile de energie în transformator se determină cu relația:

$$\Delta E_T = (\Delta P_o + \beta^2 \cdot \Delta P_{sc}) \cdot \tau \quad (4.24)$$

Unde: ΔP_o – pierderile în transformator, la funcționarea în gol, ΔP_{sc} – pierderile în transformator, la funcționarea în scurtcircuit, τ - timp, β – coeficientul de încărcare a transformatorului calculat cu relația:

$$\beta = k_f \cdot \frac{I_{med}}{I_n} \approx \frac{S}{S_n} \quad (4.25)$$

Unde: I_{med} - valoarea medie a intensității curentului prin transformator, în intervalul de timp asociat duratei de referință a bilanțului, I_n - curentul nominal al transformatorului și k_f - coeficientul de formă al variației curentului

$$k_{f-I} = \frac{I_{mp}}{I_{med}} = \sqrt{N} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N I_i^2}}{\sum_{i=1}^N I_i} \quad (4.26)$$

unde: I_{mp} – valoarea medie pătratică a curentului măsurat la capătul alimentat al liniei;

I_{med} – valoarea medie a curentului măsurat la capătul alimentat al liniei; N – numărul de intervale egale la care se face citirea curentului;

Pierderile electrice în cablurile de alimentare se determină cu relația:

$$\Delta E_L = 3 \cdot k_{f_I}^2 \cdot I_{med}^2 \cdot R_L \cdot \tau \quad (4.27)$$

unde: τ - reprezintă durata de referință asociată bilanțului (în cazul de față este de o oră), R_L - rezistența specifică a linie, calculată cu relația:

$$R_L = r \cdot L \quad (4.28)$$

Unde: r - rezistența specifică [Ω/km], L - lungimea [km];

Determinarea pierderilor orare pe fiecare componentă din conturul de bilanț este prezentată în continuare:

Calculul pierderilor de putere în linia de 0,4 kV

Luând în considerare valorile: factor de formă $k_f = 1$, intensitatea curentului mediu conform Tabel 4.21, $\tau = 1$ h și rezistența liniei $R_L = 0,001885 \Omega$, rezultă: $\Delta E_{L0,4} = 3,01$ kWh.

Calculul pierderilor de putere în transformatorul TR2

Luând în considerare valorile curentului în secundarul transformatorului $I_{TR2} = 729,6$ A (valoare măsurată) și factorul de încărcare $\beta = 0,25$, rezultă pierderile de putere în transformatorul TR2 $\Delta E_{TR2} = 3,95$ kWh

Calculul pierderilor de putere în linia de 6 kV

Luând în considerare valorile: $k_f = 1$, valoare curentului în înfășurarea primară a transformatorului TR2 $I_{1tr2} = \frac{I_{2tr2} \cdot U_{2tr2}}{U_{1tr2}} = 48,64$ A, $\tau = 1$ h și $R_L = 0,00153 \Omega$ rezultă: $\Delta E_{L0,4} = 0,01$ kWh.

Calculul pierderilor de putere în transformatorul TR1

Luând în considerare valorile curentului în secundarul transformatorului $I_{TR2} = 48,64$ A (valoare măsurată) și factorul de încărcare $\beta = 0,31$, rezultă pierderile de putere în transformatorul TR1 $\Delta E_{tr1} = 6,36$ kWh

C. Întocmirea bilanțului energetic orar pentru unitate de pompare UP1

În Tabelul 4.23 este prezentat bilanțului energetic orar pentru unitatea de pompare UP1 din cadrul Stației de pompe Măgurele, realizat pe baza măsurărilor din data de 21.01.2020.

Tabel 4.23. Bilanțului energetic orar pentru unitatea de pompare UP1

Simbol	Componentă bilanț	Energie și pierderi [kWh]	Energie [%]	Pierderi [%]
Ei	Energie intrată pe 20 kV în transformatorul Tr1	503,90	100	-
ΔE_{Tr1}	Pierdere transformator Tr 1 (U=6/20 kV, S=1600 kVA)	6,36	-	1,2622
ΔE_{l6}	Pierderi linie 6 kV (ACYABY 3x240 + 120 mm ² , l=10m)	0,01	-	0,0020
Ei_{Tr2}	Energie intrată pe 6 kV în transformatorul Tr2	497,53	98,7359	-
ΔE_{Tr2}	Pierderi transformator Tr2 (U=0,4/6 kV, S=2000 kVA)	3,95	-	0,7839
$\Delta E_{l0,4}$	Pierderi linie 0,4 kV (2 x CYABY 3x240 + 120 mm ²)	3,01	-	0,5973
Ei_M	Energie intrată în motorul de acționare	490,57	97,3546	-
ΔE_M	Pierderi în motor	44,15	-	8,7617
Ei_{cmp}	Energie intrată în cuplajul motor-pompă	446,42	88,5930	-
ΔE_{cmp}	Pierderi în cuplajul motor-pompă	4,46	-	0,8851
Ei_p	Energie intrată la axul pompei	441,96	87,7079	-
ΔE_p	Pierderi în pompă	119,32	-	23,6793
Eu	Energie utilă	322,64	64,0286	-

În Fig. 4.29 este prezentat graficul cu bilanțului energetic orar pentru unitatea de pompare UP1

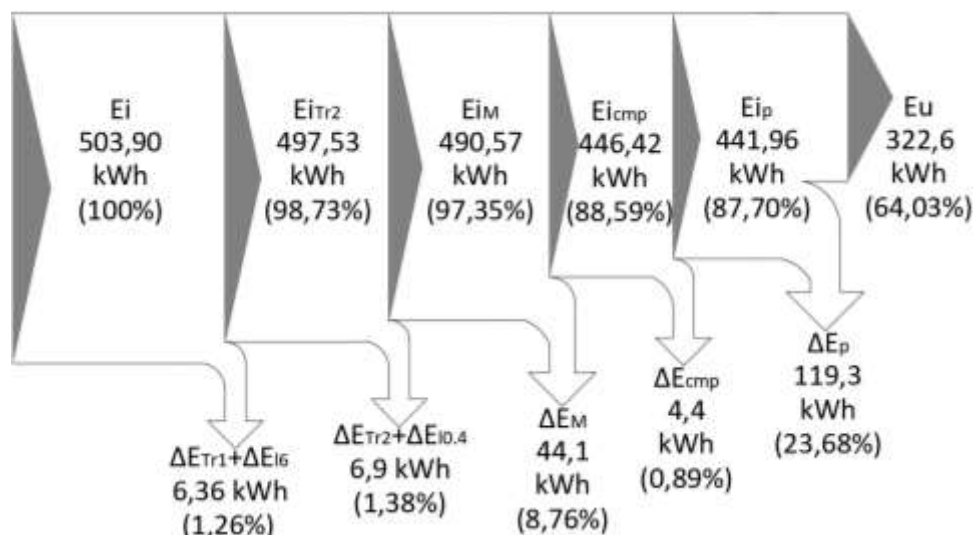


Fig. 4.29. Graficul bilanțului energetic orar aferent unității de pompă UP1

D. Constată și discuții:

Analiza rezultatelor indică faptul că energia utilă reprezintă 64,03% din consumul total al unității de pompă UP1, în timp ce pierderile sunt semnificative: 23,68% în pompă, 8,76% în motorul electric și 2,64% în rețeaua de alimentare (linii și transformatoare). Pentru reducerea acestor pierderi în Stația de Pompe Măgurele se recomandă optimizarea regimului de funcționare al pompei pentru apropierea de randamentul maxim, revizuirea mentenanței pentru reducerea pierderilor mecanice, evaluarea înlocuirii motorului cu unul de înaltă eficiență și optimizarea schemei de alimentare electrică a instalației.

4.5. Propuneri privind utilizarea simulării numerice pentru evaluarea eficienței electroenergetice la stații de pompă a apei

4.5.1. Strategii de analiză a pierderilor utilizând softul NEPLAN

Instrumentele de simulare numerică sunt esențiale pentru analiza, optimizarea și proiectarea rețelelor electroenergetice, oferind suport tehnico-economic pentru o exploatare sigură și eficientă a sistemelor de transport, distribuție și alimentare industrială. În cadrul acestui studiu a fost utilizată platforma NEPLAN, care integrează module avansate pentru simularea funcționării și protecției sistemelor complexe de alimentare. NEPLAN permite analiza fluxului de putere în regimuri trifazate echilibrate și dezechilibrate, cu posibilitatea optimizării topologiei rețelei și a distribuției energiei pentru reducerea pierderilor tehnice. Studiul aplicat la stația de pompe Măgurele urmărește optimizarea alimentării electrice a unităților UP1 și UP2, în vederea minimizării pierderilor energetice.

Pe linia I, după transformatorul Tr1 de 20/6 kV și $S_n = 1600$ kVA, fabricat de Electroputere Craiova, s-a introdus transformatorul Tr2, de 6/0,4 kV în vederea alimentării celor două unități de pompă UP1 și UP2 la tensiunea de 0,4 kV. Pe linia II, transformatorul Tr3 de 20/0,4 kV alimentează cu energia electrică serviciilor proprii: încălzire centrală (24 kW), iluminat (4 kW), sisteme de calcul (2 kW). Datele tehnice pentru transformatoarele Tr1 și Tr2 sunt prezentate în Tabelul 4.21. În Tabelul 4.22 sunt prezentate datele tehnice caracteristice pentru transformatorul Tr3 și cablurile de alimentare pentru linia II.

Tabel 4.22. Date tehnice pentru transformatorul Tr3 și cablurile electrice aferente liniei II

Caracteristici tehnice Trafo.	Tensiune Primară	Tensiune Secundară	Putere Nominală	Pierderi în gol	Pierderi în scurtcircuit	U_0	I_k	Tip Cablu	Secțiune cabluri	Lungime Cabluri
-	kV	kV	kVA	kW	kW	%	%	-	mm ²	m
Tr3	20	0,4	1600	4,35	20,2	6,0	1,7	CYABY	3×240+120	20

Variantele propuse spre analiză privind alimentarea cu energie electrică a Stației de pompare Măgurele sunt următoarele:

- Varianta 1: Situația actuală: unitățile de pompare UP1 și UP2 sunt alimentate de linia I iar Serviciile interne de linia II (Fig. 4.31);
- Varianta 2: Unitățile de pompare UP1 și UP2 și Serviciile Interne sunt alimentate integral de linia I, prin introducerea unei cuple longitudinale pe 0,4 kV;
- Varianta 3: Unitățile de pompare UP1 și UP2 și Serviciile Interne sunt alimentate integral de linia II, prin utilizarea cuplei longitudinale pe 0,4 kV;
- Varianta 4: Unitățile de pompare UP1 și UP2 și Serviciile Interne sunt alimentate integral de linia II (utilizarea cuplei longitudinale pe 0,4 kV) și suplimentar, integrarea pe bara de 0,4 kV a unei surse regenerabile de energie, contribuind la alimentarea suplimentară a consumatorilor electrici.

4.5.2. Stabilirea circulației de putere și a pierderilor cu softul NEPLAN

Varianta 1

În Fig. 4.31 este reprezentată configurația în care alimentarea cu energie electrică a unității de pompare UP1 se realizează de la bara de 20 kV prin transformatorul Tr 1 și transformatorul. Cupla longitudinală de la nivelul barelor de 0,4 kV este deschisă, asigurând separarea electrică între sursele de alimentare. Serviciile Interne sunt alimentate independent, pe linia II, prin intermediul transformatorului Tr3, de la bara de 20 kV.

Simularea este realizată considerând regimul de funcționare în care unitatea de pompare UP1 are motorul asincron alimentat cu o putere de 500 kW. În același scenariu, Serviciile Interne au fost estimate cu un consum constant de 30 kW, reflectând necesarul energetic aferent funcționării auxiliare a stației (iluminat, sisteme de comandă, automatizări, etc.).

În Fig. 4.32 sunt ilustrate rezultatele obținute cu softul NEPLAN pentru circulația de putere și pierderile

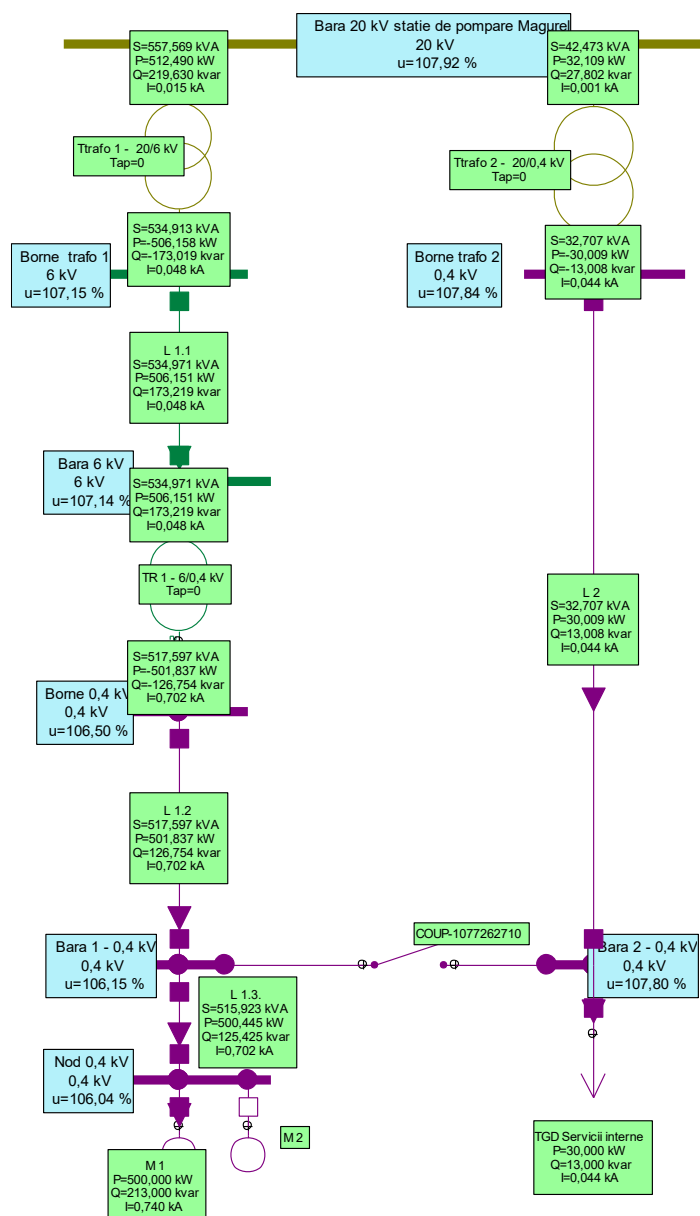


Fig. 4.32. Varianta 1 – Rezultate în NEPLAN pentru circulația de putere și pierderi

Varianta 2

În Fig. 4.34 sunt ilustrate rezultatele obținute cu softul NEPLAN pentru circulația de putere și pierderile în fiecare element component al lanțului de alimentare a unității de pompare UP1 și pentru Serviciile interne.

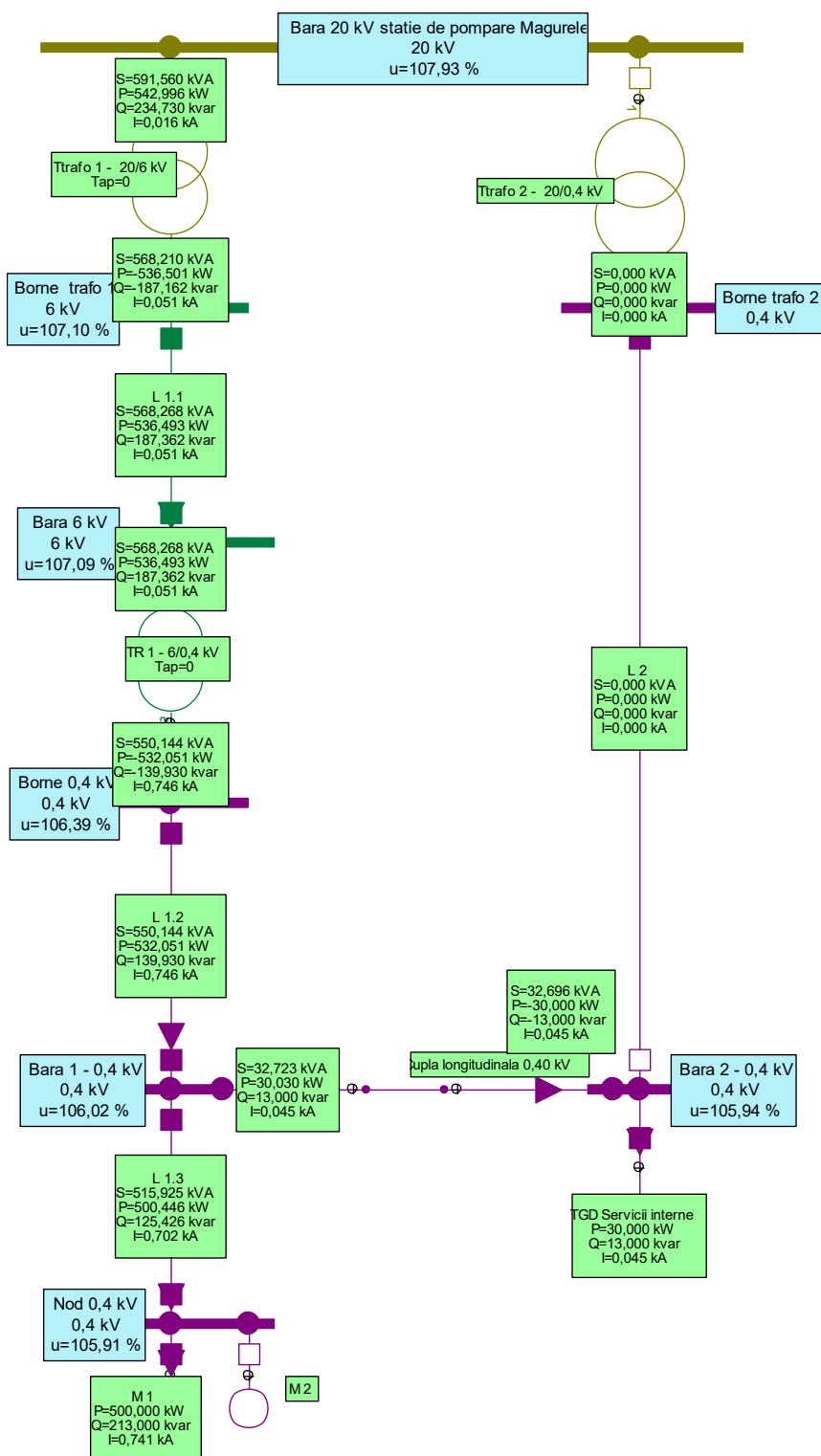


Fig. 4.34. Varianta 2 – Rezultate în NEPLAN pentru circulația de putere și pierderi

Varianta 3

În Fig. 4.36 sunt ilustrate rezultatele obținute cu softul NEPLAN pentru circulația de putere și pierderile în fiecare element component al lanțului de alimentare a unității de pompare UP1 și pentru Serviciile interne.

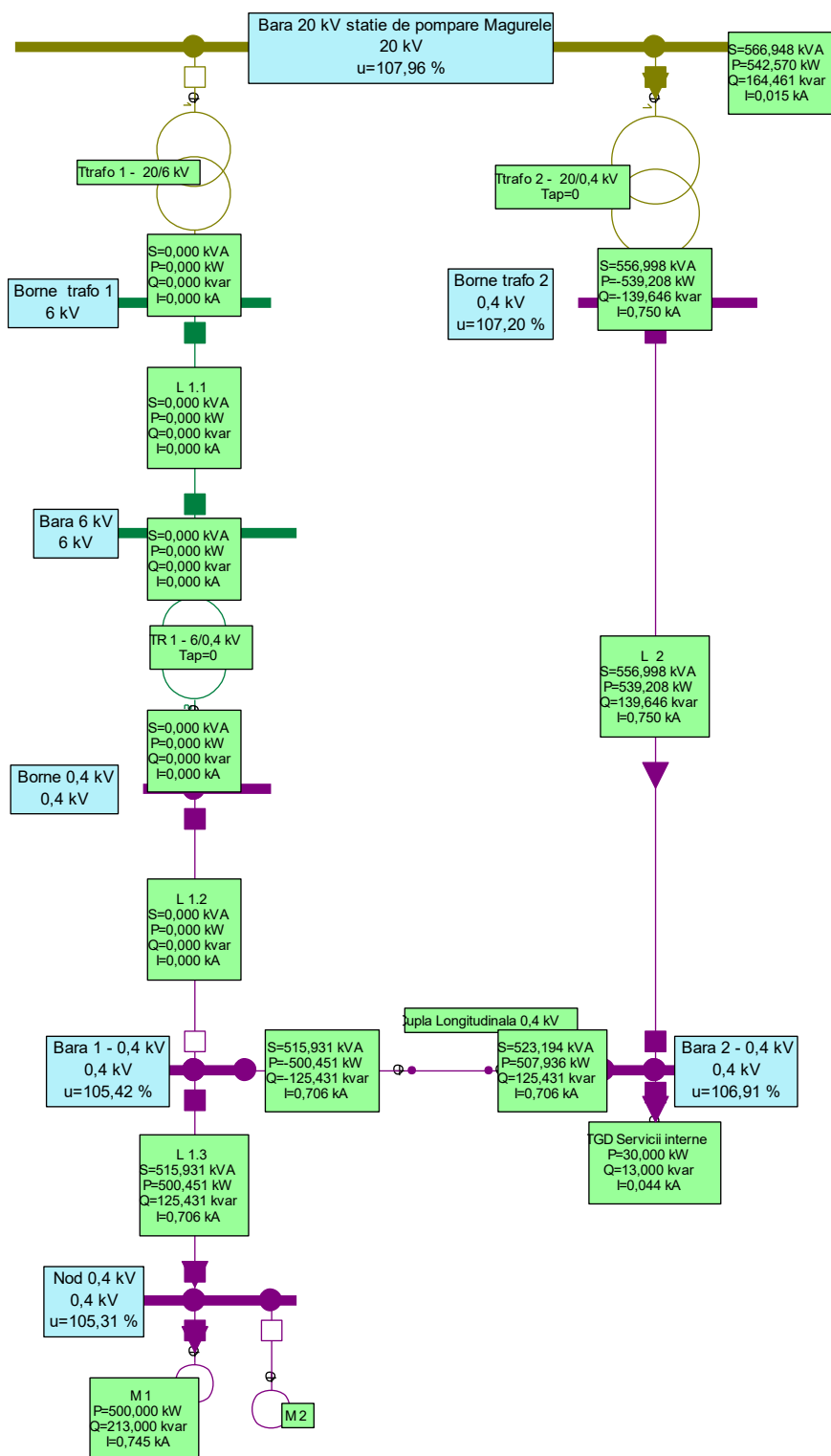


Fig. 4.36. Varianta 3 – Rezultate în NEPLAN pentru circulația de putere și pierderi

Varianta 4

În Fig. 4.37 este ilustrată configurația în care alimentarea cu energie electrică a unității de pompare și a Serviciilor Interne se realizează exclusiv prin linia II, cu cupla longitudinală de la barele de 0,4 kV închisă, asigurând conexiunea integrală a instalației. Întreruptorul transformatorului Tr 1 este deschis, ceea ce exclude linia I din schema de alimentare. În această configurație a fost integrată, pe bara de 0,4 kV, o sursă

regenerabilă de tip fotovoltaic (ACGENC-1077261555), modelată în platforma NEPLAN. Această sursă contribuie la alimentarea sarcinilor locale și asigură continuitatea energetică în cazul unei întreruperi a sursei principale, sporind sustenabilitatea și fiabilitatea sistemului. Puterea activă generată a fost definită conform specificațiilor tehnice ale sursei, valoarea exactă fiind determinată prin simulare.

În Fig. 4.38 sunt ilustrate rezultatele obținute cu softul NEPLAN pentru circulația de putere și pierderile în fiecare element component al lanțului de alimentare a unității de pompare UP1 și pentru Serviciile interne.

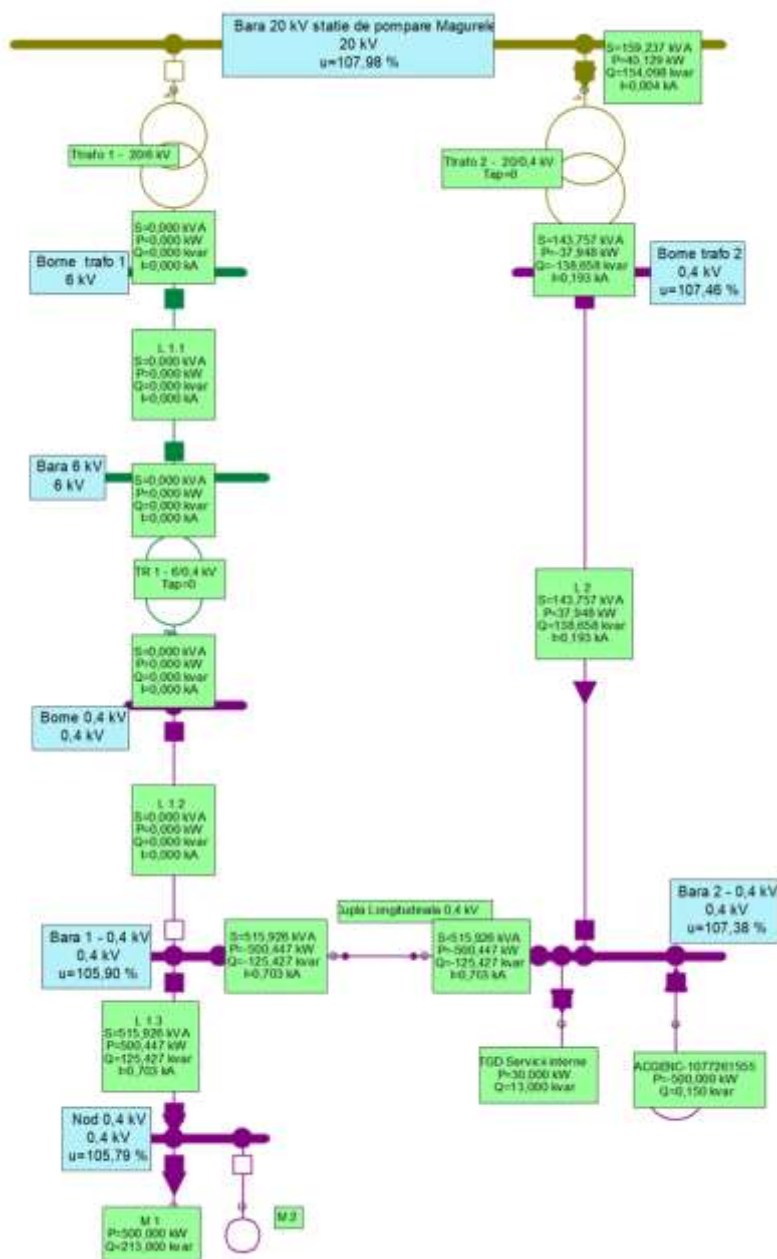


Fig. 4.38. Varianta 4 – Rezultate în NEPLAN pentru circulația de putere și pierderi – De mutat la cuplă pierderile

4.5.3 Analiză și propuneri

În figurile 4.32, 4.34, 4.36 și 4.38 sunt ilustrate rezultatele obținute în urma simulărilor în programul NEPLAN a celor patru variante propuse în secțiunea 4.5.1 care relevă pierderile în transformatoare și liniile de alimentare cu energie electrică a unităților de pompare UP1, UP2 și serviciile interne din Stației de pompe Măgurele.

Tabelul 4.24 prezintă valorile centralizate obținute în urma celor patru simulări efectuate, evidențiind parametrii de consum și pierderi relevante pentru fiecare variantă de alimentare a Stației de pompare Măgurele.

Tabel 4.24. Rezultate simulare numerică

Componente bilanț orar	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Energie rețea 20 kV [kWh]	544,599	542,996	542,570	40,129
Energie din surse regenerabilă [kWh]	0	0	0	500
Energie intrată [kWh]	544,599	542,996	542,57	540,129
Pierderi în transformatoare [kWh]	12,746	10,937	6,362	2,181
Pierderi în linii [kWh]	1,853	2,059	6,208	0
Pierderi sursă regenerabilă	0	0	0	7,948
Energie necesară [kWh] (motoare + servicii interne)	530	530	530	530

Analiza comparativă a celor patru variante de alimentare cu energie electrică a Stației de pompe Măgurele evidențiază diferențe relevante în termeni de eficiență energetică, structură a pierderilor și sursă de alimentare utilizată, toate raportate la un interval unitar de funcționare de o oră.

Prima variantă, alimentată din rețea prin liniile I și II și transformatoarele Tr1–Tr3, prezintă cele mai mari pierderi în transformatoare (12.746 kWh) și un randament energetic redus. A doua variantă, cu alimentare exclusiv de pe linia I prin Tr1 și Tr2, reduce pierderile în transformatoare la 10.937 kWh, dar crește ușor pierderile în liniile de distribuție (2.059 kWh), obținând o eficiență globală ușor îmbunătățită.

A treia variantă utilizează doar linia II și transformatorul Tr3, obținând pierderi minime în transformator (6.362 kWh), dar cu o creștere semnificativă a pierderilor în linii (6.208 kWh), din cauza traseelor lungi și posibilei suprasarcini.

Cea de-a patra variantă, care combină alimentarea prin linia II și Tr3 cu integrarea unei surse regenerabile de 500 kW, reduce substanțial energia preluată din rețea (40.129 kWh) și totalizează o energie de intrare de 530 kWh. Aceasta înregistrează cele mai mici pierderi în transformator (2.181 kWh), pierderi nule în linii, și pierderi minime asociate sursei regenerabile (7,948 kWh).

Această ultimă variantă se evidențiază ca fiind cea mai eficientă energetic și cea mai sustenabilă, reducând considerabil dependența de rețeaua convențională.

O reprezentare comparativă a pierderilor de energie în linii și transformatoare este reprezentată în Fig. 4.39:

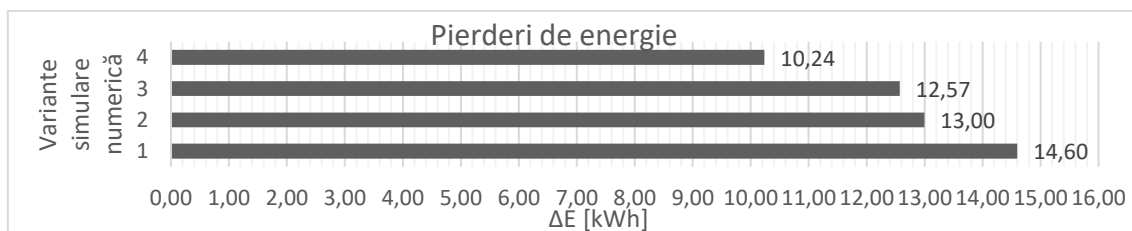


Fig. 4.39. Centralizare pierderi pentru cele 4 variante simulate numeric

Valorile pierderilor scad progresiv de la varianta 1 (14,60 kWh) la varianta 4 (10,24 kWh), ceea ce indică o creștere a eficienței energetice pe măsură ce configurația rețelei este optimizată, iar sursele regenerabile sunt integrate. Varianta 4 se remarcă prin cele mai reduse pierderi, fiind cea mai performantă din punct de vedere energetic. Totuși, din perspectiva fezabilității tehnice și a cerințelor de infrastructură, varianta 3 se evidențiază ca fiind cea mai ușor de implementat, necesitând un minim de modificări structurale.

În urma determinării pierderilor specifice orare prin simulări efectuate în Neplan, a fost realizat un calcul estimativ al pierderilor energetice lunare și anuale pentru fiecare variantă de alimentare a Stației de pompare Măgurele. Aceste valori au fost obținute prin corelarea pierderilor orare cu numărul efectiv de ore de funcționare ale unităților de pompare UP1/UP2 în cursul anului 2024, conform datelor centralizate în Tabelul 4.9. Rezultatele obținute pentru fiecare regim de funcționare simulat sunt prezentate în Tabelul 4.25:

Tabel 4.25. Pierderi estimate în baza simulărilor în Neplan

Variantă	Ore de funcționare	Pierderi orare	Total pierderi [kWh]	Economie [kWh]
1	2428	14,60	35448,80	-
2		13,00	31564,00	3.884,80
3		12,57	30519,96	4.928,84
4		10,24	24862,72	10.586,08

Interpretarea rezultatelor obținute în urma analizei energetice a celor patru variante de alimentare a Stației de pompe Măgurele evidențiază diferențe semnificative în pierderile totale de energie și în potențialul de economisire aferent fiecărei configurații, raportate la 2.428 ore de funcționare anuală.

Varianta 1, utilizată ca scenariu de referință, înregistrează cele mai ridicate pierderi, totalizând 35.448,80 kWh/an. Comparativ, varianta 3, bazată pe alimentarea exclusivă de pe linia II prin transformatorul Tr3, reduce pierderile la 30.519,96 kWh/an, rezultând o economie de 4.928,84 kWh. Această opțiune oferă un compromis favorabil între reducerea pierderilor și cerințele de implementare, necesitând intervenții minime asupra infrastructurii existente și fiind recomandată pentru adoptare într-o etapă inițială.

Pe termen lung, varianta 4, care include integrarea unei surse regenerabile de energie, permite reducerea pierderilor până la 24.862,72 kWh/an, asigurând o economie totală de 10.586,08 kWh față de scenariul de referință. Aceasta confirmă potențialul strategic al surselor regenerabile în creșterea eficienței energetice și diminuarea dependenței de rețeaua convențională.

Rezultatele se bazează pe simulări numerice și au caracter estimativ. Îmbunătățirea suplimentară a eficienței Stației de pompe Măgurele poate fi realizată prin optimizarea regimului de funcționare, reducerea sarcinii parțiale, implementarea mentenanței predictive și aplicarea unui management energetic inteligent. Astfel, adoptarea variantei 3 ca soluție intermediară, urmată de tranziția spre varianta 4, poate constitui o strategie sustenabilă și eficientă din punct de vedere energetic.

4.6. Concluzii

Eficiența globală a unității de pompare este determinată de produsul randamentelor componentelor sale—pompa, motor, cuplaj, convertor de frecvență și transformator—cu valori tipice între 85% și 99%, în funcție de echipament.

Optimizarea lanțului de conversie energetică prin utilizarea motoarelor de înaltă eficiență, a cuplajelor cu pierderi reduse și a convertoarelor de frecvență variabilă a condus la o reducere semnificativă a pierderilor și la creșterea eficienței energetice, prin adaptarea turației la cerințele hidraulice.

Bilanțul energetic orar pentru UP1 arată că energia utilă reprezintă 64,02% din energia electrică absorbită, pierderile în pompă fiind de 23,67%, în motor de 8,76%, iar în echipamentele de alimentare (linii și transformatoare) de 2,64%.

Regimul operațional în 2024 a fost caracterizat de o medie lunară de 202,33 ore de funcționare și 529,66 ore de inactivitate, sugerând un potențial semnificativ de optimizare a programelor de operare.

În sezonul de vârf, intensitatea energetică a depășit valorile recomandate de standardele europene (0,6–1,6 kWh/m³) și de IWA, evidențiind necesitatea modernizării instalațiilor și a unui control avansat al presiunii.

Simulările în NEPLAN au fundamentat măsuri precum ajustarea funcționării la punctul optim de eficiență, îmbunătățirea mentenanței, înlocuirea motoarelor cu echipamente IE3/IE4 (cu potențial de economii de până la 8,7%) și integrarea surselor regenerabile în schema de alimentare.

Concluziile susțin necesitatea unei abordări integrate pentru optimizarea energetică a sistemelor de pompare și evidențiază impactul concret al intervențiilor asupra performanței și durabilității infrastructurii de alimentare cu apă.

5. Concluzii finale privind cercetarea, contribuții științifice, aplicabilitatea rezultatelor și perspective de dezvoltare viitoare

5.1. Concluzii finale

Acest capitol prezintă concluziile generale rezultate în urma cercetării, evidențiind modul în care obiectivele tezei au fost atinse și contribuția adusă în domeniul monitorizării și controlului performanței sistemelor urbane de alimentare cu apă potabilă. Concluziile reflectă sinteza analizelor realizate pe parcursul fiecărui capitol, integrând aspectele tehnologice, energetice și de management identificate ca fiind esențiale pentru optimizarea funcționării acestor sisteme în contextul tranziției energetice și al dezvoltării durabile. În continuare, sunt detaliate principalele concluzii corespunzătoare fiecărei etape a cercetării.

Capitolul 2

Analiza realizată în capitolul 2 a evidențiat rolul esențial al sistemelor urbane de alimentare cu apă în asigurarea dezvoltării durabile, sănătății publice și funcționării eficiente a orașelor. Acestea au evoluat de la structuri rudimentare la rețele integrate, automatizate și digitalizate, răspunzând cerințelor actuale ale mediului urban.

Funcționarea acestor sisteme impune respectarea unor cerințe fundamentale: securitatea surselor, calitatea apei, continuitatea serviciilor, eficiența energetică, reziliența la riscuri și integrarea tehnologiilor inteligente. În prezent, ele se confruntă cu probleme majore precum degradarea infrastructurii, pierderile hidraulice, poluarea surselor, urbanizarea accelerată și impactul schimbărilor climatice, ceea ce necesită soluții tehnologice sustenabile și strategii integrate de gestionare.

Interdependența dintre consumul de apă și energie, cunoscută sub conceptul Water-Energy Nexus, subliniază necesitatea unor abordări sinergice care includ surse regenerabile, micro-rețele apă–energie și instrumente analitice avansate pentru optimizarea resurselor și reducerea impactului ecologic.

Politicile de mediu și tranziția energetică sprijină digitalizarea, reciclarea și reducerea amprente de carbon, consolidând reziliența infrastructurilor critice. Tehnologiile SCADA, IoT și AI permit monitorizarea în timp real, optimizarea consumului și adaptarea la condițiile variabile din mediul urban.

Pentru viitor, este necesară adoptarea unui cadru integrat de guvernare și cooperare intersectorială, axat pe planificare strategică, investiții sustenabile și aplicarea principiilor economiei circulare în gestionarea resurselor.

O parte din concluziile acestui studiu au fost diseminate în lucrări științifice relevante, contribuind la extinderea cunoașterii în domeniul sistemelor urbane de alimentare cu apă. În concluzie, modernizarea acestor sisteme presupune o abordare holistică, bazată pe sustenabilitate, eficiență energetică și inovație, pentru garantarea securității resurselor și îmbunătățirea calității vieții urbane.

Capitolul 3

Capitolul 3 al lucrării se concentrează pe analiza soluțiilor moderne de monitorizare, control și evaluare a performanței sistemelor urbane de alimentare cu apă, cu accent pe utilizarea indicatorilor specifici, integrarea tehnologiilor SCADA, aplicarea strategiilor de eficiență energetică și realizarea de studii aplicative relevante.

Cercetările evidențiază necesitatea unui cadru integrat, bazat pe monitorizare continuă, control inteligent și management energetic eficient, adaptat condițiilor locale.

(1) Definirea și utilizarea unui set structurat de indicatori de performanță (tehnic, operațional, financiar și ai calității serviciului) sunt esențiale pentru evaluarea obiectivă a rețelelor urbane de apă. Utilizarea standardelor IWA permite comparabilitatea și sprijină luarea deciziilor strategice.

(2) Implementarea SCADA aduce beneficii majore, asigurând supraveghere continuă, intervenție rapidă și mentenanță predictivă. Integrarea cu tehnologiile IoT și algoritmi analitici permite anticiparea disfuncționalităților și optimizarea resurselor.

(3) Capitolul propune un set de indicatori energetici specifici (precum intensitatea energetică, puterea activă și indicii de reactivitate), care facilitează identificarea surselor de pierderi și optimizarea consumului, contribuind la reducerea amprente de carbon.

(4) Este subliniată importanța unei abordări multidimensionale, care corelează performanța tehnică, economică, socială și ecologică. Prin metode precum Analytic Hierarchy Process (AHP), se poate prioritiza intervenția în funcție de impactul global.

(5) Evaluarea rețelei destinate stingerii incendiilor evidențiază importanța monitorizării continue și întreținerii riguroase. Indicatorii propuși (consumuri, timp de utilizare, consum specific) susțin planificarea adecvată a infrastructurii de urgență.

(6) Studiile de caz consolidează concluziile: analiza calității apei din Brașov confirmă respectarea standardelor; evaluarea consumului pentru hidranți relevă necesitatea unei gestiuni adaptate sezonier; compararea stațiilor de pompare (cu și fără turație variabilă) demonstrează superioritatea tehnologiilor VSD în eficiența energetică.

(7) Rezultatele cercetărilor au fost diseminate în cadrul unor publicații științifice de prestigiu, susținând relevanța și aplicabilitatea concluziilor.

În ansamblu, capitolul oferă contribuții consistente privind implementarea unui management integrat și sustenabil al sistemelor urbane de apă, evidențiind rolul esențial al digitalizării, eficienței energetice și siguranței infrastructurii pentru dezvoltarea durabilă și reziliența urbană.

Capitolul 4

Capitolul 4 prezintă contribuțiile aplicative privind creșterea eficienței energetice în stațiile de pompare ale sistemelor urbane de alimentare cu apă, pe baza analizelor și calculelor realizate din date experimentale reale, furnizate parțial de operatorul rețelei din zona Brașovului și parțial obținute prin măsurători directe în teren. Aceste măsurători au fost afectate de dificultăți tehnice și organizatorice, inclusiv accesul limitat la infrastructură și echipamente.

Principalele concluzii rezultate sunt:

(1) Analiza fluxului energetic a evidențiat rolul central al stațiilor de pompare în consumul de energie, subliniind că eficiența globală este determinată de performanța fiecărei componente: transformator, motor, convertor de frecvență, cuplaj mecanic și pompă. Alegerea și configurarea corectă a acestora contribuie direct la reducerea consumului energetic.

(2) Performanța pompelor centrifuge este optimă la punctul maxim al curbei de randament. Abaterile de la acest punct generează pierderi hidraulice și electrice, iar controlul prin convertoare de frecvență s-a dovedit superior metodelor clasice de reglare, prin reducerea semnificativă a pierderilor energetice.

(3) Măsurătorile de calitate a energiei electrice în stația Măgurele au arătat parametri electrici stabili, dar subliniază necesitatea monitorizării continue, întrucât fluctuațiile pot afecta performanța și durabilitatea echipamentelor.

(4) Studiul de caz realizat în stația Măgurele (care deservește Poiana Brașov) a arătat că modernizarea tehnologică prin introducerea pompelor de înaltă eficiență și a motoarelor cu soft-starter a condus la creșterea înălțimii de pompare, reducerea pierderilor și scăderea consumului specific de energie.

(5) Datele colectate prin SCADA au permis localizarea zonelor cu pierderi și subperformanțe, conducând la recomandări concrete: înlocuirea echipamentelor învechite și utilizarea controlului inteligent al debitului și turației.

(6) Studiile privind motoarele și convertoarele au demonstrat avantajele tehnologiilor de clasă IE3 și IE4, care oferă economii energetice considerabile și reducerea emisiilor de carbon, susținând importanța strategică a modernizării.

(7) Analiza transformatoarelor a indicat că, în special în regimuri de sarcină parțială, pierderile devin semnificative, recomandându-se utilizarea unor transformatoare eficiente și bine dimensionate.

(8) Problemele întâmpinate în timpul măsurătorilor confirmă necesitatea unor proceduri eficiente de colectare a datelor și implementarea unor sisteme de monitorizare automatizată, care să sporească acuratețea și să faciliteze luarea deciziilor operative.

În concluzie, capitolul confirmă importanța strategică a modernizării tehnologice, a echipamentelor performante și a monitorizării avansate pentru obținerea unui consum energetic sustenabil. Rezultatele constituie un suport solid pentru replicarea acestor intervenții în alte rețele urbane, promovând o gestiune responsabilă și eficientă a resurselor energetice în sectorul de alimentare cu apă.

5.2. Contribuții științifice și elemente de originalitate aduse prin cercetare

Contribuțiile originale ale tezei de doctorat se conturează printr-o abordare aplicativă și integrată asupra optimizării energetice și funcționale a sistemelor urbane de alimentare cu apă, cu accent pe infrastructura stațiilor de pompare. Principalele elemente de originalitate sunt următoarele:

Aspectul central al cercetării constă în definirea și utilizarea unui set extins de indicatori energetici specifici, dezvoltați în cadrul studiului de caz „Eficiența energetică și indicatori specifici”, care permit evaluarea riguroasă a performanței energetice a infrastructurii. Aceștia contribuie la cuantificarea consumului și la identificarea zonelor cu potențial de optimizare, sprijinind tranziția către o operare mai eficientă energetic.

Un element esențial este formularea și aplicarea unui set de indicatori operaționali pentru analiza performanței rețelei de hidranți exteriori, cu relevanță în contextul intervențiilor de urgență. Acești indicatori permit evaluarea consumului specific de apă pentru stingerea incendiilor, estimarea timpului teoretic de utilizare a hidranților și optimizarea amplasării acestora.

A fost elaborat un cadru metodologic integrat pentru monitorizarea performanței sistemelor urbane de alimentare cu apă, utilizând indicatori standardizați conform metodologiei IWA și reglementărilor WAREG. Acest cadru facilitează corelarea între eficiența tehnică, energetică, economică și socială și susține procesele decizionale strategice și operaționale.

A fost propus și validat un model predictiv cu comportament dinamic destinat estimării consumului de energie în stațiile de pompare, aplicat la stația Măgurele. Modelul integrează date hidraulice, energetice și operaționale, permițând simularea funcționării în regimuri variabile și identificarea scenariilor de optimizare.

A fost realizată o evaluare detaliată a pierderilor energetice în lanțul de conversie, de la sursa de alimentare electrică până la livrarea energiei hidraulice. Analiza a inclus pierderile în motorul electric, convertor, cuplaj mecanic și sistemul de conducte, oferind o imagine completă asupra punctelor critice ce necesită intervenții pentru creșterea eficienței.

Au fost propuse soluții tehnice pentru modernizarea stațiilor de pompare, prin înlocuirea echipamentelor cu altele din clase superioare de eficiență și prin integrarea convertoarelor de frecvență care permit adaptarea turației pompelor în funcție de necesarul de debit și presiune, contribuind la reducerea pierderilor și a costurilor de operare.

A fost integrat sistemul SCADA în procesul de monitorizare și control, asigurând înregistrarea continuă a parametrilor energetici și hidraulici, detectarea anomaliilor și intervenția proactivă în caz de disfuncționalități, ceea ce contribuie la creșterea fiabilității și siguranței operaționale.

În ansamblu, teza contribuie la îmbunătățirea performanțelor sistemului urban de alimentare cu apă în contextul tranziției energetice, printr-un demers științific bazat pe analiză sistemică, modelare operațională și integrarea tehnologiilor digitale. Obiectivele privind caracterizarea infrastructurii critice, monitorizarea avansată, creșterea eficienței energetice și optimizarea managementului integrat sunt atinse prin evaluări cantitative riguroase și studii de caz reprezentative.

Prin aceste contribuții, teza oferă soluții relevante și aplicabile în domeniul ingineriei electrice și al gestiunii infrastructurii critice, susținând optimizarea energetică, creșterea rezilienței și promovarea dezvoltării durabile în sistemele urbane de alimentare cu apă.

5.3 Valorificarea rezultatelor cercetării

Rezultatele cercetării au fost diseminate în cadrul unor conferințe științifice și prin publicații de specialitate, contribuind la consolidarea bazei de cunoștințe în domeniul gestiunii durabile a infrastructurii de apă și la promovarea inovației tehnologice în domeniul serviciilor esențiale.

5.4 Direcții viitoare de cercetare

Lucrarea deschide perspective semnificative pentru cercetări viitoare, precum: integrarea inteligenței artificiale și a tehnologiilor de învățare automată în procesele de diagnostic și optimizare operațională, corelarea datelor SCADA cu informații spațiale (GIS) pentru managementul riscurilor și planificarea infrastructurală, evaluarea impactului schimbărilor climatice asupra performanței sistemelor de apă precum și integrare extinsă a surselor regenerabile în infrastructurile urbane, pentru a reduce dependența energetică și a îmbunătăți sustenabilitatea pe termen lung.

Lucrări selectate din lista de referințe:

- Cojanu, V., & Helerea, E. (2021). Din istoria sistemelor urbane de alimentare cu apă și provocările viitorului. *Buletinul AGIR*, 1(2021), ianuarie-martie. Retrieved from <https://www.agir.ro/buletine/3209.pdf>
- Cojanu, V., & Helerea, E. (2020, March). Applying the mathematical optimization model in water distribution management. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 789, No. 1, p. 012011). IOP Publishing
- Popov, A., Fratu, A., Lepadat, I., Helerea, E. and Cojanu, V. (2019). "Monitoring the Cost of Energy for Powering the Railway Electric Traction System," In 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, pp. 1-6, doi: 10.1109/MPS.2019.8759724.
- Helerea, E., Cojanu, V., and Călin, M. D. (2022). "Interconnectivity between energy and water supply systems". In *Journal of Engineering Sciences and Innovation*, Vol.7, Nr. 2, pp.263-278, ISSN 2601-6699, ISSN-L 2537-320X, doi: 10.56958/jesi.2022.7.2.263.
- Cojanu, V., and Helerea, E., „Considerations on the efficient functioning of the urban water pumping stations. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1138, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
- Picazo, M. Á. P., & Tekinerdogan, B. (2024). Urban water distribution networks: Challenges and solution directions. In *Management and Engineering of Critical Infrastructures* (pp. 245-264). Academic Press.
- United Nations. (2020). *World water development report 2020: Water and climate change*. UNESCO. <https://www.unesco.org>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2019). *World population prospects 2019*, volume II. <https://population.un.org/wpp/>
- World Bank. (2018). *The role of infrastructure in meeting water challenges*. <https://www.worldbank.org>
- UNESCO. (2019). *The United Nations world water development report 2019: Leaving no one behind*. <https://www.unesco.org>
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. <https://www.ipcc.ch>
- FAO. (2021). *The state of food and agriculture 2021*. <https://www.fao.org>
- WHO & UNICEF. (2021). *Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2021 update and SDG baselines*. <https://www.who.int>
- United Nations Water. (2020). *Water and climate change*. <https://www.unwater.org>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2024). *Water use and stress*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/water-use-stress>
- Helerea, E., Calin, M. D., & Musuroi, C. (2023). *Water-energy nexus and energy transition—A review*. *Energies*, 16(4), 1879. <https://doi.org/10.3390/en16041879>

- Ahmad, S., Jia, H., Chen, Z., Li, Q., & Xu, C. (2020). *Water-energy nexus and energy efficiency: A systematic analysis of urban water systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110381.
- Li, Q., Yu, S., Al-Sumaiti, A. S., & Turitsyn, K. (2019). *Micro water–energy nexus: Optimal demand-side management and quasi-convex hull relaxation*. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 6(4), 1313-1322. <https://doi.org/10.1109/TCNS.2019.2932915>
- Yu, R., Wang, Y., Zhang, H., & Tang, S. (2018). *A hybrid approach for water-energy nexus optimization in urban water distribution systems*. *Applied Energy*, 230, 531-541. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.150>
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Dumitrescu, D. G., Horobeț, A., Tudor, C. D., & Belsăcu, L. (2023). *Renewables and decarbonization: Implications for energy policy in the European Union*. *Amfiteatru Economic*, 25(63), 345-361.
- Adamos, G., et al. (2023). *Exploring nexus policy insights for water-energy-food resilient communities*. *Sustainability Nexus Forum*, 31(69–82). <https://doi.org/10.1007/s00550-024-00534-0>
- FAO. (2021). *The state of food and agriculture: Making agri-food systems more resilient*. <https://www.fao.org/state-of-food-agriculture/en/>
- World Economic Forum (WEF). (2022). *The future of nature and business*. <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-nature-and-business>
- European Commission. (2021). *Fit for 55: Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality*. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/fit-55_en
- European Commission. (2020). *A European Green Deal*. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal_en
- Lodge, J. W. (2024). *Modelling the availability of water, energy, and food resources*. UNSW Sydney.
- Cornea, V. (2024). *Dezvoltare durabilă*. Presa Universitară Clujeană.
- Aziz, K. M. A., et al. (2025). *Integrating digital mapping technologies in urban development*. *Alexandria Engineering Journal*, 116, 512–524. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.078>
- Ramos, H. M., et al. (2024). *Energy transition in urban water infrastructures*. *Water*, 16(504). <https://doi.org/10.3390/w16030504>
- Wang, H., et al. (2024). *Sustainable energy transition in cities*. *Sustainable Cities and Society*, 107, 105434. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105434>
- McManamay, R. A., et al. (2019). *Spatially explicit land-energy-water future scenarios*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 880–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.011>
- Javan, K., et al. (2024). *Water–energy–food nexus: Urban pollution perspective*. *Science of the Total Environment*, 912, 169319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169319>
- IWA. (2016). *Performance Indicators for Water Supply Services: Manual of Best Practice* (3rd ed.). IWA Publishing.
- WAREG. (2023a). *Analysis of Water Efficiency KPIs in WAREG Member Countries*.
- WAREG. (2023b). *Energy Crisis 2023: Comparative Assessment of Regulatory Responses Across Europe*.
- WHO. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*.
- Asian Development Bank (ADB). (2017). *Ensuring Sustainability of Urban Water Supply and Sanitation Services*.
- Marlow, D. R., et al. (2017). *Asset management for sustainable urban water systems*. *Water Research*, 44(3), 957-967.
- EEA. (2019). *Water Resources Across Europe - Confronting Water Stress: An Updated Assessment*.
- Nowtricity. (n.d.). *Romania electricity profile*. <https://www.nowtricity.com/country/romania/>
- Cherdantseva, Y., et al. (2016). *A review of cyber security risk assessment methods for SCADA systems*. *Computers & Security*, 56, 1-27.
- Nogueira, M., et al. (2020). *A review of SCADA systems: State of the art, challenges, and possible solutions*. *IEEE Access*, 8, 159358-159376.
- McClanahan, R. H. (2002). *The benefits of networked SCADA systems*. In *Rural Electric Power Conference* (pp. C5-1). IEEE.
- El-Seidy, M. M., et al. (2021). *A Comprehensive Review of SCADA Systems*. *IEEE Access*, 9, 13287-13305.
- Georgescu, S.-C., & Georgescu, A.-M. (2014). *Manual de EPANET*. București: Editura Printech.
- Chitale, S. K., et al. (2021). *Parameters affecting efficiency of centrifugal pump: A review*. *IJSRST*, 8(6), 49–58. <https://doi.org/10.32628/IJSRST18573>