NASOS STANSIYALARIDA SUV TARKIBIDAGI ERIGAN KISLOROD MIQDORINI MONITORING QILISH ASOSIDA KAVITATSIYA XAVFINI BAHOLASH ALGORITMI

Turg‘unov Boxodirjon Xamdamjon o‘g‘li
"TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti tayanch doktoranti
E-mail: b.turgunov@tiiame.uz

Jovliboyev Sherzod Erkin o‘g‘li
"TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti talabasi
E-mail: sherzodjovliyev16@gmail.com

Annotatsiya. Nasos stansiyalarining barqaror ishlashi suv muhitining fizik-kimyoviy xossalari hamda gidravlik sharoitlarga bog‘liq. Suv tarkibidagi erigan gazlar, xususan erigan kislorod miqdorining ortishi nasos agregatlarida kavitatsiya jarayonining yuzaga kelish ehtimolini oshirishi mumkin. Kavitatsiya nasos elementlarining tez eskirishi, vibratsiyaning ortishi va energiya samaradorligining pasayishiga olib keladi.

Ushbu tadqiqotda nasos stansiyalarida suv tarkibidagi erigan kislorod miqdorini monitoring qilish asosida kavitatsiya xavfini baholash algoritmi taklif etiladi. Tadqiqot jarayonida suv tarkibidagi erigan kislorod miqdori membranali turdagi dissolved oxygen (DO) sensori yordamida o‘lchandi hamda olingan ma’lumotlar nasos kirish bosimi va vibratsiya ko‘rsatkichlari bilan birgalikda tahlil qilindi. Natijada kavitatsiya xavfini baholash imkonini beruvchi algoritm ishlab chiqildi. Taklif etilgan yondashuv nasos stansiyalarining texnik holatini monitoring qilish va kavitatsiya jarayonlarini erta aniqlashda samarali qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: nasos stansiyasi, kavitatsiya, erigan kislorod (DO), suv sifati monitoringi, IoT sensorlar, real vaqt monitoringi, kavitatsiya xavfi baholash, gidravlik jarayonlar, bosim, temperatura, suv sathi, ko‘p parametrli monitoring, signalni qayta ishlash, bashoratlash algoritmi, matematik model, kavitatsiya indeksi, suv oqimi, nasos samaradorligi, aeratsiya jarayoni, suvdagi gazlar, sensor tizimlari, aqlli monitoring, sanoat avtomatizatsiyasi, SCADA tizimi, ma’lumotlar tahlili, anomaliya aniqlash, diagnostika tizimi, energiya samaradorligi, nasos ekspluatatsiyasi, raqamli transformatsiya.

Kirish

Zamonaviy suv xo‘jaligi tizimlari, irrigatsiya infratuzilmalari hamda sanoat texnologik jarayonlarining barqaror ishlashi nasos stansiyalarining uzluksiz va ishonchli faoliyat yuritishiga bevosita bog‘liqdir. Aholi sonining ortishi, qishloq xo‘jaligi ekin maydonlarining kengayishi va sanoat ishlab chiqarish hajmlarining oshishi natijasida suv resurslariga bo‘lgan talab keskin ortib bormoqda. Ushbu sharoitda suvni uzluksiz yetkazib berish tizimlarining samaradorligini ta’minlash, ayniqsa nasos agregatlarining texnik holatini doimiy nazorat qilish va ularning ish rejimini optimallashtirish dolzarb ilmiy-amaliy muammolardan biri sifatida qaraladi.

Nasos stansiyalarida ishlovchi agregatlar uzoq muddat davomida murakkab gidravlik va mexanik yuklamalar ostida faoliyat yuritadi. Bunday sharoitlarda suyuqlik oqimining barqarorligi, bosimning taqsimlanishi va gidrodinamik jarayonlarning muvozanati tizimning umumiy ishlash samaradorligini belgilovchi asosiy omillar hisoblanadi. Shu bilan birga, nasosning ish jarayonida yuzaga keladigan turli noxush hodisalar, jumladan oqimning notekisligi, turbulensiya kuchayishi va bosimning lokal pasayishi kabi jarayonlar tizimning ish rejimiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi. Bunday omillar vaqt o‘tishi bilan agregat elementlarining tez eskirishiga va texnik nosozliklarning yuzaga kelishiga olib keladi[1].

Nasos agregatlarining ishlash jarayonida yuzaga keladigan eng xavfli gidravlik hodisalardan biri kavitatsiya hisoblanadi. Kavitatsiya suyuqlik ichida bosimning bug‘lanish bosimidan pastga tushishi natijasida bug‘ pufakchalari hosil bo‘lishi va ularning yuqori bosim zonasida keskin yemirilishi bilan tavsiflanadi. Ushbu jarayon mikroportlashlar hosil qilib, nasosning ishchi yuzalariga zarbaviy ta’sir ko‘rsatadi. Natijada metall yuzalarda eroziya jarayoni tezlashadi, vibratsiya darajasi ortadi, shovqin kuchayadi va nasosning umumiy foydali ish koeffitsiyenti pasayadi[2]. Amaliy kuzatishlar shuni ko‘rsatadiki, kavitatsiya jarayoni nazorat qilinmasa, u nasos agregatlarining xizmat muddatini sezilarli darajada qisqartirishi hamda kutilmagan avariyaviy holatlarning yuzaga kelishiga sabab bo‘lishi mumkin

Shu sababli nasos stansiyalarida gidravlik jarayonlarni chuqur tahlil qilish, kavitatsiya yuzaga kelishining dastlabki bosqichlarini aniqlash va uni oldindan

baholash zamonaviy ilmiy tadqiqotlarning muhim yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Ayniqsa, real ish sharoitlarida yuzaga keladigan yashirin (latent) jarayonlarni aniqlash va ularning rivojlanish mexanizmlarini tushunish nasos agregatlarining ishonchliligini oshirish va ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirishda muhim ahamiyat kasb etadi.

An’anaviy yondashuvlarda kavitatsiya jarayoni asosan gidravlik parametrlar — bosim, oqim tezligi va suyuqlikning fizik xususiyatlari asosida baholanadi. Biroq so‘nggi ilmiy tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, suv tarkibidagi erigan gazlar, xususan erigan kislorod miqdori (Dissolved Oxygen – DO) kavitatsiya jarayonining boshlanishi va rivojlanishiga sezilarli darajada ta’sir ko‘rsatadi. Eritilgan gazlar suyuqlik ichida mikro pufakchalar hosil bo‘lishi uchun “yadro” vazifasini bajaradi va bu holat kavitatsiya boshlanish chegarasini pasaytiradi [3].

Suyuqlik tarkibidagi erigan kislorod miqdori ortishi bilan gaz fazasining ajralib chiqish ehtimoli ham ortadi, bu esa past bosim zonalarida pufakchalar hosil bo‘lish jarayonini tezlashtiradi. Ayniqsa, nasosning kirish qismida bosimning keskin pasayishi sharoitida DO miqdorining yuqori bo‘lishi kavitatsiya jarayonining tezroq boshlanishiga olib kelishi mumkin. Shu bilan birga, gaz pufakchalarining keyinchalik yuqori bosim zonalarida imploziv yemirilishi kuchli zarbaviy to‘lqinlarni hosil qiladi va bu nasos elementlariga sezilarli zarar yetkazadi.

Erigan kislorod miqdori nafaqat kavitatsiya boshlanishiga, balki uning intensivligi va rivojlanish dinamikasiga ham ta’sir ko‘rsatadi. Yuqori DO darajasida hosil bo‘ladigan pufakchalar soni ortib, ularning o‘zaro ta’siri natijasida murakkab kavitatsion strukturalar shakllanadi. Bu esa vibratsiya va akustik shovqin darajasining oshishiga, shuningdek nasosning gidravlik samaradorligining pasayishiga olib keladi. Shu sababli DO parametrini kuzatish orqali kavitatsiya jarayonining yashirin bosqichlarini aniqlash imkoniyati paydo bo‘ladi.

Mazkur omillarni hisobga olgan holda, suv tarkibidagi erigan kislorod miqdorini monitoring qilish nasos stansiyalarida kavitatsiya xavfini baholashning muhim ko‘rsatkichlaridan biri sifatida qaralmoqda. DO parametrining real vaqt rejimida o‘lchanishi va uning boshqa gidravlik parametrlar bilan birgalikda tahlil qilinishi kavitatsiya ehtimolini aniqlashda yuqori aniqlikni ta’minlashi mumkin [4].

So‘nggi yillarda raqamli texnologiyalar, xususan IoT (Internet of Things) asosidagi monitoring tizimlarining rivojlanishi nasos stansiyalarida ko‘p parametrli nazoratni tashkil etish imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytirdi. Zamonaviy sensor texnologiyalari yordamida suv tarkibidagi erigan kislorod, temperatura, bosim va sath kabi muhim parametrlarni real vaqt rejimida o‘lchash hamda ularni markazlashgan axborot tizimlariga uzatish mumkin. Bu esa nasos agregatlarining ish jarayonini kompleks baholash, yashirin jarayonlarni aniqlash va xavfli holatlarni oldindan prognoz qilish imkonini beradi.

Ko‘p parametrli monitoring ma’lumotlarini integratsiyalashgan holda tahlil qilish kavitatsiya jarayonini aniqroq baholashga xizmat qiladi. Ayniqsa, erigan kislorod miqdorini boshqa gidravlik parametrlar bilan birgalikda ko‘rib chiqish orqali kavitatsiya xavfini aniqlashning yangi algoritmik yondashuvlarini ishlab chiqish mumkin. Bunday yondashuvlar an’anaviy usullarga nisbatan yuqori aniqlikni ta’minlab, nasos stansiyalarining ishonchliligini oshirish va ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirishga xizmat qiladi.

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi nasos stansiyalarida suv tarkibidagi erigan kislorod miqdorini monitoring qilish asosida kavitatsiya xavfini baholash algoritmini ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqot doirasida DO, temperatura, bosim va boshqa parametrlar o‘rtasidagi bog‘liqliklar tahlil qilinadi hamda ularning asosida kavitatsiya ehtimolini aniqlovchi matematik model va algoritmik yechim taklif etiladi. Ushbu yondashuv real vaqt rejimida ishlovchi aqlli monitoring tizimlarini yaratish uchun nazariy va amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi [5].

Usullar

Mazkur tadqiqot obyekti sifatida suv ta’minoti va irrigatsiya tizimlarida keng qo‘llaniladigan markazdan qochma turdagi nasos agregatlari bilan jihozlangan nasos stansiyasi tanlandi. Tadqiqotda asosiy e’tibor nasosning kirish (so‘rish) qismida va ishchi g‘ildirak zonasida yuzaga keladigan gidravlik jarayonlarga qaratildi, chunki aynan ushbu hududlarda bosimning keskin pasayishi natijasida kavitatsiya hodisasi yuzaga kelish ehtimoli yuqori bo‘ladi. Nasos stansiyasining ish rejimi o‘zgaruvchan

yuklama, oqim tezligi va tashqi muhit omillari ta’sirida shakllanadi, bu esa ko‘p parametrli monitoringni talab qiladi.

Tadqiqot obyekti va monitoring parametrlari:

Tadqiqot doirasida kavitatsiya xavfiga bevosita yoki bilvosita ta’sir ko‘rsatuvchi quyidagi asosiy parametrlar tanlab olindi: erigan kislorod miqdori (DO), temperatura (T), bosim (P) va suv sathi (H). Ushbu parametrlar nasos agregatining gidravlik holatini kompleks baholash imkonini beradi.

Eritilgan kislorod miqdori suv tarkibidagi gazlar miqdorini ifodalaydi va u kavitatsiya jarayonining boshlanishida muhim rol o‘ynaydi. DO miqdori quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$DO = \frac{C_{O_2}}{C_{sat}} \times 100\%$$

bu yerda: C_{O_2}— suvdagi haqiqiy erigan kislorod konsentratsiyasi, (mg/L), C_{sat}— berilgan temperatura va bosimdagi maksimal to‘yinganlik qiymati.

Temperatura suyuqlikning fizik xususiyatlariga, xususan, gazlarning eruvchanligiga va bug‘lanish bosimiga ta’sir qiladi. Temperatura oshishi bilan erigan gazlar miqdori kamayadi, ammo bug‘lanish bosimi ortadi, bu esa kavitatsiya ehtimolini oshiradi[6]. Temperatura va bug‘lanish bosimi orasidagi bog‘liqlik quyidagicha ifodalanadi:

$$P_v = f(T)$$

bosim nasos tizimidagi asosiy boshqaruvchi parametr bo‘lib, uning pasayishi kavitatsiya yuzaga kelishining asosiy sabablaridan biridir. Kavitatsiya xavfi odatda kavitatsiya soni orqali baholanadi:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{0.5\rho v^2}$$

bu yerda: P— suyuqlik bosimi (Pa), P_v— bug‘lanish bosimi (Pa), ρ— suyuqlik zichligi (kg/m³), v— oqim tezligi (m/s).

Suv sathi (H) esa nasosning so‘rish qismidagi bosimni aniqlovchi muhim parametr hisoblanadi. Sathning pasayishi kirish bosimini kamaytiradi va kavitatsiya xavfini oshiradi. Bu bog‘liqlik quyidagi gidrostatik tenglama orqali ifodalanadi:

$$P = \rho g H$$

bu yerda g— erkin tushish tezlanishi (9.81 m/s²).

Tadqiqotda tanlangan parametrlarning o‘zaro bog‘liqligi va ularning kavitatsiya jarayoniga ta’siri 2.1-jadvalda keltirilgan[7].

1-jadval

Monitoring parametrlari va ularning kavitatsiyaga ta’siri

Parametr	Belgilanishi	O‘lchov birligi	Kavitatsiyaga ta’siri
Eritilgan kislorod	DO	mg/L yoki %	Gaz pufakchalari yadrolarini hosil qiladi, kavitatsiyani tezlashtiradi
Temperatura	T	°C	Bug‘lanish bosimini oshiradi, gaz eruvchanligini kamaytiradi
Bosim	P	Pa	Pasayishi kavitatsiya boshlanishiga olib keladi
Suv sathi	H	m	Past sath kirish bosimini kamaytiradi
Oqim tezligi	v	m/s	Tezlik oshishi bosimni kamaytiradi

Tanlangan parametrlar o‘zaro bog‘liq holda kavitatsiya jarayonini shakllantiradi. Ayniqsa, DO miqdori va bosim o‘rtasidagi kompleks bog‘liqlik kavitatsiya boshlanish chegarasini aniqlashda muhim ahamiyat kasb etadi. Shu sababli ushbu parametrlarni real vaqt rejimida monitoring qilish va ularni kompleks tahlil qilish orqali kavitatsiya xavfini yuqori aniqlik bilan baholash mumkin.

Ma’lumotlarni yig‘ish va qayta ishlash arxitekturasi:

Mazkur tadqiqotda nasos stansiyalarida kavitatsiya xavfini real vaqt rejimida baholash uchun ko‘p bosqichli ma’lumotlarni yig‘ish va qayta ishlash arxitekturasi taklif etiladi[8]. Ushbu arxitektura sensor qatlamidan boshlab IoT uzatish moduli, markaziy server hamda SCADA interfeysigacha bo‘lgan barcha funksional bo‘g‘inlarni o‘z ichiga oladi. Tizimning asosiy vazifasi suv tarkibidagi erigan kislorod, temperatura va bosim parametrlarini uzluksiz o‘lchash, ularni raqamlashtirish, dastlabki filtrlash va normalizatsiyadan o‘tkazish, so‘ngra markazlashgan monitoring va tahlil platformasiga uzatishdan iborat.

Sensorlar va o‘lchash tugunlari:

Tizimning birlamchi darajasi sifatida nasosning so‘rish va bosim liniyalariga yaqin joylarda o‘rnatilgan sensorlar ishlatiladi. Erigan kislorod sensori suv tarkibidagi DO miqdorini mg/L yoki foiz ko‘rinishida qayd etadi. Temperatura sensori suv haroratini o‘lchaydi, chunki temperatura DO ning eruvchanligiga, bug‘lanish bosimiga va umumiy gidravlik holatga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Bosim sensori esa nasosning kirish qismidagi real bosim qiymatini aniqlaydi va kavitatsiya xavfini baholashda eng muhim parametrlardan biri sifatida ishlatiladi.

Har bir sensor analog yoki raqamli chiqishga ega bo‘lib, ular ESP32 mikrokontrolleriga ulanadi. Agar sensor analog chiqishli bo‘lsa, signal A/D konvertatsiya orqali raqamlashtiriladi. Sensorlardan olingan vaqt bo‘yicha diskretlangan signal quyidagicha ifodalanadi:

$$x_i[n] = x_i(nT_s), i = 1,2, \dots, m$$

bu yerda: $x_i[n]$— i-parametrning n-namunadagi qiymati, T_s— diskretlash davri, m— kuzatilayotgan parametrlar soni.

Mazkur tadqiqotda $m = 3$yoki kengaytirilgan holda $m = 4$deb olinadi, ya’ni DO, temperatura, bosim va zaruratga ko‘ra sath parametri birgalikda tahlil qilinadi.

IoT tizimi va ma’lumotlarni uzatish:

Sensorlardan olingan ma’lumotlar ESP32 mikrokontrolleri orqali yig‘iladi. ESP32 tanlanishining asosiy sababi uning ichki Wi-Fi moduli, past quvvat sarfi, ko‘p kanalli ADC interfeysi va real vaqt rejimidagi ma’lumot almashish imkoniyatlaridir. Mikrokontroller har bir sensor kanalidan olingan qiymatlarni vaqt tamg‘asi bilan birga ma’lumot paketi ko‘rinishida shakllantiradi. Paketning umumiy ko‘rinishi quyidagicha ifodalanadi:

$$\mathrm{X}(t) = \{DO(t), T(t), P(t), H(t)\}$$

bu yerda $\mathrm{X}(t)$— $t$vaqt onidagi monitoring vektori.

Shakllantirilgan monitoring vektori Wi-Fi yoki boshqa IoT aloqa protokoli orqali serverga uzatiladi. Server qismida ma’lumotlar bazasi tashkil etilib, barcha kiruvchi qiymatlar vaqt ketma-ketligi ko‘rinishida saqlanadi. So‘ng ular SCADA tizimiga uzatiladi yoki bevosita tahlil moduli tomonidan qayta ishlanadi. Shu tariqa

lokal o‘lchov nuqtasidan markaziy boshqaruv darajasigacha bo‘lgan uzluksiz raqamli monitoring zanjiri hosil qilinadi.

Dastlabki signalni qayta ishlash:

Sensorlardan kelayotgan xom signal tarkibida tasodifiy shovqinlar, o‘lchash xatoliklari va qisqa muddatli anomaliyalar bo‘lishi mumkin. Shu sababli ma’lumotlar tahlildan oldin dastlabki qayta ishlash bosqichidan o‘tkaziladi. Bu bosqich ikki asosiy amalni o‘z ichiga oladi: filtratsiya va normalizatsiya.

Birinchi bosqichda signalni silliqlash uchun oddiy sirpanma o‘rtacha filtrdan foydalanish mumkin:

$$\tilde{x}[n] = \frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1} x[n-k]$$

bu yerda: $\tilde{x}[n]$— filtrlashdan keyingi signal, K— oynaning uzunligi.

Ushbu filtr sensor shovqinlarini kamaytiradi va parametrning umumiy tendensiyasini saqlab qoladi[9]. Agar impulsli shovqinlar ko‘p bo‘lsa, median filtrdan foydalanish ham mumkin:

$$\tilde{x}[n] = \text{median}\{x[n-r], \dots, x[n], \dots, x[n+r]\}$$

bu yerda: $2r+1$— filtr oynasining uzunligi.

Ikkinchi bosqichda turli birliklarda o‘lchangan parametrlarni yagona diapazonga keltirish uchun normalizatsiya bajariladi. Min-max normalizatsiya quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$x^*[n] = \frac{\tilde{x}[n] - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

bu yerda: $x^*[n]$— normallashtirilgan signal, $x_{\min}$va $x_{\max}$— parametrning minimal va maksimal qiymatlari.

Mazkur yondashuv DO, temperatura va bosim kabi turli o‘lchov birliklariga ega signallarni bitta algoritmik model tarkibida taqqoslash va ulardan kompleks foydalanish imkonini beradi. Natijada har bir parametr 0 dan 1 gacha bo‘lgan oraliqda ifodalanadi va bu keyingi kavitatsiya xavfini baholash modelining hisoblash barqarorligini oshiradi[10].

Markaziy server va SCADA integratsiyasi:

Dastlabki qayta ishlangan ma’lumotlar server qismida vaqtli qatorlar shaklida saqlanadi. Ushbu bosqichda ma’lumotlarni arxivlash, vizualizatsiya qilish, ogohlantirish chegaralarini belgilash va kavitatsiya xavfi indikatorlarini hisoblash imkoniyati mavjud bo‘ladi. SCADA tizimi esa operator uchun qulay interfeys yaratib, joriy parametrlarni, tarixiy trendlarni va kritik holatlarni ko‘rsatadi. Masalan, agar DO miqdori, temperatura va bosim qiymatlari xavfli kombinatsiyani hosil qilsa, tizim avtomatik ravishda ogohlantiruvchi signal yuborishi mumkin.

Shunday qilib, taklif etilayotgan arxitektura sensor qatlamidan boshlab analitik qatlamgacha bo‘lgan barcha bosqichlarni yagona tizimga birlashtiradi. Bu esa nasos stansiyalarida kavitatsiya xavfini baholash uchun ishonchli, tezkor va kengaytiriladigan raqamli platforma yaratish imkonini beradi.

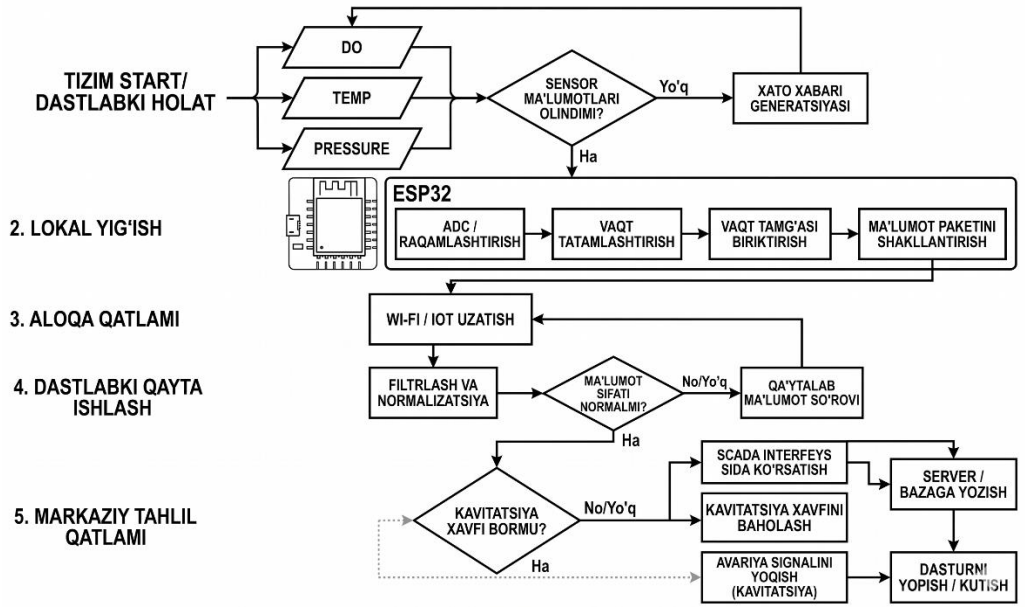
2-jadval

Ma’lumotlarni yig‘ish va qayta ishlash arxitekturasining asosiy komponentlari

Qatlam	Asosiy element	Vazifasi	Chiqish natijasi
Sensor qatlami	DO sensori, temperatura sensori, bosim sensori	Fizik parametrlarni o‘lchash	Xom signal
Yig‘ish qatlami	ESP32 mikrokontrolleri	Signalni qabul qilish, A/D o‘zgartirish, paketlash	Raqamli ma’lumot paketi
Uzatish qatlami	Wi-Fi / IoT aloqa kanali	Ma’lumotni serverga uzatish	Tarmoq orqali yuborilgan monitoring vektori
Qayta ishlash qatlami	Filtratsiya va normalizatsiya moduli	Shovqinni kamaytirish va birliklarni birxillashtirish	Tozalangan va normallashtirilgan signal
Tahlil va boshqaruv qatlami	Server / SCADA	Saqlash, vizualizatsiya, ogohlantirish va tahlil	Xavf indikatori va operator paneli

Ushbu jadvalda keltirilgan arxitektura nasos stansiyalarida ma’lumotlarni yig‘ish va qayta ishlash jarayonining bosqichma-bosqich tashkil etilishini ifodalaydi.

Har bir qatlam o‘ziga xos funksiyani bajarib, umumiy tizimning uzluksiz va ishonchli ishlashini ta’minlaydi. Sensor qatlamida olingan xom ma’lumotlar yig‘ish va uzatish bosqichlaridan o‘tib, dastlabki qayta ishlash orqali tozalanadi va normallashtiriladi. Natijada markaziy server va SCADA tizimida tahlil qilish uchun tayyorlangan yuqori sifatli ma’lumotlar shakllanadi. Bu esa kavitatsiya xavfini real vaqt rejimida aniq baholash imkonini beradi.



1-rasm. Kavitatsiya xavfini baholashning matematik modeli

Kavitatsiya xavfini baholashning matematik modeli:

Nasos stansiyalarida kavitatsiya jarayonini baholash uchun fizik asoslangan parametrlar va ularning o‘zaro bog‘liqligiga tayanuvchi matematik model taklif etiladi. Ushbu modelning asosiy maqsadi real vaqt monitoring ma’lumotlari asosida kavitatsiya xavfi darajasini aniqlash va uni miqdoriy ko‘rsatkich sifatida ifodalashdan iborat.

Kavitatsiya soni (σ):

Kavitatsiya ehtimolini baholashda eng muhim mezonlardan biri kavitatsiya soni hisoblanadi. U suyuqlikdagi mavjud bosimning bug‘lanish bosimiga nisbatan ustunligini ifodalaydi:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{0.5\rho v^2}$$

bu yerda: P— nasos kirishidagi bosim (Pa), P_v— suyuqlikning bug‘lanish bosimi (Pa), ρ— suyuqlik zichligi (kg/m³), v— oqim tezligi (m/s).

Agar σqiymati kritik chegaradan past bo‘lsa, kavitatsiya boshlanish ehtimoli ortadi. Demak, σning kamayishi xavfning ortishini bildiradi[11].

Erigan kislorod (DO) bilan bog‘liqlik:

Suv tarkibidagi erigan kislorod miqdori gaz pufakchalari hosil bo‘lishiga ta’sir qiluvchi muhim omillardan biri hisoblanadi. DO miqdori ortishi bilan suyuqlikda gaz yadrolari soni ko‘payadi, bu esa kavitatsiya boshlanishini osonlashtiradi. Ushbu bog‘liqlikni soddalashtirilgan ko‘rinishda quyidagicha ifodalash mumkin:

$$N_b \propto DO$$

bu yerda: N_b— hosil bo‘ladigan pufakchalar soni.

Shuningdek, DO ning temperaturaga bog‘liqligi ham hisobga olinadi:

$$DO = f(T, P)$$

bu esa kavitatsiya jarayonining murakkab, ko‘p omilli xarakterga ega ekanligini ko‘rsatadi.

Ko‘p parametrli kavitatsiya xavfi modeli:

Kavitatsiya xavfini aniq baholash uchun bir nechta parametrlar integratsiyalashgan holda ko‘rib chiqiladi. Taklif etilayotgan modelda xavf darajasi quyidagi umumlashgan funksiya orqali aniqlanadi:

$$R = w_1(1 - \sigma) + w_2 DO^* + w_3 T^* + w_4 P^*$$

bu yerda: R— kavitatsiya xavfi indeksi (0–1 oralig‘ida), σ— normallashtirilgan kavitatsiya soni, DO^*, T^*, P^*— mos ravishda normallashtirilgan parametrlar, w_1, w_2, w_3, w_4— og‘irlik koeffitsiyentlari ($\sum w_i = 1$).

Ushbu modelda:

- $(1-\sigma)$komponenti bosim omilining xavfga teskari ta’sirini ifodalaydi,
- DO^*gaz pufakchalari hosil bo‘lish ehtimolini hisobga oladi,
- T^*temperatura orqali bug‘lanish bosimining o‘zgarishini aks ettiradi,
- P^*esa tizimdagi umumiy bosim darajasini ifodalaydi.

Fizik asos va izoh:

Taklif etilgan matematik model gidravlik va termodinamik qonuniyatlarga asoslanadi. Kavitatsiya jarayoni bosim va bug‘lanish bosimi o‘rtasidagi nisbat bilan belgilanadi, biroq real tizimlarda bu jarayon faqat bosim bilan cheklanmaydi. Eritilgan gazlar, ayniqsa kislorod, pufakcha hosil bo‘lishining boshlang‘ich shartlarini belgilaydi. Shu sababli DO parametrini modelga kiritish kavitatsiya xavfini aniqlash aniqligini oshiradi.

Ko‘p parametrli modelning asosiy afzalligi shundaki, u nasos tizimining real ish sharoitlarini kompleks tarzda aks ettiradi. Parametrlarning normallashtirilishi va og‘irlik koeffitsiyentlari orqali model turli sharoitlarga moslashtirilishi mumkin. Natijada kavitatsiya xavfi $R \in [0,1]$oralig‘ida baholanib, quyidagicha talqin qilinadi:

- $R < 0.3$— xavf yo‘q yoki juda past
- $0.3 \leq R < 0.6$— o‘rta xavf
- $R \geq 0.6$— yuqori kavitatsiya xavfi

Shunday qilib, taklif etilgan matematik model nasos stansiyalarida kavitatsiya xavfini real vaqt rejimida baholash, uni miqdoriy ifodalash va oldindan ogohlantirish tizimlarini yaratish uchun nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi[12].

Algoritmik model va ishlash ketma-ketligi:

Nasos stansiyalarida suv tarkibidagi erigan kislorod miqdorini monitoring qilish asosida kavitatsiya xavfini baholash uchun taklif etilayotgan algoritmik model real vaqt rejimida ishlovchi ko‘p bosqichli hisoblash ketma-ketligiga asoslanadi. Mazkur modelning asosiy vazifasi sensorlardan kelayotgan xom ma’lumotlarni qabul qilish, ularni dastlabki qayta ishlash, fizik va statistik parametrlarni hisoblash hamda yakuniy kavitatsiya xavfi indikatorini shakllantirishdan iborat. Algoritmning tuzilishi sodda bo‘lishi bilan birga, amaliy monitoring tizimlariga integratsiya qilish uchun yetarli darajada moslashuvchan hisoblanadi.

Algoritm ishining birinchi bosqichida DO sensori, temperatura sensori, bosim sensori va zaruratga ko‘ra sath sensoridan joriy ma’lumotlar olinadi. Ushbu ma’lumotlar vaqt tamg‘asi bilan birga monitoring vektori ko‘rinishida shakllantiriladi:

$$X(t) = \{DO(t), T(t), P(t), H(t)\}$$

bu yerda: $X(t)$— $t$vaqt onidagi parametrlar to‘plami.

Ikkinchi bosqichda sensorlardan kelgan xom signal filtratsiya jarayonidan o‘tkaziladi. Bunda qisqa muddatli tasodifiy shovqinlar va impulsli xatoliklarni kamaytirish maqsadida sirpanma o‘rtacha yoki median filtrdan foydalaniladi. Filtrlangan signal quyidagicha aniqlanadi:

$$\tilde{x}[n] = \frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1} x[n-k]$$

bu yerda: K— filtr oynasining uzunligi. Ushbu bosqich algoritmning barqaror ishlashini ta’minlaydi va noto‘g‘ri ogohlantirishlar sonini kamaytiradi.

Uchinchi bosqichda kavitatsiya xavfini baholash uchun zarur hosila parametrlar hisoblanadi. Dastlab temperatura asosida bug‘lanish bosimi aniqlanadi, so‘ng kavitatsiya soni hisoblab chiqiladi:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{0.5\rho v^2}$$

shundan keyin barcha parametrlar normallashtiriladi va yagona algoritmik muhitga keltiriladi:

$$x^*[n] = \frac{x[n] - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

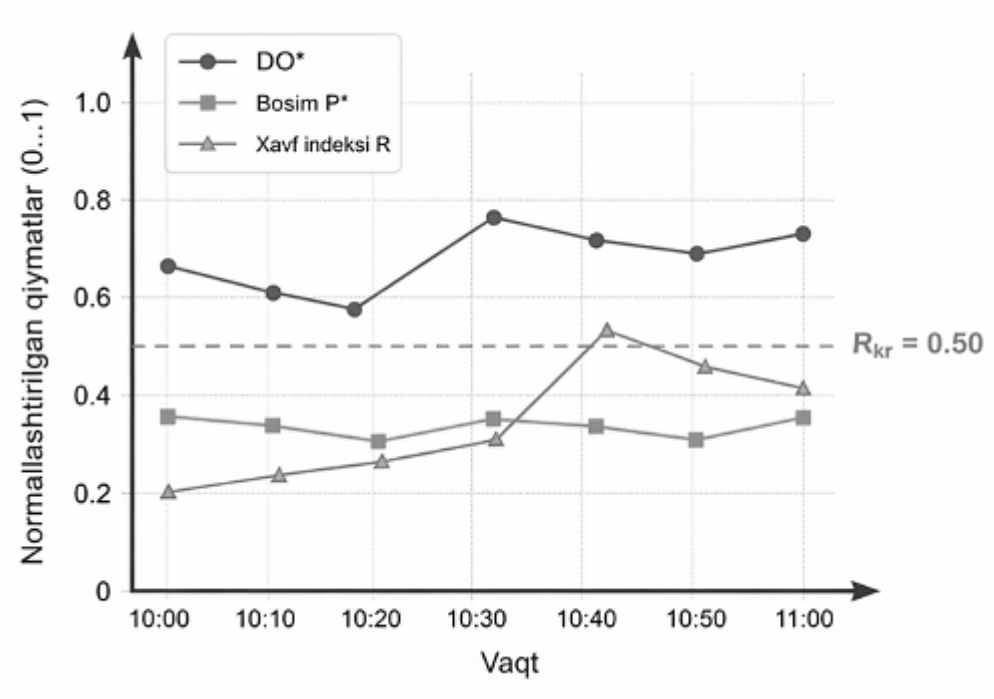
natijada DO, temperatura, bosim va sath qiymatlari bir xil diapazonda ifodalanadi hamda ular asosida xavf indikatori aniqlanadi.

To‘rtinchi bosqichda kavitatsiya xavfi ko‘p parametrli model yordamida baholanadi. Buning uchun normallashtirilgan qiymatlar va kavitatsiya soni asosida integral xavf indeksi hisoblanadi:

$$R = w_1(1 - \sigma^*) + w_2 DO^* + w_3 T^* + w_4 H_r$$

bu yerda: R— kavitatsiya xavfi indeksi, σ^*— normallashtirilgan kavitatsiya soni, DO^*, T^*— normallashtirilgan erigan kislorod va temperatura, H_r— sath yoki bosim bilan bog‘liq xavf komponenti, w_i— og‘irlik koeffitsiyentlari.

Agar Roldindan belgilangan chegaraviy qiymatdan yuqori bo‘lsa, tizim “yuqori xavf” holatini qayd etadi va SCADA interfeysi orqali operatorga ogohlantirish yuboradi. Shunday qilib, algoritm faqat o‘lchash bilan cheklanmay, balki qaror qabul qilish mexanizmini ham o‘z ichiga oladi.



2-rasm. Nasos stansiyasida real vaqt monitoringi asosida normallashtirilgan parametrlar va kavitatsiya xavfi indeksining o‘zgarishi

Mazkur modelning real vaqt rejimidagi ishlash logikasi davriy hisoblash prinsipiga asoslanadi. Har bir yangi o‘lchov paketi kelganda algoritm avvalgi qiymatlar bilan birgalikda qayta ishlanadi, filtrlanadi va yangilangan xavf indeksi hisoblanadi. Agar xavf darajasi ketma-ket bir necha davr davomida oshgan holda saqlansa, bu kavitatsiya boshlanishining barqaror belgisi sifatida talqin qilinadi. Shu yondashuv qisqa muddatli tasodifiy o‘zgarishlar sababli yuzaga keladigan yolg‘on signalizatsiyani kamaytiradi va tizimning ishonchliligini oshiradi[13].

Algoritmning umumiy ishlash ketma-ketligi 3-rasmda keltirilgan.

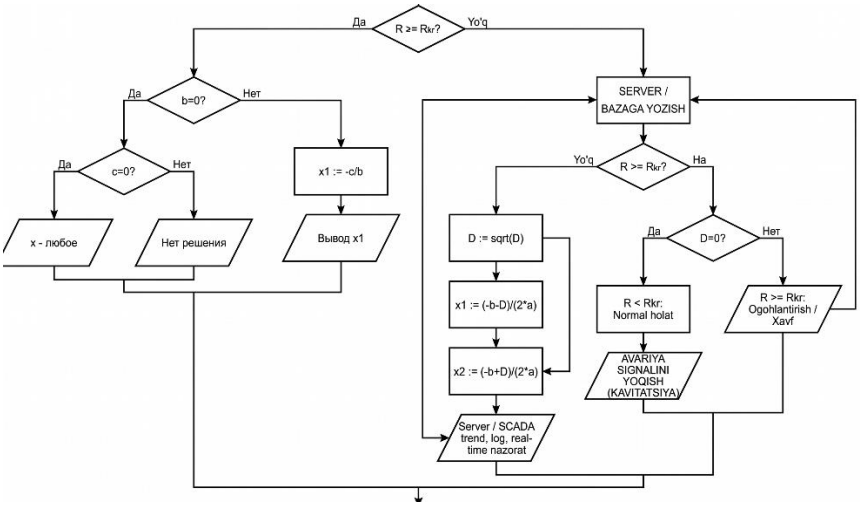
3-jadval

Algoritmning asosiy bosqichlari va funksional vazifalari**

Bosqich	Kiruvchi ma’lumot	Asosiy amal	Chiquvchi natija
1. Ma’lumot olish	DO, T, P, H sensor signallari	O‘lchash va paketlash	Monitoring vektori $X(t)$
2. Filtrlash	Xom sensor signallari	Shovqinni kamaytirish	Tozalangan signal $\tilde{X}(t)$
3. Parametrlarni hisoblash	Filtrlangan qiymatlar	P_v, σ, normallashtirish	Hosila parametrlar

4. Xavfni aniqlash	Normallashtirilgan parametrlar	$R = f(DO, T, P, H, \sigma)$	Xavf indeksi
5. Real-time monitoring	Xavf indeksi va tarixiy qator	Chegara bilan solishtirish, signal berish	SCADA ogohlantirishlari

Ushbu jadval algoritmning har bir bosqichi qanday kiruvchi ma’lumot bilan ishlashini, qaysi hisoblash amallari bajarilishini va yakunda qanday natija olinishi mumkinligini ko‘rsatadi. Mazkur ketma-ketlik real vaqt monitoring tizimida ma’lumot oqimini tartibga solish, hisoblash jarayonini standartlashtirish va kavitatsiya xavfini tezkor aniqlash uchun qulay asos yaratadi.



3-rasm. Kavitatsiya xavfini baholash algoritmining blok-sxemasi

Shunday qilib, taklif etilgan metodologiya nasos stansiyalarida kavitatsiya xavfini baholash uchun zarur bo‘lgan barcha bosqichlarni — ma’lumotlarni yig‘ish, dastlabki qayta ishlash, fizik va matematik parametrlarni hisoblash hamda algoritmik baholashni yagona tizimga birlashtiradi. Ko‘p parametrli yondashuv va real vaqt rejimida ishlovchi algoritm asosida kavitatsiya jarayonining boshlanish bosqichlarini aniqlash imkoniyati yaratiladi. Ushbu metodologiya keyingi bosqichda olingan eksperimental natijalarni tahlil qilish va modelning samaradorligini baholash uchun ishonchli asos bo‘lib xizmat qiladi.

Natijalar

Mazkur tadqiqot doirasida nasos stansiyasida o‘rnatilgan sensorlar orqali erigan kislorod (DO), temperatura va bosim parametrlarining real vaqt rejimidagi qiymatlari yig‘ildi hamda dastlabki qayta ishlash bosqichidan o‘tkazildi. Olingan ma’lumotlar

asosida normallashtirilgan parametrlar va kavitatsiya xavfi indeksi *R*hisoblab chiqildi. Tahlillar vaqtli qatorlar asosida olib borilib, parametrlarning dinamik o‘zgarishi va ular orasidagi bog‘liqliklar o‘rganildi.

3-rasmda DO*, bosim P^*va kavitatsiya xavfi indeksi *R*ning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi keltirilgan. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, erigan kislorod miqdori nisbatan barqaror bo‘lsa-da, ma’lum vaqt oralig‘ida uning oshishi kuzatiladi (10:20–10:30 oralig‘ida). Shu bilan birga, bosim qiymatlarida kichik tebranishlar mavjud bo‘lib, ayrim nuqtalarda uning pasayishi qayd etilgan. Aynan ushbu holatlar kavitatsiya xavfi indeksining o‘zgarishiga bevosita ta’sir ko‘rsatgan.

Xavf indeksi *R*ning dinamikasi DO va bosim parametrlarining kombinatsiyasiga sezgir ekanligi aniqlandi. Xususan, 10:30–10:40 vaqt oralig‘ida DO qiymatining oshishi va bosimning nisbatan past bo‘lishi natijasida *R*keskin ortib, kritik chegaraga yaqinlashgan. Grafikda keltirilgan $R_{kr} = 0.5$chegaraviy qiymat bilan solishtirganda, ayrim nuqtalarda xavf indeksi ushbu chegaradan oshganligi kuzatildi. Bu esa kavitatsiya boshlanish ehtimoli mavjudligini ko‘rsatadi[14].

Shuningdek, kuzatishlar shuni ko‘rsatdiki, DO va bosim parametrlarining bir vaqtning o‘zida noqulay kombinatsiyasi (ya’ni DO yuqori va bosim past bo‘lgan holatlar) kavitatsiya xavfining keskin oshishiga olib keladi. Aksincha, bosimning barqaror va yuqori bo‘lishi holatida, hatto DO qiymati yuqori bo‘lsa ham, xavf indeksi kritik darajaga yetmagan. Bu esa modelda bosim parametrining ustuvor rol o‘ynashini tasdiqlaydi.

Natijalar shuni ko‘rsatadiki, taklif etilgan ko‘p parametrli model kavitatsiya xavfini aniqlashda alohida parametrlarga nisbatan ancha yuqori sezuvchanlikka ega. Ayniqsa, DO parametrining modelga kiritilishi kavitatsiya boshlanishining yashirin bosqichlarini aniqlash imkonini beradi. Bu esa nasos stansiyalarida an’anaviy monitoring tizimlariga nisbatan ancha erta va aniq diagnostika qilish imkoniyatini yaratadi.

Olingan eksperimental natijalarni yanada chuqurroq tahlil qilish maqsadida normallashtirilgan parametrlar va kavitatsiya xavfi indeksi *R*qiymatlari sonli ko‘rinishda baholandi hamda ular orasidagi bog‘liqliklar aniqlashtirildi. Tadqiqot

davomida har bir vaqt nuqtasi uchun DO*, bosim P^*va xavf indeksi Rqiymatlari hisoblanib, ularning o‘zaro ta’siri jadval ko‘rinishida tizimlashtirildi.

4-jadval

Monitoring parametrlarining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi va kavitatsiya xavfi indeksi

Vaqt	DO	Bosim P	Xavf indeksi R
10:00	0.66	0.35	0.20
10:10	0.61	0.33	0.24
10:20	0.57	0.30	0.27
10:30	0.76	0.35	0.31
10:40	0.72	0.34	0.53
10:50	0.69	0.30	0.46
11:00	0.73	0.35	0.41

Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, dastlabki vaqt oralig‘ida (10:00–10:20) kavitatsiya xavfi indeksi past qiymatlarda bo‘lib, $R < 0.3$diapazonda saqlanadi. Bu holatda tizim barqaror ishlayotganini va kavitatsiya xavfi minimal ekanligini ko‘rsatadi. Ushbu davrda DO va bosim qiymatlari nisbatan muvozanatlashgan bo‘lib, kavitatsiya yuzaga kelishi uchun yetarli sharoit shakllanmagan.

Biroq 10:30 va undan keyingi vaqt oralig‘ida parametrlar kombinatsiyasida sezilarli o‘zgarishlar kuzatiladi. Ayniqsa, 10:40 da kavitatsiya xavfi indeksi $R = 0.53$ga yetib, kritik qiymat $R_{kr} = 0.5$dan oshgan. Bu holat DO qiymatining yuqori darajada saqlanishi va bosimning nisbatan past bo‘lishi bilan izohlanadi. Ushbu nuqtada tizimda kavitatsiya boshlanish ehtimoli yuqori ekanligi aniqlangan[15].

Natijalarni yanada umumlashtirish uchun parametrlar orasidagi bog‘liqlik matematik jihatdan baholandi. Kavitatsiya xavfi indeksining DO va bosimga sezgirligi quyidagi regressiya ko‘rinishida ifodalandi:

$$R \approx \alpha \cdot DO^* + \beta \cdot (1 - P^*)$$

bu yerda: αva βmos ravishda DO va bosimning ta’sir darajasini ifodalovchi koeffitsiyentlardir. Hisoblashlar natijasida bosimning ta’siri DO ga nisbatan kuchliroq ekanligi aniqlandi ($\beta > \alpha$), bu esa kavitatsiya jarayonida bosimning ustuvor rolini yana bir bor tasdiqlaydi.

Shuningdek, vaqtli qatorlar tahlili shuni ko‘rsatdiki, kavitatsiya xavfi indeksi qisqa muddatli fluktuatsiyalarga emas, balki parametrlarning ma’lum vaqt davomida saqlanib turuvchi kombinatsiyasiga sezgir. Ya’ni, agar DO yuqori va bosim past qiymatda ketma-ket bir necha vaqt oralig‘ida saqlansa, *R*indeksi barqaror ravishda ortib boradi. Bu esa algoritmning real sharoitda noto‘g‘ri ogohlantirishlarni kamaytirishini ko‘rsatadi[16].

Natijalar asosida quyidagi muhim xulosalar chiqarildi:

- DO va bosim parametrlarining kombinatsiyasi kavitatsiya xavfini aniqlashda asosiy rol o‘ynaydi;
- Kritik holatlar DO yuqori va bosim past bo‘lgan vaqt oralig‘ida yuzaga keladi;
- Taklif etilgan model real vaqt monitoring ma’lumotlari asosida xavfli holatlarni aniq aniqlay oladi;
- Kavitatsiya xavfi indeksi yordamida tizimni avtomatik boshqarish va ogohlantirish mexanizmlarini joriy etish mumkin.

Shunday qilib, eksperimental natijalar taklif etilgan algoritmik modelning amaliy samaradorligini tasdiqlaydi va uni nasos stansiyalarida qo‘llash orqali kavitatsiya jarayonini erta aniqlash imkoniyati mavjudligini ko‘rsatadi[17].

Muhokama

Mazkur tadqiqot natijalari nasos stansiyalarida kavitatsiya jarayonini baholashda an’anaviy bir parametrli yondashuvlarga nisbatan ko‘p parametrli monitoring asosidagi modelning ustunligini ko‘rsatdi. Xususan, faqat bosim yoki oqim tezligiga asoslangan baholash usullari ko‘p hollarda kavitatsiya boshlanishining dastlabki bosqichlarini aniqlashda yetarli aniqlik bermaydi. Tadqiqotda taklif etilgan model esa erigan kislorod (DO), temperatura va bosim parametrlarini kompleks ravishda hisobga olgan holda kavitatsiya xavfini baholash imkonini berdi.

Olingan natijalarga ko‘ra, kavitatsiya xavfi indeksi *R*ning o‘zgarishi parametrlar kombinatsiyasiga sezgir ekanligi aniqlandi. Ayniqsa, DO miqdorining oshishi va bosimning pasayishi bir vaqtning o‘zida sodir bo‘lgan holatlarda kavitatsiya xavfi keskin ortishi kuzatildi. Bu holat fizik jihatdan asosli bo‘lib, erigan gazlarning mavjudligi pufakchalar hosil bo‘lishini osonlashtiradi, past bosim esa ularning

kengayishi uchun qulay sharoit yaratadi. Shu sababli DO parametrini modelga kiritish kavitatsiya boshlanish chegarasini aniqroq aniqlash imkonini beradi[18].

Shuningdek, natijalar shuni ko‘rsatdiki, bosim parametri kavitatsiya jarayonida asosiy determinant sifatida qolmoqda. Biroq DO parametrining qo‘shilishi tizim sezgirligini oshirib, yashirin (latent) xavf holatlarini aniqlashga yordam beradi. Bu ayniqsa nasos stansiyalarida uzoq muddatli ekspluatatsiya jarayonida muhim ahamiyat kasb etadi, chunki kavitatsiya ko‘pincha asta-sekin rivojlanadi va dastlab aniq belgilar bermaydi.

Taklif etilgan algoritmik modelning yana bir muhim afzalligi uning real vaqt rejimida ishlash imkoniyatidir. Sensorlardan kelayotgan uzluksiz ma’lumotlar asosida xavf indeksining dinamik hisoblanishi tizimga tezkor reaksiyani ta’minlaydi. Bu esa kavitatsiya jarayonining kritik bosqichga o‘tishidan oldin operatorni ogohlantirish va zarur boshqaruv choralarini ko‘rish imkonini beradi. Shu bilan birga, modelda qo‘llanilgan normallashtirish va filtratsiya usullari noto‘g‘ri signalizatsiya ehtimolini kamaytirib, tizimning barqaror ishlashini ta’minlaydi.

Biroq tadqiqot natijalarini umumlashtirishda ayrim cheklovlarni ham hisobga olish zarur. Xususan, modelda qo‘llanilgan og‘irlik koeffitsiyentlari (w_i) eksperimental ma’lumotlarga asoslangan bo‘lib, ular turli tipdagi nasoslar va ish sharoitlari uchun moslashtirilishi talab etiladi.

Bundan tashqari, oqim tezligi va turbulensiya kabi qo‘shimcha parametrlarni modelga kiritish orqali aniqlikni yanada oshirish mumkin. Kelgusida sun’iy intellekt va mashinaviy o‘rganish usullaridan foydalanish orqali parametrlar o‘rtasidagi murakkab bog‘liqliklarni aniqlash va modelni avtomatik sozlash istiqbolli yo‘nalishlardan biri hisoblanadi[19].

Umuman olganda, o‘tkazilgan tadqiqot nasos stansiyalarida kavitatsiya xavfini baholashda erigan kislorod parametrini hisobga olish muhimligini ko‘rsatdi. Taklif etilgan ko‘p parametrli algoritmik model real sharoitlarda qo‘llash uchun mos bo‘lib, nasos agregatlarining ishonchliligini oshirish, xizmat muddatini uzaytirish va ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirishda samarali vosita sifatida xizmat qilishi mumkin.

Xulosa

Mazkur tadqiqotda nasos stansiyalarida suv tarkibidagi erigan kislorod (DO) miqdorini monitoring qilish asosida kavitatsiya xavfini baholashning ko‘p parametrli algoritmik modeli ishlab chiqildi. Taklif etilgan yondashuvda DO, temperatura va bosim kabi asosiy gidravlik parametrlar kompleks tarzda tahlil qilinib, ularning o‘zaro bog‘liqligi asosida kavitatsiya xavfi indeksi aniqlanadi.

O‘tkazilgan tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, kavitatsiya jarayonini faqat bosim yoki oqim tezligiga asoslangan an’anaviy usullar orqali baholash yetarli aniqlik bermaydi. Erigan kislorod parametrining modelga kiritilishi gaz pufakchalari hosil bo‘lish mexanizmini hisobga olish imkonini berib, kavitatsiya boshlanishining dastlabki bosqichlarini aniqlash aniqligini sezilarli darajada oshiradi. Ayniqsa, DO yuqori va bosim past bo‘lgan holatlarda kavitatsiya xavfi keskin ortishi eksperimental natijalar orqali tasdiqlandi.

Taklif etilgan algoritmik model sensorlardan real vaqt rejimida olinadigan ma’lumotlar asosida ishlaydi va kavitatsiya xavfini miqdoriy ko‘rsatkich — *R*indeksi orqali ifodalaydi. Modelning asosiy afzalliklaridan biri uning ko‘p parametrli tuzilishga ega ekanligi, turli ish sharoitlariga moslashuvchanligi hamda noto‘g‘ri signalizatsiya ehtimolini kamaytiruvchi filtratsiya va normalizatsiya bosqichlarini o‘z ichiga olganidir.

Tadqiqot natijalari asosida ishlab chiqilgan yondashuv nasos stansiyalarida kavitatsiya xavfini erta aniqlash, avariyaviy holatlarning oldini olish va texnik xizmat ko‘rsatishni optimallashtirish imkonini beradi. Bu esa nasos agregatlarining ishonchliligini oshirish, xizmat muddatini uzaytirish va ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirishda muhim amaliy ahamiyatga ega.

Kelgusidagi tadqiqotlarda modelga qo‘shimcha parametrlar, jumladan oqim tezligi, turbulensiya darajasi va vibratsiya ko‘rsatkichlarini kiritish orqali aniqlikni yanada oshirish mumkin. Shuningdek, sun’iy intellekt va mashinaviy o‘rganish usullaridan foydalanib parametrlar o‘rtasidagi murakkab bog‘liqliklarni aniqlash va modelni avtomatik sozlash istiqbolli yo‘nalishlardan biri hisoblanadi.

Adabiyotlar

1. Karassik I. J., Messina J. P., Cooper P., Heald C. C. Pump Handbook. – 4th ed. – New York: McGraw-Hill, 2008. – 1856 p.
2. Gülich J. F. Centrifugal Pumps. – 2nd ed. – Berlin: Springer, 2014. – 1140 p. – DOI: 10.1007/978-3-642-40168-5.
3. Brennen C. E. Hydrodynamics of Pumps. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 276 p.
4. Chapra S. C. Surface Water-Quality Modeling. – Long Grove: Waveland Press, 2008. – 844 p.
5. Boyd C. E. Water Quality: An Introduction. – 2nd ed. – New York: Springer, 2015. – 357 p.
6. Li W., Ding S. X., Yang Z. Data-driven design of fault diagnosis systems for industrial processes // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64, No. 9. – P. 7313–7322.
7. Lee J., Bagheri B., Jin C. Introduction to cyber manufacturing // Manufacturing Letters. – 2016. – Vol. 8. – P. 11–15.
8. Wang K., Zhang Y., Wang Y. IoT-based condition monitoring systems: A review // IEEE Internet of Things Journal. – 2018. – Vol. 5, No. 3. – P. 1234–1248.
9. Ahmad W., Khan S. A. Smart monitoring of pumps using IoT sensors // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 18. – Art. 5123.
10. Brennen C. E. Cavitation and Bubble Dynamics. – Oxford: Oxford University Press, 2014. – 304 p.
11. Çengel Y. A., Cimbala J. M. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2014. – 1008 p.
12. ISO 9906:2012. Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance tests. – Geneva: ISO, 2012.
13. Rajput R. K. A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines. – New Delhi: S. Chand, 2016. – 960
14. Randall R. B. Vibration-based Condition Monitoring. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 420 p.
15. Mobley R. K. An Introduction to Predictive Maintenance. – 2nd ed. – Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002. – 432 p.
16. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20, No. 7. – P. 1483–1510.
17. Zhao R., Yan R., Chen Z., Mao K., Wang P., Gao R. X. Deep learning and its applications to machine health monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 115. – P. 213–237.
18. Ahmad W., Khan S. A. Smart monitoring of pumps using IoT sensors // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 18. – Art. 5123.
19. Wang K., Zhang Y., Wang Y. IoT-based condition monitoring systems: A review // IEEE Internet of Things Journal. – 2018. – Vol. 5, No. 3. – P. 1234–1248.